ANAIS

VII CBCTEM

CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA

Viçosa/2026



SUMÁRIO

BIOENERGIA

A temperatura de coleta e o sistema de carbonização determinam a composição química do licor pirolenhoso de eucalipto.....25
Análise comparativa da qualidade do carvão vegetal para a indústria siderúrgica produzido por pequenos produtores dos municípios de Paulistas e Guanhães, Minas Gerais, Brasil.....35
Avaliação da Resistência Mecânica de Briquetes Autorredutores de Finos de Minério de Manganês e Carvão Vegetal.....47
Avaliação das propriedades da madeira de dois clones de Eucalyptus nas idades de 6 e 10 anos.....58
Avaliação de resíduos gerados na produção de polpa celulósica: uma alternativa para o uso energético.....68
Avaliação do biochar de lodo primário Kraft para descarbonização e uso no solo.....78
Avaliação do comportamento térmico e combustibilidade de pellets de resíduos de poda de abacateiro.....87
Avaliação do potencial das sementes de Geoffroea spinosa para obtenção de compostos químicos renováveis via pirólise rápida.....96
Avaliando a influência da composição química de três espécies de Eucalyptus spp. na emissão gasosa durante a queima em fornos de pizza.....106
Bagaço da laranja para produção de biocombustíveis sólidos.....117
Biochars de Resíduos Agroflorestais: Biomassa de Origem, Parâmetros de Pirólise e Combustibilidade.....127
Biomassa lenhosa e potencial energético de espécies da Caatinga em áreas sob regeneração florestal.....137
Biomassa Residual de Serrarias da Amazônia para Uso em Sistemas de Combustão Direta147
Caracterização das propriedades físicas, químicas e energéticas da madeira de Jatobá (Hymenaea parvifolia Huber).....156
Caracterização de resíduos do processamento do café para conversão termoquímica.....165
Caracterização energética da madeira de Zeyheria tuberculosa e Genipa americana visando ao aproveitamento de resíduos.....176
Caracterização físico-química comparativa revela propriedades complementares do caroço de açaí e da casca de castanha-do-brasil.....186

Caracterização química e potencial energético do resíduo de cacau (Theobroma cacao L.). 196
Caracterização Tecnológica de Briquetes de Madeira Residual Aplicados à Defumação de Alimentos..... 206
Carvão vegetal de espécies de Myrcia DC. provenientes de floresta secundária na Amazônia Oriental..... 217
Classificação rápida da condição higroscópica de equilíbrio de carvões produzidos a partir de resíduos madeireiros amazônicos por espectroscopia NIR portátil..... 227
Co-briquetagem de serragem de Pinus e casca de café para a produção de biocombustível sólido..... 237
Como a temperatura de pirólise e a proporção de carvão vegetal afetam as propriedades mecânicas e químicas de biocompósitos de matriz poliéster?..... 247
COMPACTAÇÃO DE RESÍDUOS LIGNOCELULÓSICOS PARA PRODUÇÃO DE PELLETS..... 257
Comportamento de combustão de pellets produzidos a partir de resíduos lignocelulósicos e agroindustriais: influência da composição química e energética..... 268
Conversão de resíduos agroindustriais em pellets para bioenergia: Efeito da biomassa sobre a resistência à combustão..... 277
Conversão Termoquímica da Casca de Café via Pirólise: Produção e Caracterização de Biochar com Potencial Energético..... 287
Dados da produção de carvão vegetal do Brasil entre 1994 e 2024..... 297
Eco-anatomia e inteligência artificial aplicadas à rastreabilidade de carvão de manguezais da Amazônia brasileira..... 305
Efeito da carbonização hidrotérmica na cinética de decomposição térmica do hidrocarvão de casca de arroz..... 317
Efeito da temperatura de pirólise e do tipo de biomassa nas propriedades físico-químicas do biochar..... 327
Efeito da temperatura de pirólise nas características do biochar de resíduos de bambu (Bambusa vulgaris)..... 337
Efeito da temperatura de pirólise no rendimento de biocarvão das cascas de Zeyheria tuberculosa e Genipa americana..... 346
Efeito da variabilidade da biomassa de Bambusa vulgaris na composição química imediata e potencial energético..... 356
Efeitos dos parâmetros de pirólise de pellets de palha de café na produção de biocarvão para produção de energia..... 366

Emissões de Gases Poluentes na Combustão de Diferentes Biomassas Florestais.....375
Estimativa do poder calorífico superior de madeiras da Amazônia utilizando a espectroscopia FT-NIR.....385
Estimativas das propriedades do carvão vegetal de espécies da Amazônia em função do gradiente de densidade aparente da madeira.....396
Estimativas energéticas de resíduos madeireiros de Brosimum rubescens Taub. em área sob concessão florestal na Amazônia.....406
ESTUDO DA CASCA, IDADE E POSIÇÃO NO TRONCO NA QUALIDADE DO CARVÃO VEGETAL DE EUCALIPTO.....416
Impacto da Temperatura de Pirólise na Conversão da Palha de Café para Biocombustível Líquido.....425
Impactos da casca no rendimento e qualidade do carvão vegetal para fins siderúrgicos.....434
Influência da espécie florestal na qualidade energética de pellets produzidos com resíduos de manejo sustentável na Amazônia.....444
Influência da preparação da amostra na caracterização bioenergética de pellets: comparação entre pellets íntegros e moídos.....454
Influência da temperatura de pirólise e granulometria na ignição do carvão vegetal de Eucalyptus sp.....462
Influência das propriedades térmicas da madeira de café na pirólise rápida oxidativa em leito fluidizado.....471
Influência do teor de farinha de milho no desempenho de briquetes de finos de carvão.....481
Modelos espectrais para classificação de carvões industriais de resíduos Amazônicos.....498
Otimização dos parâmetros de compactação na produção de briquetes de serragem de breu-vermelho (Protium spp.).....508
Peletização como estratégia para otimização logística e operacional da produção de biochar de palha de café.....520
Perfil térmico e balanço de carbono da produção de carvão vegetal a partir dos resíduos do manejo florestal na Amazônia utilizando Sistema fornos-fornalha.....528
Potencial Bioenergético de Cascas de Cupuaçu (Theobroma grandiflorum) e Cacau (Theobroma cacao) da Amazônia Ocidental.....537
POTENCIAL DA BIOMASSA DO ESTIPE DE MACAÚBA (Acrocomia aculeata) PARA APLICAÇÕES ENERGÉTICAS.....548
Potencial energético de biomassa residual amazônica em processos de combustão direta…558
Potencial Energético de Resíduos da Cafeicultura na região do Triângulo Mineiro.....566

Potencial energético dos resíduos da Fava-d'anta (Dimorphandra mollis Benth).....574
Potencial energético dos resíduos de Angelim-pedra (Hymenolobium pulcherrimum Ducke) na Amazônia Ocidental.....584
Potencial energético e comportamento de pirólise de resíduos de acácia-negra e porongo...594
Produção de açúcares pirolíticos a partir de biomassa lignocelulósica.....604
Produção de biocarvão com resíduos de Tectona grandis L. f. em diferentes temperaturas de pirólise.....615
Produção de biochar a partir de resíduos de Cocos nucifera L.....625
Produção de carvão vegetal de baixo carbono a partir de resíduos de manejo florestal em sistema fornos-fornalha na Amazônia.....635
Produção e Caracterização Energética do Carvão Vegetal de resíduos de Castanha-do-Pará, Teca e Ipeúba.....645
Produtividade e características energéticas da madeira de clones de Eucalyptus spp. em dois sítios aos 36 meses de idade.....655
Propriedades energéticas do carvão vegetal de clone comercial visando à aplicação na siderurgia.....665
Propriedades físicas do carvão vegetal de Hovenia dulcis Thunberg em diferentes carbonizações.....676
Qualidade do carvão vegetal comercializado para preparo de alimentos no município de Imperatriz – MA.....685
Qualidade do carvão vegetal da madeira de Corymbia com diferentes idades e posições do tronco.....695
Qualidade energética de resíduos de manejo florestal sustentável para aplicação do sistema fornos-fornalha na Amazônia.....703
Qualidade energética do carvão vegetal das biomassas de Corymbia citriodora.....713
Qualidade energética e composição química de carvões vegetais produzidos pelos sistemas convencional e forno-fornalha.....721
Resíduos da exploração comercial do palmito da guerobeira (Syagrus oleracea (Mart.) Becc) para geração de bioenergia.....729
Resíduos florestais da floresta de Miombo como matéria-prima para produção de carvão vegetal.....737
Torrefação de Minicavacos de Eucalyptus sp. Para Fins Energéticos.....747
Tratamento Alcalino do Resíduo Lignocelulósico do Pós Cultivo De Cogumelo Lentinula edodes para Fins Energéticos.....758

Utilização da tecnologia LiDAR na determinação de madeira enfornada em fornos de carbonização.....767
Valorização de resíduos agroindustriais de Minas Gerais para produção de pellets: Avaliação das propriedades físicas e químicas.....778
Valorização de subprodutos vitivinícolas: caracterização energética do engaço e do bagaço de uva.....788
Valorização energética de resíduos amazônicos via briquetes de dendê e castanha-do-Brasil 800
Variação da área superficial de Biochar produzidos a partir de resíduos madeireiros amazônicos em função da temperatura de pirólise.....810

BIORREFINARIA E NÃO MADEIREIROS

A química florestal em um contexto de mudanças climáticas..... 820
A temperatura de pirólise determina a compatibilidade entre biochar de bambu (Bambusa vulgaris) e Trichoderma harzianum..... 829
ADESIVO LIGNINA-UREIA-FORMALDEÍDO COM BAIXA EMISSÃO DE FORMALDEÍDO..... 839
Análise bibliométrica da literatura sobre o perfil fitoquímico da espécie Licania tomentosa 849
Análise comparativa da eficiência de coagulantes comerciais e tanino líquido no tratamento de água..... 857
Análise comparativa da eficiência de tanino líquido e tanino em pó de Acacia mearnsii De Wild. no tratamento de água..... 868
Análise Imediata da Biomassa Proveniente da Polpa de Geoffroea spinosa Jacq..... 877
Aplicabilidade e eficiência do tanino cationizado de Anacardium occidentale em função do tempo de armazenamento..... 885
Aplicação de extratos obtidos de resíduos madeireiros para pigmentação de madeiras claras 895
Aplicação de hidróxido de magnésio na otimização do estágio (EP) de branqueamento de polpa celulósica..... 905
Aprimoramento da eficiência da deslignificação com oxigênio por meio do reforço com peróxido de hidrogênio..... 913
Atividade antifúngica da fração tânica de Anadenanthera colubrina (Vell.) Brenan frente a Candida albicans..... 920

Avaliação das propriedades físico-mecânicas de papel produzido a partir de resíduos agrícolas da indústria cafeeira.....929
Avaliação de Extratos Tânicos Cationizados de Anadenanthera colubrina (Vell.) Brenan no Tratamento de Efluentes de Comunidade Rural.....939
Avaliação do potencial do cacho de macaúba (Acrocomia aculeata) para a produção de pellets.....947
Avanços e tendências no uso de nanopartículas de lignina para fotoproteção.....957
Biocarvão de Resíduos Florestais Modificado com Ferro e Cobre para Degradação de Contaminantes Ambientais.....970
Biochar de Resíduo de Serraria de Madeira Nativa da Amazônia.....982
Características de filmes de celulose microfibrilada e tanino.....990
Caracterização da composição físico-química dos nós gerados na produção de celulose Kraft 1002
Caracterização de biomassas de bambu e ligninas kraft em uma abordagem de biorrefinaria 1012
Caracterização energética de biocarvões de resíduos de madeira de seringueira (Hevea brasiliensis) em diferentes parâmetros de pirólise.....1022
Caracterização físico-química comparativa de biochar de palha de café in natura e pelletizada 1032
Caracterização físico-química das cinzas de fundo de caldeiras gerados no processo da caldeira de recuperação da produção celulose kraft.....1043
Caracterização físico-química de palitos provenientes da produção de celulose kraft para avaliação do potencial de aproveitamento.....1052
Caracterização macroanatômica da casca de Khaya senegalensis A. Juss. em diferentes posições longitudinais do fuste.....1062
Caracterização química do pergaminho de café visando sua conversão em bioprodutos....1072
Caracterização química e textural de biocarvão de resíduo lignocelulósico de café para tratamento de efluentes.....1082
Carbonização hidrotérmica como estratégia para aumentar a produção de levoglucosano a partir da casca de arroz por pirólise convencional.....1092
Colorimetria e barreira à luz em filmes produzidos com nanocelulose obtida da polpa de Eucalyptus sp. tratada com silicatos.....1103
Comportamento reológico de hidrogéis a base de nanocelulose submetidos a secagem em spray drying.....1113

Compostos Fenólicos nos Extratos de Espécies Florestais do Nordeste Brasileiro.....1124
Correlação entre parâmetros da extração e composição do óleo essencial de Corymbia citriodora.....1134
Desempenho mecânico e propriedades de barreira de nanofibrilas de celulose obtidas de resíduos de tubos de papel.....1142
Desenvolvimento de filmes de nanocelulose a partir de resíduos lignocelulósicos do açaí 1152
Desenvolvimento de um hidrogel sustentável à base de nanofibrilas de celulose para o gerenciamento de água na produção de mudas de café.....1163
Determinação da Força Máxima de Ruptura e Alongamento de Fios de Algodão revestidos com Látex de Hevea brasiliensis.....1174
Determinação de extrativos totais na madeira de três espécies amazônicas e aplicação como corante natural.....1183
Dispersão de água em filmes de nanofibrilas lignocelulósicas oriundas da casca de cambará (Qualea paraensis Ducke).....1192
Efeito da Biomassa e Temperatura de Pirólise no Potencial de Armazenamento de CO2eq pelo Biochar.....1202
Efeito da concentração de NaOH na polpação soda de fibras de jerivá.....1212
Efeito da intensidade de tosta interna de dornas sobre a composição química de aguardente de cana-de-açúcar.....1221
Efeito da pirólise no rendimento e composição química de biochar de casca de cacau (Theobroma cacao).....1231
Efeito do pré-tratamento com solvente orgânico na deslignificação de resíduos lignocelulósicos para a produção de etanol 2G.....1242
Efeito do tempo de armazenamento nas propriedades floculantes do tanino de Terminalia catappa.....1250
Efeito do tratamento térmico na composição química de Cedrela fissilis: potencial aromático avaliado por FTIR.....1259
Efeito do tratamento térmico nas propriedades químicas da lignina kraft de eucalipto.....1269
EFEITO DO USO DE BIOCHAR NA PRODUÇÃO DE Cannabis sativa.....1279
Efeito dos Extrativos de Espécies do Semiárido Neotropical Sobre o Crescimento In Vitro de Pseudosamanea guachapele.....1288
Eficiência dos taninos de Acacia mearnsii De Wild. e Eucalyptus cloeziana F. Muell. no tratamento terciário de efluente de kraft.....1298

Encapsulamento de Compostos Fenólicos Derivados da Madeira por gelificação iônica e liofilização.....1308
ESTUDO DA ESCALABILIDADE DA PRODUÇÃO DE LIGNOSSULFONATOS A PARTIR DE LIGNINA KRAFT DE EUCALIPTO.....1319
Filmes nanocelulósicos obtidos a partir de resíduos de papel modificados com silicatos…1329
Influência da Incorporação de Nanocelulose na Rugosidade Superficial de Papéis Celulósicos 1339
Influência da lignina residual no teor de compostos fenólicos de filmes de nanocelulose..1347
Influência da Moagem Masuko e da Dispersão em Ultra-Turrax na Distribuição do Tamanho de Partículas de Celulose de Eucalyptus spp.....1354
Influência da pirólise nas propriedades químicas e estocagem de carbono do biochar de Hevea brasiliensis.....1362
Influência da pirólise no pH e condutividade elétrica de biochar de frutos e sementes.....1373
Influência do tempo de extração no rendimento e qualidade dos taninos da casca de Eucalyptus cloeziana.....1382
Lignina fracionada como reforço sustentável para filmes de PLA.....1391
Método de extração mecânica para produção de taninos da casca de Anacardium occidentale L.....1401
Modificação superficial e secagem por pulverização de celulose micro/nanofibrilada: estudo da desintegração em água.....1411
Novas espécies de madeira tropical com potencial para o desenvolvimento de adesivo de base biológica.....1421
OTIMIZAÇÃO DA OXIDAÇÃO ALCALINA COM NITROBENZENO PARA CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA DA LIGNINA DA MADEIRA E KRAFT.....1431
Otimização das condições de síntese de biocarvões ativados a partir de lignina kraft para remoção de ceftriaxona.....1439
Perfil Fitoquímico do Extrato Metanólico da Casca de Anadenanthera colubrina (Vell.) Brenan.....1450
PIRÓLISE EM DOIS ESTÁGIOS DA MADEIRA PARA OBTENÇÃO DE COMPOSTOS BIORREFINADOS.....1458
Polpação Kraft com Antraquinona: Avaliação de Migração Residual.....1468
Polpação kraft modificada de resíduos de eucalipto para produção de papel Kraftliner.....1479
Potencial Antifúngico do Extrativo da Madeira de Ziziphus joazeiro contra o complexo Sporothrix.....1489

Potencial antifúngico do líquido pirolenhoso de Eucalyptus urophylla × Eucalyptus grandis frente a fungos do gênero Candida.....1499
Potencial Antioxidante e Neuroprotetor do extrato da casca de Anacardium occidentale L. 1509
Potencial bioativo do líquido pirolenhoso obtido em sistema forno-fornalha: atividade antioxidante e compostos fenólicos.....1519
Potencial biotecnológico da casca residual de Eucalyptus cloeziana F. Muell. como fonte de compostos antimicrobianos.....1527
Potencial da casca de Corymbia citriodora x Corymbia torelliana na produção sustentável de adesivos.....1537
Potencial da casca de teca (Tectona grandis L. f.) como fonte de taninos condensados e compostos fenólicos proveniente de plantio silvicultural no Nordeste brasileiro.....1547
Potencial de resíduos do descascamento de toras para produção de biochar: caracterização físico-química.....1557
Potencial econômico e usos de palmeiras nativas da Mata Atlântica na Bahia.....1567
POTENCIAL FITOTERÁPICO DO EXTRATO DE CASCAS DE MOGNO AFRICANO (Khaya grandifoliola) NO CONTROLE DA MASTITE BOVINA.....1577
Potencial fungistático da fração tânica de Anadenanthera colubrina (Vell.) Brenan frente ao Sporothrix brasiliensis.....1588
Potencial químico da casca de espécies arbóreas da Amazônia: perspectivas para aplicações em Biorrefinarias.....1598
Produção de açaí no Rio Grande do Norte e seu potencial como extrato tânico.....1608
Produtividade, qualidade e estoques de carbono das cascas de oito espécies florestais amazônicas e eucalipto.....1618
Propriedades de barreira de filmes de nanofibrilas de celulose obtidas de casca de maracujá 1627
Qualidade do biochar de palha de café produzido sob diferentes condições de pirólise para mitigação de carbono.....1637
Quantificação do Teor de Taninos Presentes na Casca da Aroeira-do-sertão (Myracrodruon urundeuva Allemão).....1647
Quantificação e caracterização por FTIR de taninos da casca de Mimosa tenuiflora: Efeito do espaçamento.....1656
Rastreabilidade taxonômico-botânica de espécies madeireiras em concessão florestal na Amazônia.....1666

Rotas de Utilização da Lignina na Produção de Adesivos para Plywood.....1676
Síntese de adesivos de nanoligninas-ureia-formaldeído e os efeitos na emissão de formaldeído.....1687
Taninos florestais no Brasil: aplicações biotecnológicas em adesivos sustentáveis e tratamento de efluentes.....1697
TECNOLOGIA DA MADEIRA APLICADA AO ENFRENTAMENTO DE PROBLEMAS SOCIOAMBIENTAIS.....1707
Teor de taninos condensados em espécies de mangue sob diferentes locais de amostragem 1717
Tratamento de água com tanino de Acacia mearnsii: influência da concentração e época de coleta.....1725
Usinagem e Tratamento Preservativo de lamelas na técnica de Arco Recombinado para Fins Estruturais.....1735
Uso de aditivos na polpação kraft visando o uso de cavacos superdimensionados.....1745
Uso de Compostos Fenólicos Encapsulados no Desenvolvimento de Biofilmes.....1753
Valorização de cascas residuais de cambará (Qualea paraensis Ducke) para obtenção de filmes nanoestruturados.....1763
VALORIZAÇÃO DE LIGNINA KRAFT MODIFICADA NA PRODUÇÃO DE ADESIVOS LIGNINA-FENOL-FORMALDEÍDO.....1773
Variação na Produção de Compostos Fenólicos entre Cajueiro Selvagem e Cajueiro-Anão Precoce (Anacardium occidentale L.).....1784

PRODUTOS MADEIREIROS: PAINÉIS, PRODUTOS ENGENHEIRADOS, MADEIRA PRESERVADA, MÓVEIS E PISOS

Abordagem metodológica para inspeção técnica em edificação de madeira: caso CEMAC/UFLA.....1794
Análise comparativa de métodos de determinação de umidade em madeiras de Pinus sp. e Eucalyptus sp.....1804
Análise de covariância para avaliação do desempenho de madeira sólida e engenheirada à flexão estática.....1813
Análise de deslocamentos horizontais em torres de madeira roliça, sob ação de ventos.....1823
Analise dos Principais Fatores do Processo de Vergado da Madeira para a Produção de Moveis.....1834

ANÁLISE DOS RENDIMENTOS DE MADEIRA SERRADA EM DIFERENTES SERRARIAS DE PINAR DEL RIO, CUBA.....1845
Aplicabilidade e aceitação de painéis EGP produzidos com resíduos de madeiras tropicais 1857
Atividade antifúngica dos extratos aquosos de Schinus terebinthifolius e Schinus molle contra fungos apodrecedores de madeira.....1867
Avaliação da integridade estrutural de árvores urbanas com uso de tomografia acústica…1877
Avaliação De Produtos Para Impermeabilização De Madeira De Espécies Amazônicas....1888
Avaliação de três adesivos comerciais para colagem de madeira juvenil de Tectona grandis Linn. f.....1897
Avaliação do Potencial de Fibras Branqueadas de Pergaminhos de Café para Produção de Papel.....1908
Avaliação Ultraestrutural da Interação Fungo-Madeira via Microscopia Eletrônica de Varredura em Espécies Amazônicas.....1917
Caracterização anatômica da madeira de Tectona grandis L.f. de dois locais de plantio….1930
Caracterização cromática de madeiras tropicais e potencial de substituição no setor moveleiro 1939
Caracterização de painéis aglomerados de Pinus sp. colados com PVA e poliuretano de mamona.....1950
Caracterização de painéis compensados de Pinus colados com PVA.....1958
Caracterização de painéis de madeira do tipo EGP (Edge Glued Panel).....1967
Caracterização físico-mecânica de painéis lignocelulósicos produzidos com resíduo de Coffea arabica L.....1975
Casca de mamona como matéria-prima alternativa para painéis aglomerados.....1985
Compostos bioativos vegetais na preservação da madeira: alternativas sustentáveis aos preservantes sintéticos.....1996
Delaminação em Elementos Estruturais Colados com e sem Alma de OSL sob Ciclos de Umidade e Secagem.....2006
DESEMPENHO DE PRODUTOS ALTERNATIVOS NA PROTEÇÃO SUPERCIFIAL DA MADEIRA DE TIMBORANA SUBMETIDA AO INTEMPERISMO NATURAL.....2014
Desempenho mecânico de estruturas emergenciais produzidas com resíduos domésticos..2027
Diagnóstico Tecnológico e Mapeamento Regional da Eficiência do Tratamento Preservativo de Madeiras no Brasil.....2037

Durabilidade de estacas de eucalipto tratadas com CCA em ensaio de campo no nordeste paraense.....2045
Efeito da modificação térmica nas propriedades mecânicas de madeiras de Eucalyptus sp. e Pinus sp. submetidas a diferentes temperaturas.....2055
Efeito do lixamento na rugosidade superficial em painéis de partículas produzidos com madeira de Pinus sp. e resíduos agrícolas.....2063
Efeito Do Tratamento Térmico À Vácuo Nas Propriedades Mecânicas De Três Espécies Madeireiras.....2072
Emissão de formaldeído em painéis com resina MUF.....2083
Ensaio para ligações em painéis de madeira lamelada cruzada cavilhada (PLCC): desenvolvimento e validação de um modelo.....2091
FIOS ANTIESTÁTICOS DE MICROFIBRILAS DE CELULOSE EM MATRIZ DE ALGINATO.....2103
Handfeel: Percepção dos Aspectos de Maciez em Papéis Tissue de uso Doméstico.....2114
Influência da concentração de NaOH na polpação soda de Erythrina poeppigiana (Walp.) O.F. Cook.....2124
Influência da gramatura de adesivo tanino-formaldeído de Mimosa tenuiflora nas propriedades mecânicas de painéis MLCC de Cedrela fissilis.....2134
Influência da Proporção de Partículas na Molhabilidade Superficial de Painéis Compósitos 2144
Influência de Revestimentos e Desmoldante no Desempenho de Compensados Externos Utilizados como Fôrmas de Concreto.....2152
Influência do teor de umidade nas propriedades tecnológicas da madeira de Tauari-vermelho (Cariniana micrantha).....2163
INFLUÊNCIA DO TRATAMENTO ENZIMÁTICO NAS PROPRIEDADES DOS FIOS DE MICROFIBRILAS DE CELULOSE DE BAGAÇO DE CANA.....2174
Marcenaria Básica para Mulheres na Melhor Idade: Valorização da madeira reaproveitada em uma ação extensionista.....2185
Modificação hidrotérmica e destilação do licor pirolenhoso: retenção e estabilidade térmica em lâminas de Paricá.....2193
Nanocelulose como reforço em painéis de baixa e média densidade de Eucalyptus e Caryocar brasiliense.....2203
Nanocelulose Liofilizada Como Reforço Em Painéis Aglomerados De Eucalyptus E Casca De Pequi.....2213

Painéis aglomerados produzidos com resíduos do cultivo da cebola (Allium cepa L.).....2224
Painéis de resíduos madeireiros para objeto sustentável.....2233
Painéis laminados de bambu (Dendrocalamus asper) produzidos com diferentes gramaturas de adesivo PVA.....2242
Painéis OSB de Schizolobium parahyba var. amazonicum: estabilidade dimensional e redução do consumo de adesivo.....2251
Painel aglomerado produzido com partículas de madeira, bambu e resina de poliuretano à base de óleo de mamona.....2260
Perfil de densidade de painéis aglomerados de média densidade produzidos com resíduos de espécies amazônicas.....2268
POTENCIAL ANTIFÚNGICO DO EXTRATO NATURAL DA MADEIRA DE Paulownia tomentosa FRENTE A FUNGOS DETERIORADORES.....2278
Potencial da casca de Araucaria angustifolia na estabilidade dimensional de painéis aglomerados de Pinus spp.....2287
Potencial da casca de Araucaria angustifolia na resistência mecânica de painéis aglomerados de Pinus spp.....2297
Potencial de Duas Novas Espécies Florestais para Produção de Polpa Kraft Branqueada..2306
Predição da umidade da madeira através da resistência à perfuração em árvores de eucalipto 2316
Propriedades físicas de painéis MDP híbridos madeira-EPS produzidos com Ochroma pyramidale e Pinus spp.....2325
Propriedades físico-mecânicas de painéis compensados de Pinus com diferentes revestimentos após intemperismo acelerado.....2335
Prospecção de Fungos Associados à Madeira em uma Área de Cerrado de Monte Carmelo, MG.....2345
Protótipos emergenciais em madeira para travessias de pessoas e de pequenas cargas: adaptação da ponte autoportante.....2354
Qualidade da Ligação Adesiva em Painéis de Madeira Lamelada Colada Cruzada produzidos com Medula de Eucalipto.....2363
Qualidade De Painéis Aglomerados Produzidos Com Partículas De Casca De Pequi E Látex Natural.....2372
Rendimento volumétrico e produção de madeira serrada de três espécies nativas na Amazônia 2382
Resistência à Térmita em Elemento Estrutural Perpendicular.....2392

Resistência ao fogo e alterações colorimétricas da madeira de teca submetida a diferentes modificações químicas.....2402
Resistência biológica e alterações colorimétricas da madeira de Eucalyptus cloeziana tratada com CCA.....2412
Resistência da madeira Hevea brasiliensis Muell. Arg. à ação do fungo xilófago Rhodonia placenta.....2422
Secagem ao ar livre da madeira de Peltophorum dubium (canafístula).....2431
Tolerância de fungos apodrecedores de madeira aos constituintes do arseniato de cobre cromatado - CCA.....2441
Tratamento da madeira de seringueira com óleos de Schinus spp. contra o fungo Pleurotus ostreatus.....2450
Uso de resíduos lignocelulósicos na fabricação de painéis particulados.....2460
Variação colorimétrica de quatro espécies madeireiras submetidas a estresse termo-higrométrico.....2470
Variação longitudinal da compressão paralela às fibras de espécies nativas da Mata Atlântica provenientes de reflorestamento.....2480
Variação longitudinal do teor de umidade e da densidade básica da madeira de Avicennia marina (Forssk.) Vierh.....2490

QUALIDADE DA MADEIRA/BIOMASSA

AmazonWoodAI: Aplicação para Classificação de Espécies de Madeiras Amazônicas.....2499
Análise comparativa da densidade da madeira de cajuaçu (Anacardium giganteum) e virola (Virola spp.).....2509
Análise histoquímica e Espectroscopia Raman da lignina guaiacil e siringil em madeiras amazônicas.....2517
Análise in situ das propriedades físicas da madeira de Pinus para produção de lápis via NIR 2528
Anatomia da madeira de clones poliploides de eucalipto.....2537
Anatomia da Madeira de Jacaranda copaia (Aubl.) D.Don (Bignoniaceae).....2547
Anatomia macroscópica e densidade básica da madeira de Avicennia germinans (L.) L. em floresta anã.....2556
Aplicação da espectroscopia FT-NIR para classificação das madeiras de Angelim da Amazônia.....2565

Aplicação da Tomografia de Impulso na Avaliação de Adenanthera pavonina na Universidade Federal do Acre.....2577
Associação entre biochar e esterco bovino como condicionadores de solo.....2586
Avaliação da durabilidade da madeira de Azadirachta indica A. Juss (Nim) em campo de apodrecimento.....2596
Avaliação da qualidade da madeira de clones de Eucalyptus spp. visando à produção de polpa celulósica kraft.....2605
Avaliação da qualidade madeira de Dialium guianense para uso como dormentes em relação à norma ABNT NBR 7511 (2026).....2614
Avaliação da resistência à perfuração para estimativa da densidade básica da madeira em Eucalyptus spp.....2623
Avaliação da resistência do mogno africano (Khaya grandifoliola) ao cupim arborícola Nasutitermes corniger.....2634
Avaliação da resposta espectral Raman de madeiras nativas de interesse forense.....2643
Avaliação da variação radial da densidade básica da madeira de espécies nativas da Mata Atlântica.....2653
Avaliação do Potencial de Degradação Biológica de Madeira por Fungos Prospectados em Área de Cerrado.....2663
Avaliação do potencial energético de fuste, galhos e raízes de Corymbia citriodora.....2672
Avaliação do Risco de Queda de Inga sessilis na Arborização Urbana por Tomografia de Impulso.....2682
Avaliação exploratória do potencial tecnológico de espécies madeireiras nativas da Amazônia 2692
Avaliação longitudinal dos extrativos da madeira e da casca de Eucalyptus e Corymbia...2701
Características morfológicas das fibras de Corymbia henryi e potenciais aplicações para indústria celulósica.....2709
Caracterização anatômica da madeira e do carvão vegetal de duas espécies de Couratari Aubl. 2719
Caracterização Anatômica de Duas Espécies Florestais Amazônicas: Hymenolobium petraeum Ducke e Goupia glabra Aubl.....2729
Caracterização anatômica de três espécies madeireiras oriundas de uma serraria localizada no nordeste paraense.....2738

Caracterização anatômica e organoléptica de três espécies madeireira amazônicas: Manilkara huberi (Ducke) A.Chev; Marlimorimia psilostachya (DC.) L.P.Queiroz & Marc.F.Simon e Astronium lecointei Ducke.....2747
Caracterização anatômica quantitativa do lenho de Robinia pseudoacacia e Fagus sylvatica por microscopia de luz e análise de imagem.....2756
Caracterização das propriedades físicas de galhos de Apeiba tibourbou AUBL.....2766
Caracterização das propriedades físicas e morfologia das fibras da madeira de Erisma uncinatum Warm provenientes de uma área de concessão florestal da Flona de Caxiuanã, PA 2775
Caracterização do colmo de bambu (Bambusa vulgaris) visando sua aplicação energética2785
Caracterização física da madeira proveniente de podas urbanas do município de Monte Carmelo – MG visando seu aproveitamento.....2793
Caracterização físico-química de biochars produzidos a partir de casca de Coffea arabica L. e cavacos de Eucalyptus spp.....2803
Caracterização fitoquímica da madeira de duas espécies da família Fabaceae: Enterolobium contortisiliquum e Pterogyne nitens.....2811
Caracterização macroscópica de madeiras de Lecythidaceae amazônicas: subsídios à identificação e à fiscalização florestal.....2821
Caracterização química de clones de Eucalyptus spp. visando à produção de polpa celulósica de dissolução.....2832
Caracterização química do lodo primário da indústria de celulose kraft para potencial aplicação no solo.....2841
Caracterização Química e Determinação da Densidade Básica de Dois Clones de Pinus taeda L.....2851
Coleção de referência na identificação forense de carvão vegetal:.....2860
Dendrocronologia aplicada ao estudo do crescimento de Eremanthus erythropappus (DC.) MacLeish no município Liberdade de Minas Gerais.....2869
Dendrocronologia revela ancestralidade centenária de Jequitibás-Rosa (Cariniana legalis) na RPPN Macedônia.....2879
Densidade básica da madeira de Eucalyptus urophylla x Eucalyptus grandis sob irrigação no semiárido brasileiro.....2891
Densidade da madeira de Tectona grandis jovem sob dois períodos de irrigação no Ceará, BR 2900

DESENVOLVIMENTO DE COMUNIDADE ENTOMOLÓGICA EM MADEIRAS DE TRÊS ESPÉCIES AMAZÔNICAS EXPOSTAS EM DOIS TIPOS DE AMBIENTES.....2909
Determinação da densidade aparente de espécies comerciais de Pinus do sudoeste paulista 2918
Determinação das propriedades físicas de Cedrela odorata (L.) e avaliação de porosidade por métodos de vácuo intermitente e contínuo.....2925
Determinação das propriedades físicas e porosidade da madeira de Picea abies (L.) Karst por método de vácuo intermitente e contínuo.....2936
Dimensionamento de programa de secagem para a madeira de paraju (Calophyllum sp.)..2946
Discriminação de madeiras Amazônicas por sensor NIR portátil.....2956
Distribuição longitudinal da densidade básica da madeira de Pinus spp. em dois espaçamentos de plantio.....2967
Efeito da densificação termomecânica na molhabilidade da superfície da madeira de Paulownia fortunei.....2978
Efeito da densificação termomecânica nos parâmetros colorimétricos da madeira de Paulownia fortunei.....2986
Efeito da poliploidia sobre a densidade básica e a composição química da madeira de Eucalyptus urophylla.....2993
Efeito da temperatura de modificação térmica em propriedades do alburno de Tectona grandis 3003
Efeito da temperatura de pirólise nas propriedades do biochar de eucalipto para condicionamento de solo.....3013
EFEITO DE AMBIENTES CONTRASTANTES NAS CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS DA MADEIRA EM ESPÉCIES DE Corymbia.....3025
Efeito de soluções salinas na retratibilidade da madeira de Pinus taeda.....3036
Efeito do lixamento na rugosidade superficial em peças de madeiras comerciais.....3047
Efeito do peneiramento na determinação do teor de extrativos da madeira de Eucalyptus. 3055
Efeitos do Cancro nas Propriedades Físicas e Mecânicas da Madeira de Khaya ivorensis. 3064
Eficiência do Cellpose na automatização da análise de vasos em clones de Eucalyptus grandis × urophylla.....3072
Elementos de tubo crivado do floema secundário em espécies amazônicas: uma análise anatômica e comparativa.....3083
Equivalência Entre Ensaios de Impacto na Flexão e Flexão Estática Para Determinação da Tenacidade.....3090

Estimativa da densidade básica da madeira de Eucalyptus utilizando espectroscopia NIR de bancada e portátil.....3100
Estimativa da umidade de toras de Eucalyptus sp. em campo a partir de espectrômetros no nir portáteis.....3109
Estimativa do teor de carbono fixo do carvão vegetal de Eucalyptus utilizando espectroscopia NIR.....3121
Estimativa do teor de extrativos de madeiras nativas reflorestadas por espectroscopia no infravermelho próximo.....3129
Estoque energético da biomassa em áreas de caatinga sob manejo florestal sustentável….3139
Estrutura anatômica qualitativa e variação longitudinal das dimensões das fibras da madeira de clones de Eucalyptus urophylla e suas implicações para a qualidade tecnológica.....3150
Estudo do comportamento físico de quatro espécies comerciais de madeira.....3159
Evidências de ocorrência de slip planes em fibras de mudas de Eucalyptus camaldulensis sob estresse hídrico.....3169
Extrativos da madeira de Pinus, Eucalyptus e Corymbia em acetona utilizando diferentes métodos.....3179
Extrativos da madeira e da casca de Eucalyptus e Corymbia em diferentes idades utilizando solvente acetona pura.....3187
Extrativos da madeira e da casca de Eucalyptus e Corymbia utilizando diferentes métodos de pesagem.....3195
Fibras, Densidade e Retratibilidade da Madeira de Hymenaea courbaril L. em Plantio na Amazônia Central.....3206
Fluorescência da lignina em madeira de Eucalyptus urophylla sob diferentes climas.....3216
Frações e assinatura pirolítica da lignina no cerne e alburno de clones jovens de Eucalyptus cultivados em sítios com condições climáticas contrastantes.....3226
Identificação de espécies nativas reflorestadas da Mata Atlântica utilizando espectroscopia NIR e análise discriminante PLS-DA.....3236
Impermeabilização da madeira de Simarouba amara Aubl. (marupá): avaliação de produtos no sudeste do Pará.....3245
Índices de qualidade das fibras da madeira de Paulownia fortunei var. Mikado para produção de celulose e papel.....3256
Influência da composição química estrutural no poder calorífico de madeiras nativas da Mata Atlântica em restauração.....3267

Influência da face de ensaio no Módulo de Elasticidade de lamelas de Pinus sp. em flexão a quatro pontos..... 3275
Influência da intensidade de tosta em dornas de Amburana cearensis no perfil sensorial da bebida armazenada..... 3285
Influência da luz nas propriedades da madeira em enriquecimento de floresta secundária na Amazônia Central..... 3295
Influência da temperatura de pirólise nas propriedades de biochar de resíduo de eucalipto 3305
Influência das características anatômicas na propagação de ondas ultrassônicas em sete madeiras brasileiras..... 3315
Influência de soluções salinas na retratibilidade da madeira de híbrido de Eucalyptus gradis GPC 23..... 3328
Influência do clone e da posição radial em propriedades da madeira de cerne de Tectona grandis..... 3338
Influência do lenho de reação nas propriedades físicas e anatômicas da madeira de Eucalyptus pellita (F.Muell.)..... 3350
Influência do material genético na variação longitudinal da densidade básica da madeira de clones de Pinus taeda L..... 3359
Influência do tanino aniônico nos índices de tração e arrebentamento de papéis kraftliner 3367
Influência do teor de umidade na formação e durabilidade de pellets de lodo de ETE de indústria de celulose..... 3377
Mapeamento da distribuição da celulose na parede celular de Corymbia citriodora por microscopia confocal Raman..... 3387
Materiais de origem renovável para reforço de papéis para embalagem: comparação entre tanino in natura e celulose microfibrilada..... 3397
Nir Connect: uma plataforma para construção de modelos NIR - case para densidade básica da madeira..... 3408
Pirólise do bagaço de cana: estabilidade estrutural e estocagem de carbono do biochar..... 3417
Plasticidade anatômica dos vasos e segurança hidráulica de clones de Eucalyptus cultivados em ambientes contrastantes..... 3429
Potencial anatômico de Brosimum rubescens para instrumentos musicais de corda..... 3440
Potencial Antifúngico do Extrato da Madeira de Mimosa tenuiflora frente à Cepa de Candida albicans..... 3451

Potencial físico-estrutural da associação entre biochar e esterco bovino para condicionador de solo..... 3460
Predição da densidade básica da madeira de Eucalyptus por variáveis resistográficas e dendrométricas.....3470
Predição do Teor e da Relação S/G da Lignina por Espectroscopia de Infravermelho Próximo (NIR).....3480
Processo de secagem de madeiras ao ar livre em Curuá-PA.....3491
Produção de polpa celulósica artesanal a partir de resíduo lignocelulósico.....3499
Produção e caracterização de biocarvões da biomassa residual de seringueira para incorporação de fertilizantes..... 3509
Propriedades da madeira de Cenostigma tocantinum Ducke. na FLONATA associadas ao uso tradicional indígena..... 3519
Propriedades física e descrição anatômica macroscópica da madeira de Protium heptaphyllum (Aubl.) Marchand..... 3527
Propriedades Físicas da Madeira de Hevea Brasiliensis de Diferentes Clones em Sistema Consorciado com Cacau.....3537
Propriedades físicas e mecânicas da madeira de Liquidambar styraciflua L. aos 24 anos. .3546
Propriedades físico-químicas e comportamento termogravimétrico de resíduos madeireiros provenientes de área de manejo florestal na Amazônia.....3557
Propriedades Mecânicas da Madeira de Hevea Brasiliensis de Diferentes Clones em Sistema Consorciado com Cacau.....3567
QUALIDADE DA MADEIRA E O IMPACTO NA PRODUÇÃO DE POLPA KRAFT..3578
Qualidade do carvão vegetal de raízes e galhos de eucalipto sob diferentes temperaturas de carbonização.....3590
Qualificação dos extrativos da madeira de Eucalyptus, Corymbia e Pinus extraídos em solvente acetona..... 3600
Rachaduras e perdas de rendimento em madeiras de Eucalyptus benthamii, Eucalyptus dunnii e Eucalyptus grandis.....3610
Recuperação e reuso de solvente na análise de extrativos da madeira de eucalipto.....3620
Relação entre a proporção de cerne e variáveis dendrométricas e tecnológicas em árvores jovens de eucalipto..... 3629
Relações entre o ângulo microfibrilar e as contrações lineares de Pinus ayacahuite Ehrenb. 3639

Resistência ao cisalhamento de linhas de cola em painéis colados lateralmente (EGP) de Cupressus lusitânica.....3649
Rotas de valorização para resíduos madeireiros da arborização urbana.....3659
Secagem ao ar livre de madeira serrada de Pinus sp. durante o outono em Santa Maria, Rio Grande do Sul.....3669
Temperatura e tempo de pirólise influenciam as razões molares de biochar de casca de arroz 3679
Umidade de equilíbrio de madeiras tropicais: densidade básica e equação de Simpson.....3689
Uso da madeira da Bauhinia forficata como matriz para biomonitoramento de metais pesados 3699
Uso da madeira da Clitoria fairchildiana como matriz para biomonitoramento de metais pesados.....3709
Uso de imagens para determinação da qualidade da superfície da madeira.....3719
Utilização de estufa solar para secagem da madeira de Acacia mangium Willd.....3729
Variação anatômica dos elementos de vaso em espécies nativas da Mata Atlântica de reflorestamento comercial.....3740
Variação axial da densidade básica em clones de Eucalyptus spp. para produção de carvão vegetal.....3748
Variação da densidade básica da madeira de Ochroma pyramidale em plantio de restauração na Amazônia.....3755
Variação e predição da densidade básica de Eucalyptus em diferentes sistemas silviculturais por espectroscopia NIR.....3766
Variação longitudinal da densidade básica da madeira de cinco espécies nativas da Mata Atlântica cultivadas em reflorestamentos.....3776
Variação longitudinal da densidade básica e da relação cerne/alburno em clones de Eucalyptus urophylla: implicações para o aproveitamento industrial.....3786
Variação longitudinal da velocidade de propagação de ondas em clones de Eucalyptus spp. 3796
VARIAÇÃO LONGITUDINAL, RADIAL E EFEITO DA CLASSE DIAMÉTRICA NA DENSIDADE BÁSICA DA MADEIRA DE Eucalyptus cloeziana.....3807
Variação na densidade básica da madeira de espécies de manguezal da costa amazônica brasileira.....3818
Variação radial das propriedades anatômicas da madeira de Calophyllum brasiliense proveniente de plantio comercial.....3826

Variação radial e longitudinal das propriedades físicas da madeira de Carapa guianensis Aubl.....3837
Variações na morfologia das fibras da madeira de clones de Eucalyptus.....3847

BIOENERGIA

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

A temperatura de coleta e o sistema de carbonização determinam a composição química do licor pirolenhoso de eucalipto

Joana D'arc Rocha de Oliveira[1]; Talita Baldin[2]; Leandro Silva de Oliveira[1]; Thalyta Fernandes Godinho[3]; Carine Setter[2], Cristiane Pedrazzi[2], Giovani Mateus Wermeier Weber[2]

[1] Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG
[2] Universidade Federal de Santa Maria - UFSM
[3] Vallourec Florestal

Resumo: O licor pirolenhoso destaca-se como bioproduto promissor para a agricultura sustentável. Este estudo objetivou avaliar a influência da temperatura de coleta e do sistema de carbonização sobre a composição química orgânica e inorgânica do licor pirolenhoso de eucalipto. As amostras foram coletadas em faixas térmicas específicas t1 (60–170°C), t2 (171–270°C), t3 (271–350°C) e t4 (351–400°C) do sistema Fornos-fornalha e t5 (120–460°C) do reator vertical Carboval foram analisados por cromatografia gasosa acoplada à espectrometria de massas (CG-EM) e espectrometria de emissão óptica com plasma indutivamente acoplado (ICP-OES). Os fenólicos siringol e catecol, o ácido acético e isômeros de glicose foram predominantes no perfil orgânico. As frações provenientes do sistema Fornos-fornalha apresentaram maiores concentrações de ferro, zinco, cálcio, magnésio e enxofre. Em contraste, a fração t5 (120–460 °C) proveniente do reator Carboval apresentou maior teor de carbono e menor carga metálica, sem detecção de ferro e zinco. Os resultados fornecem subsídios para a determinação das condições térmicas de pirólise que maximizam a qualidade do licor pirolenhoso destinado ao uso agrícola. Conclui-se que a temperatura de coleta e o sistema de carbonização são fatores determinantes da composição química do licor pirolenhoso, evidenciando a necessidade de caracterização prévia do bioproduto para garantir sua aplicação agronômica de forma segura e eficiente.

Palavras-chave: Vinagre de madeira; Composição química; Carbonização; Pirólise de biomassa.

Collection temperature range and carbonization system determine the chemical composition of eucalyptus pyroligneous liquor for agricultural applications

Abstract: Pyroligneous liquor has emerged as a promising bioproduct for sustainable agriculture. This study aimed to evaluate the influence of collection temperature and carbonization system on the organic and inorganic chemical composition of eucalyptus pyroligneous liquor. Samples were collected at specific temperature ranges: t1 (60–170 °C), t2 (171–270 °C), t3 (271–350 °C), and t4 (351–400 °C) from the kiln-furnace system, and t5 (120–460 °C) from the vertical Carboval reactor. The samples were analyzed by gas chromatography–mass spectrometry (GC–MS) and inductively coupled plasma optical emission spectrometry (ICP–OES). Syringol, catechol, acetic acid, and glucose isomers were the predominant compounds in the organic fraction. Fractions obtained from the kiln-furnace system exhibited higher concentrations of iron, zinc, calcium, magnesium, and sulfur. In contrast, the t5 fraction (120–460 °C) obtained from the Carboval reactor showed a higher

carbon content and a lower metal load, with no detectable iron or zinc. These findings provide a basis for identifying the pyrolysis conditions that optimize the quality of pyroligneous liquor for agricultural applications. It is concluded that collection temperature and carbonization system are key determinants of the chemical composition of pyroligneous liquor, highlighting the need for prior characterization of the bioproduct to ensure its safe and efficient agronomic application.

Keywords: Wood vinegar; Chemical composition; Carbonization; Biomass pyrolysis.

1. Introdução

A produção de carvão vegetal constitui uma importante cadeia da bioeconomia florestal, porém gera diferentes coprodutos líquidos e gasosos que ainda são subutilizados. Entre esses coprodutos, destaca-se o licor pirolenhoso (LP), também referido como vinagre de madeira, ácido pirolenhoso ou extrato pirolenhoso. Nas últimas décadas, esse material tem despertado interesse crescente em função do seu potencial de valorização de resíduos e da sua aplicação como bioproduto em sistemas agrícolas mais sustentáveis (Grewal et al., 2018; Ouattara et al., 2023).

Do ponto de vista químico, o licor pirolenhoso apresenta composição complexa e variável, influenciada principalmente pela matéria-prima, pelas condições de pirólise e pelo fracionamento do condensado. Essa variabilidade determina propriedades como acidez, atividade antimicrobiana, potencial bioestimulante e disponibilidade de nutrientes, dificultando a extrapolação de resultados obtidos com diferentes matérias-primas e processos de produção e reforçando a necessidade de caracterização química detalhada para cada bioproduto.

Embora a fração orgânica seja amplamente discutida na literatura, a fração inorgânica também possui relevância agronômica, pois, mesmo representando pequena parcela da massa total do licor pirolenhoso, contém macro e micronutrientes que podem influenciar a dinâmica de nutrientes no solo, o desenvolvimento das culturas e atuar como indicadora da origem da biomassa e das condições de pirólise empregadas (Ouattara et al., 2023; Hashemi, 2025).

A temperatura de pirólise é considerada um dos principais fatores responsáveis pelas alterações químicas do licor pirolenhoso, promovendo modificações na degradação térmica da celulose, hemiceluloses e lignina, refletindo diretamente na formação de ácidos orgânicos, compostos fenólicos, aldeídos, cetonas e outros metabólitos condensáveis (Zhang et al., 2019). Além da temperatura, o tipo de sistema de carbonização também influencia a composição do condensado, uma vez que diferenças na transferência de calor, disponibilidade de oxigênio e dinâmica de condensação modificam a formação e recuperação dos compostos químicos.

Apesar do crescente número de estudos demonstrando efeitos positivos do LP na agricultura, os resultados permanecem inconsistentes entre diferentes experimentos. Enquanto alguns autores observaram incrementos na produtividade vegetal e na atividade microbiológica do solo (Akley et al., 2023; Paneque et al., 2025), outros relatam respostas dependentes da concentração aplicada, da matéria-prima e das condições de produção do licor (Fedeli et al., 2022). Ainda são escassos estudos que comparem sistematicamente a composição química de licores sob diferentes condições térmicas de carbonização utilizando um mesmo material lignocelulósico, especialmente considerando simultaneamente as frações orgânica e inorgânica.

Nesse cenário, investigar a composição química — com ênfase também em constituintes inorgânicos — e relacioná-la ao comportamento agronômico é etapa estratégica para consolidar recomendações técnicas seguras e eficientes. Diante desse contexto, o presente estudo teve como objetivo caracterizar a composição química orgânica e inorgânica do licor pirolenhoso obtido em diferentes faixas de temperatura durante a produção de carvão vegetal. Para isso, foram comparados dois sistemas de carbonização: o sistema forno-fornalha, caracterizado por aquecimento progressivo durante o processo, e o reator Carboval, operando em sistema fechado e sem entrada de oxigênio.

2. Material e métodos

As amostras foram obtidas durante a carbonização de biomassa de madeira de eucalipto para produção de carvão vegetal, no sistema Fornos-fornalha, constituído de 4 fornos de alvenaria interligados a uma fornalha e um condensador acoplado, para recuperação dos gases, e em sistema fechado reator Carboval, constituído em uma plataforma vertical retroalimentada pelo calor gerado na pirólise, na ausência de oxigênio.

Os tratamentos corresponderam às frações de temperatura de coleta do licor pirolenhoso: sistema Fornos-fornalha t1 (60–170°C), t2 (171–270°C), t3 (271–350°C), t4 (351–400°C) e reator Carboval t5 (120–460°C), representando, respectivamente, condensados de faixas térmicas específicas de uma única carbonização nos fornos e o condensado integral da carbonização no Carboval.

A composição química orgânica foi determinada por cromatografia gasosa e espectrometria de massa (CG-EM) Agilent Technologies (GC 7890A), a fim de obter a concentração dos compostos bioativos principais. A composição elementar foi determinada por espectrometria de emissão óptica com plasma indutivamente acoplado (ICP-OES). Foram quantificados, em duplicata, os compostos inorgânicos alumínio (Al), boro (B), cálcio (Ca),

cobre (Cu), ferro (Fe), potássio (K), magnésio (Mg), sódio (Na), fósforo (P), enxofre (S) e zinco (Zn), além dos elementos carbono (C), hidrogênio (H) e nitrogênio (N). Os resultados foram expressos em ppm ou em % (m/m), considerando-se 1% = 10,000 ppm. Foram adotados os limites instrumentais LD = 0,01 ppm e LQ = 0,10 ppm.

Os dados foram processados no R (Core Team, 2024). As análises incluíram as faixas de térmicas em dois sistemas (Fornos-fornalha e reator Carboval) e as composições química orgânica e inorgânica, resultando na análise comportamental orgânica e estatística descritiva da composição inorgânica constando média (M), desvio-padrão (SD), coeficiente de variação (CV). Foram removidas as variáveis nulas antes da construção de gráficos exploratórios.

3. Resultados e discussão

A Figura 1 apresenta os principais compostos orgânicos identificados nos licores pirolenhosos por CG-EM, com predominância de ácido acético, catecol, isômeros de glicose e siringol.

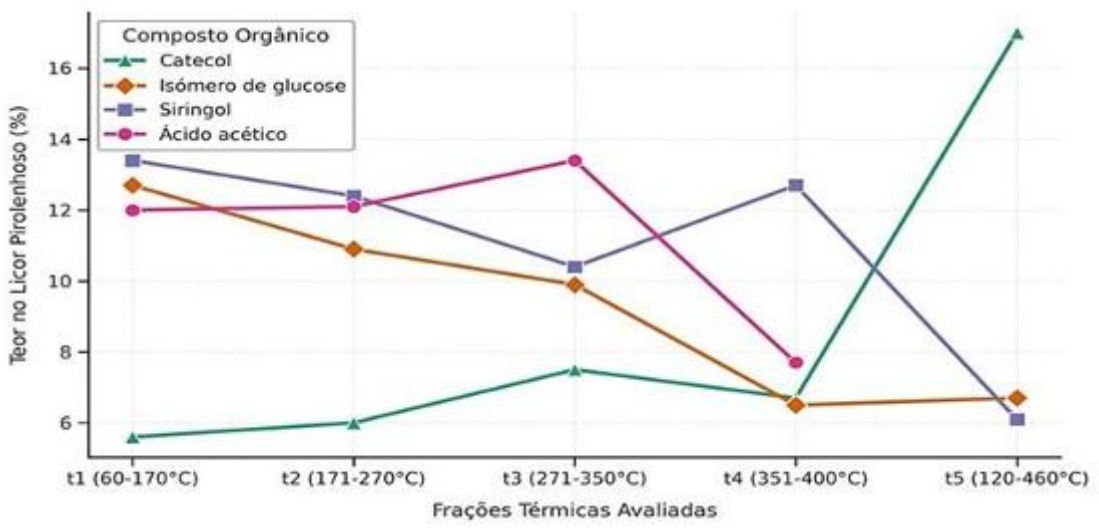


Figura 1 – Evolução térmica dos principais compostos bioativos nos licores pirolenhosos.

Os compostos fenólicos, como o siringol, predominam em todas as frações, com picos em t1 (60–170 °C) de 13,4% e t4 (351–400 °C) de 12,7%, indicando a degradação da lignina e seu alto valor bioativo. Os ácidos carboxílicos, liderados pelo ácido acético, atingem o máximo em t3 (271–350 °C) apresentando 13,4% devido à decomposição da hemicelulose e celulose, mas diminuem em temperaturas mais altas t4 (351–400°C), resultando em 7,7% devido à sua transformação. Já os carboidratos, como o isômero da glicose, são mais abundantes em baixas

temperaturas em t1 (60–170°C), 12,3% e mostram queda progressiva conforme a temperatura aumenta para t4 (351–400°C) 6,3%, refletindo a pirólise da celulose.

O tipo de processo de carbonização e a matéria-prima interferem na qualidade dos licores. Além disso, de acordo com Silvério *et al.* (2008) taxas de aquecimento lentas permitem que os materiais iniciais da pirólise da madeira de eucalipto, tenham mais tempo para reagir entre si ou com materiais em diferente estágio de pirólise, como hemiceluloses, celuloses e ligninas degradadas, o que pode influenciar a complexidade dos produtos finais. Isso explica, porque diferentes faixas de uma mesma carbonização, diferiram da composição do LP coletado da carbonização contínua t5 (120–460°C), principalmente a ausência de ácidos carboxílicos, como o ácido acético.

Compostos fenólicos são os principais responsáveis pela eficácia do produto em aplicações agrícolas. Gama *et al.* (2024) relataram mecanismos com atividades antibacteriana e antifúngica relacionada a altos teores de guaiacol, fenol, cresóis e furfural, em licor de *Eucalyptus urograndis* obtido sob pirólise lenta a 1,25°C/min até 450°C.

A segmentação do licor pirolenhoso proveniente do sistema Fornos-fornalha em frações nas faixas térmicas t1 (60–170 °C), t2 (171–270°C), t3 (271–350°C) e t4 (351–400°C) em comparação com a fração do sistema reator Carboval de integração contínua t5 (120–460°C) revelam que a aplicabilidade agronômica deste coproduto está intrinsecamente ligada à sua composição química. A Tabela 1 correlaciona as frações nas faixas térmicas avaliadas, os seus compostos marcadores, os mecanismos biológicos de atuação e o suporte da literatura científica para cada modalidade de uso indicado.

Tabela 1 - Correlação entre as frações térmicas do licor pirolenhoso, principais compostos ativos, mecanismos de ação e aplicações agrícolas referenciadas na literatura

Licor pirolenhoso	**Bioativos**	**Mecanismo de ação**	**Efeitos**	**Autoria**
Ação herbicida e no pH t1 (60–170 °C) e t2 (171–270°C)	ácido acético, ácido 4-hidroxibutânico	Dissolução de ceras, rompimento de membranas por acidez e desidratação celular.	Potencialização de caldas de defensivos e herbicidas em soja e arroz; uso dessecante natural	Lima *et al.*, 2026; Pereira *et al.*, 2022
Atividade antimicrobiana, fungicida e	siringol, catecol, guaiacol e	Penetração de fenóis em patógenos,	Inibição do crescimento micelial de fungos	Simiyu *et al.*, 2024;

repelente t3 (271–350°C) e t4 (351–400°C)	cresóis	extravasando eletrólitos intracelulares com inativação enzimática	fitopatógenos; ação repelente contra insetos e nematicida de solo	Ray *et al.*, 2022
Indução de resistência e bioestimulação t5 (120–460°C)	catecol, ácidos palmítico, esteárico e oleico	Polifenóis ativam a rota do ácido salicílico (SAR). Ácidos gordos mimetizam estímulos hormonais (auxin-like)	Promoção do crescimento radicular, aumento da tolerância a stresses abióticos (salinidade e seca) e ativação de defesas antioxidantes	Feng *et al.*, 2026; Fedeli *et al.*, 2024

Os resultados de ICP-OES evidenciaram variação composicional mineral entre as frações amostrais das faixas térmicas t1 (60–170°C), t2 (171–270°C), t3 (271–350°C), t4 (351–400°C) na mesma carbonização no sistema Fornos-fornalha, e fração da faixa térmica t5 (120–460°C) no reator Carboval de ciclo contínuo, com diferenças marcantes sobretudo para Fe, Zn, Ca, Mg, Na, S e C (Figura 2). Em todas as faixas térmicas, inclusive no licor pirolenhoso proveniente do reator Carboval, apresentam CV abaixo de 10% revelando boa acurácia dos dados. Os compostos inorgânicos Cu, B e P foram excluídos por estarem abaixo do limite de detecção em todas as amostras, permanecendo ausentes nas faixas térmicas.

Amostras com maior conteúdo mineral podem contribuir mais diretamente para a dinâmica de nutrientes e para interações iônicas no sistema solo-planta podendo elevar o fósforo utilizável Grewal *et al.* (2018). Por exemplo, melhoria da nutrição vegetal ao aumentar a disponibilidade e a absorção de nutrientes, inclusive liberando fósforo retido no solo, especialmente em solos calcários de acordo com Akley *et al.* (2023). Esses achados corroboram a literatura ao mostrar que a composição do LP não é fixa e depende da matéria-prima e do processo de obtenção, ou seja, recomenda-se a caracterização por coleta de LP, para uma interpretação agronômica consistente em seu uso indicado (Ouattara *et al.*, 2023).

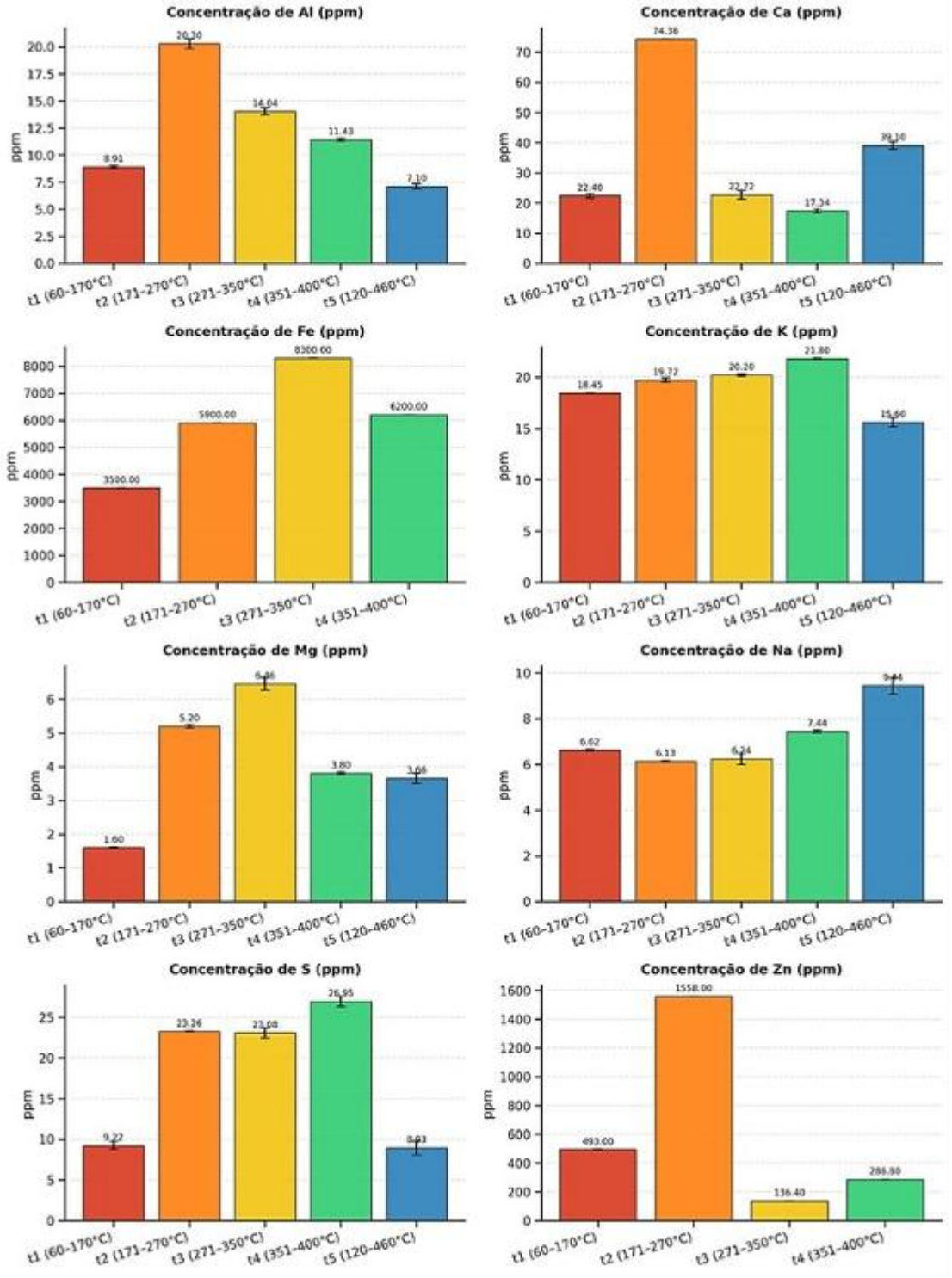


Figura 2 - Distribuição de compostos inorgânicos nas faixas térmicas avaliadas

Diferenças na distribuição dos compostos orgânicos e nas concentrações, em partes por milhão (ppm), dos elementos inorgânicos Al, Ca, Fe, K, Mg, Na e Zn foram observadas entre as amostras. Destacou-se a variabilidade entre Fe e Zn, evidenciando a heterogeneidade química do licor pirolenhoso em função das frações térmicas avaliadas. Esta variabilidade confirma que

a eficácia e a segurança agronômica do bioproduto dependem estritamente da sua assinatura química, rejeitando generalizações. Isso, reforça o que a literatura já aponta sobre o desempenho do LP depender fortemente da sua assinatura química e das condições térmicas de sua obtenção.

Amostras de LP, com maior fração carbonada e menor carga metálica podem apresentar comportamento distinto, potencialmente mais associado a efeitos bioestimulantes e de modulação biológica, dependendo da dose e da via de aplicação, reforçando importância da caracterização prévia observada neste estudo.

O conjunto de dados indica que o diferencial dos processos de carbonização e da tecnologia entre os sistemas de produção de carvão vegetal, pode influenciar na quantidade de hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (HPAs), essa distinção evidencia que o sistema Fornos-fornalha favorece a obtenção de frações especializadas para fins herbicidas ou defensivos, ao passo que o processo contínuo do reator Carboval consolida-se para bioestimulantes mais seguros ao solo (Figura 3).

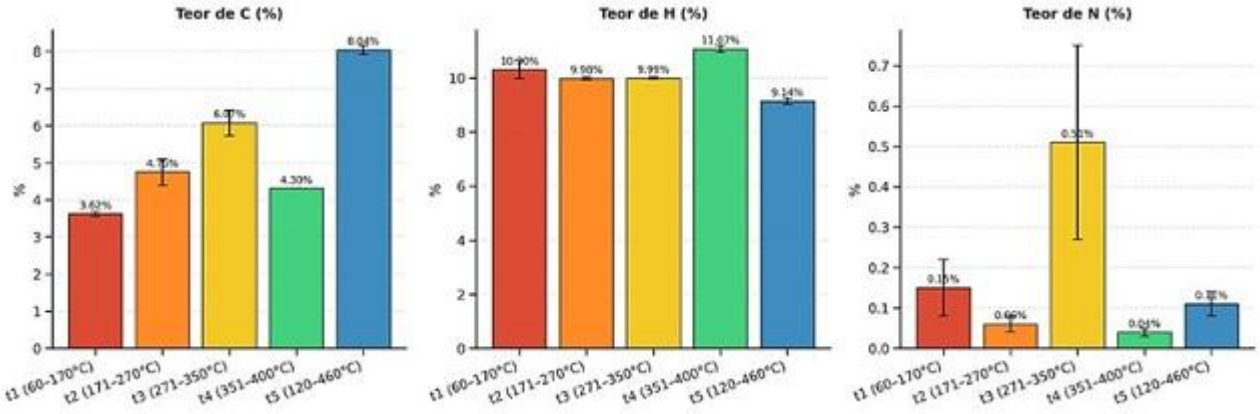


Figura 3 - Distribuição elementar C-H-N nas faixas térmicas avaliadas.

Esses padrões estão alinhados com revisões e estudos aplicados que relatam forte sensibilidade do desempenho agronômico à composição do LP, incluindo efeitos sobre solo, disponibilidade de nutrientes e produtividade em diferentes culturas (Grewal *et al.*, 2018; Hashemi, 2025; Paneque *et al.*, 2025).

Os resultados ampliam o conhecimento sobre a influência das condições de carbonização na composição química do licor pirolenhoso e fornecem informações que podem subsidiar sua padronização, agregação de valor e utilização segura como insumo agrícola.

4. Conclusões

A composição química do licor pirolenhoso é influenciada tanto pela faixa de temperatura de obtenção quanto pelo sistema de carbonização empregado, resultando em perfis químicos distintos entre as amostras. A caracterização orgânica e inorgânica evidenciou diferenças marcantes na composição e na distribuição dos compostos químicos, demonstrando elevada heterogeneidade entre os licores avaliados. Esses resultados reforçam que o uso agronômico do licor pirolenhoso deve ser precedido de caracterização química, considerando as condições de produção, especialmente a faixa térmica de carbonização e o sistema de obtenção, evitando generalizações e favorecendo recomendações técnicas mais seguras e eficientes.

5. Referências bibliográficas

Akley, E. K., Ampim, P. A. Y., Obeng, E., Sanyare, S., Yevu, M., Owusu Danquah, E., Asirifi Amoako, O., Tengey, T. K., Avedzi, J. K., Avornyo, V. K., Neindow, A. F., & Seidu, A. F. (2023). Wood Vinegar Promotes Soil Health and the Productivity of Cowpea. Agronomy, 13(10). https://doi.org/10.3390/agronomy13102497

Cardelli R, Becagli M, Marchini F, Saviozzi A. (2020) Soil biochemical activities after the application of pyroligneous acid to soil. Soil Research 58, 461–467. https://doi.org/10.1071/SR19373

Core Team (2023). Rstudio (Versão 2.4.0). https://education.rstudio.com/

Fedeli, R., Vannini, A., Guarnieri, M., Monaci, F., & Loppi, S. (2022). Bio-Based Solutions for Agriculture: Foliar Application of Wood Distillate Alone and in Combination with Other Plant-Derived Corroborants Results in Different Effects on Lettuce (*Lactuca Sativa* L.). Biology, 11(3). https://doi.org/10.3390/biology11030404

Fedeli, R., Celletti, S., & Loppi, S. (2024). Wood Distillate Promotes the Tolerance of Lettuce in Extreme Salt Stress Conditions. Plants, 13(10). https://doi.org/10.3390/plants13101335

Feng, H., Wang, X., Xiong, D., & Tian, C. (2026). Overview the Roles of Wood Vinegar in Plant Disease Resistance, Plant Growth Promotion, and Soil Improvement. Forests, 17(6). https://doi.org/10.3390/f17060637

Gama, G. S. P., Andrade, G. S., Souza, W. M. A. T., Faria, F. Y. G., Feijó, F. M. C., & Pimenta, A. S. (2024). Concentração do extrato pirolenhoso de *Eucalyptus urograndis* (clone I144), sua viabilidade e ação antimicrobiana. Agropecuária Científica no Semiárido, 20(2). https://doi.org/10.30969/acsa.v20i2.1418

Grewal, A., Abbey, L., & Gunupuru, L. R. (2018). Production, prospects and potential application of pyroligneous acid in agriculture. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 135, 152–159. https://doi.org/10.1016/j.jaap.2018.09.008

Hashemi, S.S. (2025). Effect of wood vinegar on the release of calcium, magnesium, and phosphorus from calcareous soils in different land uses. Journal Arid Land 17(5), 680–695. https://doi.org/10.1007/s40333-025-0099-2

Lima, L. J. de S., Pimenta, A. S., Miranda, N. de O., Medeiros, P. L. de, Gama, G. S. P., Santos, R. T. dos, Mascote, G. M., Azevedo, T. K. B. de, Melo, R. R. de A., & Gabriel, S. de. (2026). Combination of insecticides and bio-inputs with eucalyptus wood vinegar: effects on soybean crops. Advances in Agriculture. https://doi.org/10.1155/aia/6249170

Ouattara, H. A. A., Niamké, F., Yao, J. C. N., Amusant, N., & Garnier, B. (2023). Wood Vinegars: Production Processes, Properties, and Valorization. Forest Products Journal. 73(3), 239-252. https://doi.org/10.13073/fpj-d-23-00021

Paneque, M. E., Sánchez, O. S., Parada, M. A. P., Salgado, R. B. R., Piña, L. F., & Garcés, I. A. (2025). Ácido pirolenhoso (vinagre de madeira) como bioestimulante sustentável para o crescimento inicial do arroz (Oryza sativa L.) sob condições controladas. Revista Bionatura, 2(3). https://doi.org/10.70099/BJ/2025.02.03.3

Ray, A., Ganguly, S., & Sankar, A. (2022). Biocides through pyrolytic degradation of biomass: Potential, recent advancements and future prospects. In A. Rakshit, V. S. Meena, P. C. Abhilash, B. K. Sarma, H. B. Singh, L. Fraceto, M. Parihar, & A. K. Singh (Eds.), Advances in bio-inoculant science: Biopesticides (337–352). Woodhead Publishing. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-823355-9.00025-0

Silvério, F. O., Barbosa, L. C. A., & Piló-Veloso, D. (2008). A pirólise como técnica analítica. Química Nova, 31(6), 1543-1552. https://doi.org/10.1590/S0100-40422008000600045

Simiyu, M., Mafurah, J., Nyaanga, J., & Mwangi, E. (2024). Antifungal effect of wood vinegar from selected feedstocks on Ascochyta rabiei in vitro. African Journal of Agricultural Research, 20(3), 214-220. https://doi.org/10.5897/AJAR2023.16381

Zhang, X., Yang, W., & Chen, L. (2019). Effect of pyrolysis temperature on the characteristics of wood vinegar derived from Chinese fir waste: A comprehensive study on its growth regulation performance and mechanism. *ACS Omega, 4*(14), 21363–21370. https://doi.org/10.1021/acsomega.9b02240

Análise comparativa da qualidade do carvão vegetal para a indústria siderúrgica produzido por pequenos produtores dos municípios de Paulistas e Guanhães, Minas Gerais, Brasil

Letícia Caldeira Aguiar[1]; Caroline Junqueira Sartori[1]; Fernanda Aparecida Nazário de Carvalho[2]; Merlindo Jacinto Manjate[3]

[1] Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais *Campus* São João Evangelista (IFMG)
[2] Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" (ESALQ), Universidade de São Paulo (USP)
[3] Universidade Federal do Espírito Santo (UFES)

Resumo: O carvão vegetal desempenha papel estratégico na siderurgia brasileira, sendo amplamente utilizado como agente redutor na produção de ferro-gusa e aço. Entretanto, a produção por pequenos produtores ainda apresenta elevada variabilidade na qualidade do combustível devido ao limitado controle do processo de carbonização. Este estudo teve como objetivo comparar a qualidade física, química e energética do carvão vegetal destinado à siderurgia produzido por pequenos produtores dos municípios de Paulistas e Guanhães, Minas Gerais. O experimento foi conduzido em delineamento inteiramente casualizado, com dois tratamentos e três repetições. Foram determinados os teores de umidade, materiais voláteis, cinzas, carbono fixo, densidade a granel, densidade aparente, densidade verdadeira, porosidade e os poderes caloríficos superior, inferior e útil. As médias foram comparadas pelo teste t de de Welch ($p < 0,05$). O carvão de Guanhães apresentou maior teor de carbono fixo, menor teor de materiais voláteis, maior densidade verdadeira, maior porosidade e maiores valores de poder calorífico, indicando uma carbonização mais eficiente e maior potencial energético. O carvão de Paulistas apresentou maior densidade a granel, maior densidade aparente e menor teor de umidade. Os resultados podem subsidiar melhorias na qualidade do processo produtivo e do uso final do produto, fortalecendo a competitividade dos pequenos produtores ao indicarem que a otimização das condições de carbonização pode melhorar a qualidade do carvão vegetal.

Palavras-chave: Carbonização; Eficiência energética; Biomassa florestal.

Comparative Analysis of the Quality of Charcoal for the Steel Industry Produced by Small-Scale Producers in the Municipalities of Paulistas and Guanhães, Minas Gerais, Brazil

Abstract:
Charcoal plays a strategic role in the Brazilian steel industry, being widely used as a reducing agent in the production of pig iron and steel. However, production by small-scale producers still shows high variability in fuel quality due to limited control over the carbonization process. This study aimed to compare the physical, chemical, and energetic quality of charcoal intended for the steel industry, produced by small-scale producers in the municipalities of Paulistas and Guanhães, Minas Gerais, Brazil. The experiment was conducted in a completely randomized design with two treatments and three replicates. The following parameters were determined: moisture content, volatile matter, ash content, fixed carbon, bulk density, apparent density, true density, porosity, and higher, lower, and useful heating values. Means were compared using Welch's t-test ($p < 0.05$). Charcoal from Guanhães showed higher fixed carbon content, lower

volatile matter, higher true density, greater porosity, and higher heating values, suggesting a higher degree of carbonization and greater energy potential. In contrast, charcoal from Paulistas presented higher bulk and apparent densities and lower moisture content. The results indicate distinct material profiles associated with production conditions and/or raw materials, which may be more or less suitable depending on the intended application. These findings can support improvements in production processes and end-use performance, highlighting that optimizing carbonization conditions may enhance charcoal quality and strengthen the competitiveness of small-scale producers.

Keywords: Carbonization; Energy efficiency; Forest biomass.

1. Introdução

O carvão vegetal desempenha papel estratégico na matriz energética e na siderurgia brasileira, sendo o Brasil reconhecido como o maior produtor e consumidor mundial desse biocombustível (IBÁ (Indústria Brasileira de Árvores), 2025).utilização como agente redutor na produção de ferro-gusa e aço contribui para a substituição parcial do carvão mineral, conferindo relevância econômica e ambiental à cadeia produtiva (Costa, 2017). Nesse contexto, Minas Gerais destaca-se como o principal estado produtor e consumidor de carvão vegetal, concentrando grande parte da produção nacional e desempenhando papel fundamental no abastecimento da indústria siderúrgica (SINDIFER, 2025).

Apesar da importância do setor, a produção brasileira é predominantemente conduzida por pequenos e médios produtores, que utilizam, em sua maioria, fornos tradicionais de alvenaria e métodos empíricos para condução da carbonização (L. F. Da Silva et al., 2024). O controle de variáveis como temperatura, tempo de residência e umidade da madeira é frequentemente realizado com base na experiência do operador, o que favorece elevada variabilidade entre lotes de produção e compromete a uniformidade da qualidade do carvão vegetal (R. C. da Silva et al., 2018). Além disso, esses produtores enfrentam limitações relacionadas ao acesso a tecnologias, assistência técnica e investimentos, refletindo diretamente na eficiência produtiva e na competitividade do setor.

A qualidade do carvão vegetal está diretamente relacionada às características da matéria-prima e às condições de carbonização, influenciando propriedades físicas, químicas e energéticas essenciais para sua utilização industrial (Brito, 1993; Dufourny et al., 2019)(Brito, 1993; Dufourny et al., 2019). Dessa forma, a caracterização dessas propriedades constitui importante ferramenta para avaliar o desempenho do combustível e identificar oportunidades de melhoria no processo produtivo.

Embora Minas Gerais concentre a maior produção nacional de carvão vegetal, ainda são escassos estudos comparativos que avaliem a qualidade do carvão produzido por pequenos produtores em municípios de elevada relevância para o setor siderúrgico. Essa lacuna limita a compreensão da variabilidade existente e dificulta o direcionamento de estratégias voltadas ao aprimoramento tecnológico da produção. A escolha dos municípios de Paulistas e Guanhães, localizados na região do Vale do Rio Doce, Minas Gerais, está associada à importância dessa região na cadeia produtiva do carvão vegetal destinado à siderurgia. Dados do IBGE (2024) indicam que o Brasil produziu, em 2024, aproximadamente 5,56 milhões de toneladas de carvão vegetal, com valor superior a R$ 6,5 bilhões, sendo Minas Gerais o principal estado produtor. Destaca-se, nesse contexto, o município de Itamarandiba (MG) como o maior produtor nacional. Considerando a proximidade geográfica e a similaridade das atividades produtivas, Guanhães e Paulistas inserem-se nesse polo regional de produção.Ainda conforme estes dados, Guanhães apresenta valor de produção de aproximadamente R$ 10,56 milhões, enquanto Paulistas registra cerca de R$ 54 mil, indicando diferenças expressivas de escala produtiva dentro de uma mesma região, mas evidenciando a participação de ambos na dinâmica da cadeia do carvão vegetal.

Paralelamente, dados do Anuário Estatístico do SINDIFER (2025) indicam que a produção de ferro-gusa independente em Minas Gerais está concentrada em municípios como Sete Lagoas, Matozinhos, Curvelo e Pedro Leopoldo, além de unidades em Betim, Itabirito e Itabira. Esse cenário evidencia uma distribuição espacial entre polos produtores de carvão vegetal e centros consumidores no setor siderúrgico.Nesse contexto, destaca-se que os municípios de Paulistas e Guanhães apresentam proximidade geográfica com polos siderúrgicos relevantes, como Itabira e Itabirito, o que reforça seu potencial papel como fornecedores de carvão vegetal para essas unidades. Essa proximidade configura uma vantagem logística, podendo reduzir custos de transporte e aumentar a competitividade regional do carvão vegetal. Assim, a variabilidade na qualidade do carvão produzido por pequenos produtores pode impactar diretamente a eficiência do processo siderúrgico, reforçando a necessidade de estudos que avaliem suas propriedades e identifiquem limitações tecnológicas. Diante desse cenário, o presente estudo teve como objetivo comparar as propriedades físicas, químicas e energéticas de amostras de carvão vegetal destinadas à siderurgia, provenientes de pequenos produtores dos municípios de Paulistas e Guanhães, Minas Gerais, visando à identificação de gargalos produtivos e ao fortalecimento técnico, econômico e social da cadeia produtiva regional do carvão vegetal.

2. Material e métodos

Delineamento experimental

O experimento foi conduzido em delineamento inteiramente casualizado (DIC),constituído por dois tratamentos, correspondentes aos carvões vegetais comercializados nos municípios de Paulistas e Guanhães (MG), com três repetições por tratamento.

Caracterização do material

Foram coletadas aproximadamente 500 g de carvão vegetal de *Eucaliptus ssp*. comercializado nos municípios de Paulistas (18°25'38,68"S; 42°52'7,61"W) e Guanhães (18°46'30"S; 42°55'58"W), localizados no estado de Minas Gerais. A produção de ambos os carvões vegetais ocorre em fornos de superfície, refletindo um sistema produtivo de baixa tecnificação, no qual não há controle adequado das variáveis de carbonização, como a temperatura, o que pode resultar em maior variabilidade nas propriedades finais do material. As amostras foram submetidas à caracterização física, química e energética, visando comparar a qualidade do carvão vegetal produzido nas duas localidades. A caracterização física compreendeu a determinação do teor de umidade, das densidades a granel, aparente anidra, relativa verdadeira e da porosidade. A umidade foi determinada conforme a ASTM D1762-84 (ASTM, 2021), por secagem em estufa a 102 ± 3 °C até massa constante. A caracterização química imediata foi realizada conforme a ABNT NBR 8112 (ABNT, 1986). As amostras foram moídas em moinho Wiley, classificadas entre 40 e 60 mesh e submetidas à determinação dos teores de materiais voláteis, cinzas e carbono fixo. A densidade a granel foi obtida pela relação entre a massa do carvão e o volume ocupado em recipiente de dimensões conhecidas conforme a norma ABNT NBR 6922 (ABNT, 1981). A densidade aparente foi determinada pelo método de imersão em água, enquanto a densidade verdadeira foi obtida por picnometria, utilizando amostras previamente moídas e classificadas granulometricamente entre 200 e 270 mesh, com adaptações da ABNT NBR 9165 (ABNT, 1985). Ainda conforme adaptações da mesma norma, aporosidade foi estimada a partir da relação entre as densidades aparente e verdadeira.Todas as análises físicas foram realizadas em triplicata. A caracterização energética consistiu na determinação do poder calorífico superior (PCS) em bomba calorimétrica IKA C200, de acordo com a metodologia estabelecida pela norma DIN 14918 (2010). O poder calorífico inferior (PCI) foi estimado a partir do PCS, considerando a correção referente ao calor de vaporização da água formada durante a combustão do hidrogênio presente no combustível. Já

o poder calorífico útil (PCU) foi obtido a partir do PCI, levando-se em conta o teor de umidade das amostras, conforme relações amplamente utilizadas na literatura. As etapas e parâmetros analisados para a caracterização das amostras encontram-se detalhados na Figura 1.

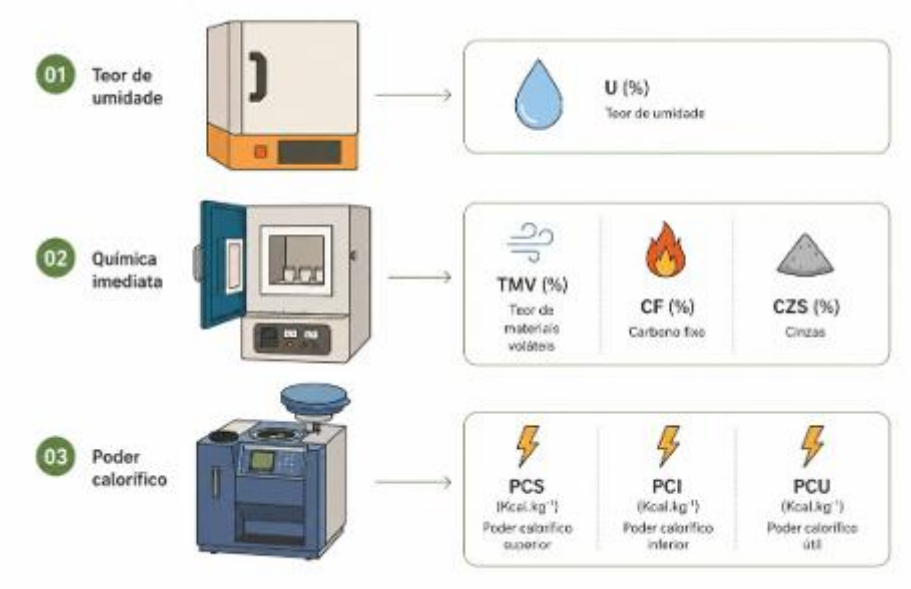


Figura 1 - Representação gráfica das etapas de caracterização física, química e energética das amostras.

Análise de dados

Os dados foram submetidos à estatística descritiva, por meio do cálculo das médias e variâncias. A dispersão dos dados foi avaliada graficamente para inspeção da variabilidade.Posteriormente, as médias das propriedades físicas, químicas e energéticas do carvão vegetal provenientes dos municípios de Paulistas e Guanhães (MG) foram comparadas por meio do teste t de Welch para duas amostras independentes, adotando-se nível de significância de 5% ($p < 0,05$). A escolha do teste de Welch deve-se à sua robustez em relação à possível heterogeneidade de variâncias, especialmente considerando o número reduzido de repetições experimentais. As análises estatísticas foram realizadas nos softwares Microsoft Excel® e Origin®.

3. Resultados e discussão

A análise do teor de umidade mostrou diferença significativa entre os carvões vegetais avaliados (Figura 2). O carvão produzido em Paulistas apresentou teor médio de umidade de 6,85%, valor inferior ao observado para o carvão proveniente de Guanhães (9,24%). Os valores de umidade relatados para carvões considerados adequados para uso metalúrgico variam

aproximadamente de 1 a 8,5%, com a maioria ficando abaixo do limite de 10% (Navarro-Martínez et al., 2025; Safarian, 2023; Sangsuk et al., 2018). Baixos teores de umidade são desejáveis, pois reduzem as perdas de energia durante a combustão, uma vez que menor quantidade de calor é consumida para a evaporação da água, aumentando a eficiência energética do combustível. Entretanto, dada a natureza higroscópica do carvão vegetal, ajustes nas condições de armazenamento podem ser um fator contribuinte para a redução dos teores de umidade, em especial para o carvão vegetal de Guanhães, que apresentou teor de umidade ligeiramente superior a faixa recomendada pela literatura.

Para a análise imediata (Figura 2), observaram-se diferenças significativas entre os carvões para materiais voláteis e carbono fixo. O carvão produzido em Paulistas apresentou teores médios de 27,77% de materiais voláteis, 0,51% de cinzas e 71,72% de carbono fixo, enquanto o carvão de Guanhães apresentou 8,16% de materiais voláteis, 0,44% de cinzas e 91,39% de carbono fixo. O teor de carbono fixo (CF), próximo de 75% para uso siderúrgico, é um importante parâmetro de qualidade do carvão vegetal. No entanto, seu aumento, associado a maiores temperaturas de carbonização, pode reduzir a resistência mecânica, propriedade essencial para sustentar as cargas nos altos-fornos. Assim, há um equilíbrio entre elevado CF e integridade estrutural, sendo a qualidade do carvão dependente da sua adequação ao uso final. Enquanto maiores teores de CF favorecem a siderurgia, materiais menos carbonizados podem ser mais adequados para energia ou uso doméstico.

O menor teor de materiais voláteis e o maior teor de carbono fixo observados no carvão de Guanhães indicam que mesmo os produtores utilizando a mesma tecnologia de carbonização, os processos produtivos são diferentes, resultando em diferenças na estabilidade térmica dos combustíveis produzidos.Assim, o carvão vegetal do produtor de Guanhães, apresenta maiortermoestabilidade, maior poder calorífico, resultando em maior tempo de combustão (Oliveira et al., 2025). Em contrapartida, o elevado teor de materiais voláteis no carvão de Paulistas sugere uma carbonização com ignição mais rápida, porém com menor rendimento energético e maior liberação de compostos voláteis durante a queima (Mencarelli et al., 2025a; Osei Bonsu et al., 2020). Os baixos teores de cinzas observados em ambas as amostras (<1%) indicam reduzido conteúdo mineral, característica desejável por minimizar a formação de resíduos e aumentar a eficiência do combustível (Mencarelli et al., 2025b; Sukarta et al., 2023). Em suma, nota-se que para ambos os produtores, as carbonizações são trabalhadas em taxas de aquecimento diferentes, resultando em tempos distintos para a fase de fixação de carbono.

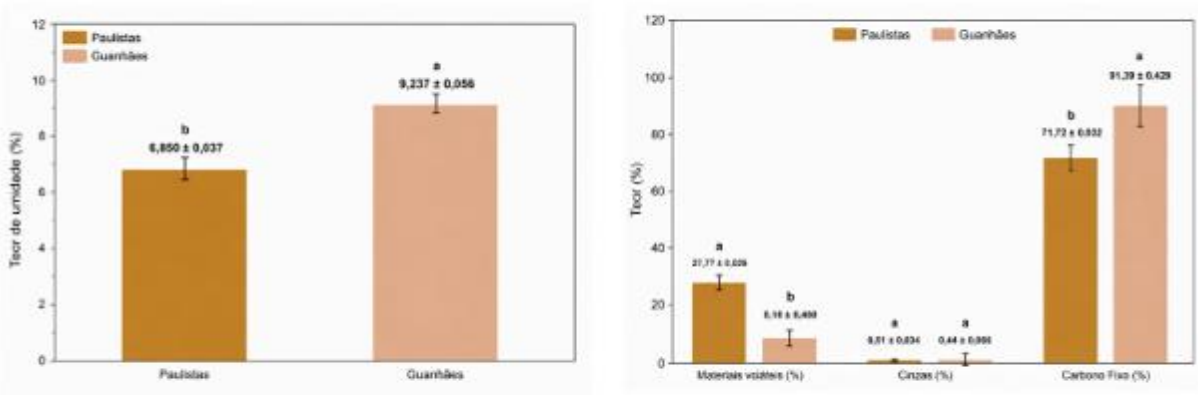


Figura 2 – Resultados para Umidade (%), Materiais voláteis (%), Cinzas (%) e Carbono fixo (%) para as duas amostras.

Os valores médios de densidade a granel, densidade aparente e densidade verdadeira dos carvões vegetais encontram-se apresentados na Figura 3. A densidade a granel foi superior para o carvão proveniente de Paulistas quando comparada ao de Guanhães, indicando maior massa de carvão por unidade de volume ocupado. Essa propriedade é influenciada pela distribuição granulométrica das partículas, pelo empacotamento do material e pela presença de espaços vazios entre as partículas, sendo um parâmetro importante para o transporte, armazenamento e rendimento volumétrico do carvão vegetal. Quanto maior a densidade do carvão vegetal, maior a capacidade de carga no alto-forno em termos de carbono por volume (Ramos et al., 2023).

A densidade aparente foi superior para o carvão proveniente de Paulistas em relação ao de Guanhães (Figura 3). Em aplicações energéticas, elevadas densidades são desejáveis por aumentarem a quantidade de massa por unidade de volume. Entretanto, o aumento da densidade aparente pode estar associado à redução da porosidade do carvão, comprometendo a difusão de gases e sua reatividade durante os processos termoquímicos (Ramos et al., 2019). Nesse contexto, o carvão de Guanhães, apesar de apresentar menor densidade aparente, exibiu maior densidade verdadeira e maior porosidade (Figuras 3). Esse comportamento é compatível com maior remoção de componentes voláteis e desenvolvimento da porosidade durante a carbonização. A maior porosidade tende a favorecer a permeabilidade aos gases e a reatividade do carvão, características desejáveis em aplicações metalúrgicas,desde que a resistência mecânica do material seja preservada.

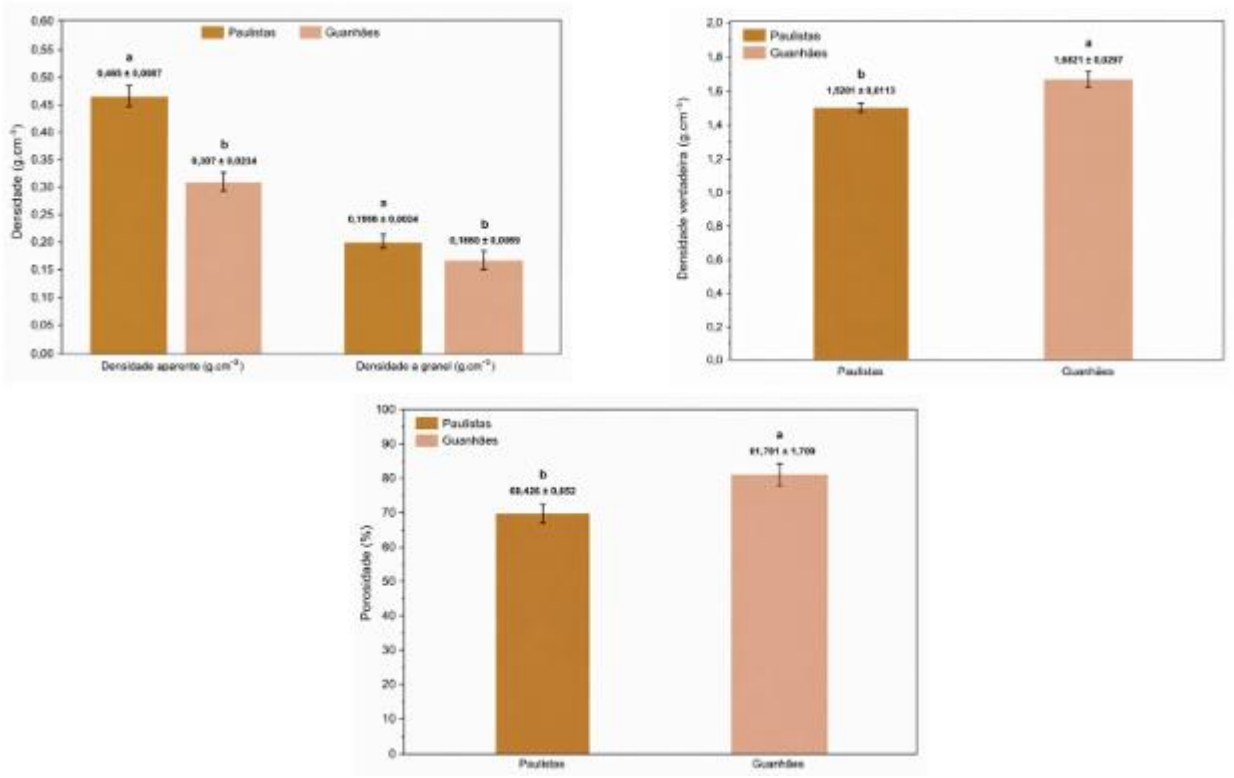


Figura 3 - Caracterização física do carvão vegetal de Paulistas e Guanhães: Valores médios de densidade aparente, densidade a granel e densidade verdadeira; Porosidade total. As barras de erro representam o desvio padrão.

Os valores de poder calorífico superior (PCS), poder calorífico inferior (PCI) e poder calorífico útil (PCU) dos carvões vegetais estão apresentados na Figura 4. O carvão proveniente de Guanhães apresentou valores superiores de PCS, PCI e PCU em comparação ao carvão de Paulistas, evidenciando maior potencial energético. Esse comportamento está coerente com o maior teor de carbono fixo e o menor teor de materiais voláteis observados na análise imediata, características associadas a um maior grau de carbonização, embora o parâmetro em questão também dependa da composição química elementar. (Cordero et al., 2001; Parikh et al., 2005). Em contrapartida, o carvão de Paulistas apresentou menores valores de poder calorífico, refletindo a menor concentração de carbono fixo e a maior presença de compostos voláteis. De modo geral, o aumento do teor de carbono fixo favorece o incremento do poder calorífico, uma vez que o carbono constitui a principal fração responsável pela liberação de energia durante a combustão (Hou et al., 2025).

Além disso, a superioridade dos valores de PCI e PCU para o carvão de Guanhães demonstra que, mesmo considerando as perdas energéticas associadas à evaporação da água e à formação de vapor durante a combustão, esse material mantém maior disponibilidade de

energia útil. Esse resultado confirma a melhor qualidade energética do carvão de Guanhães, corroborando os resultados obtidos para a análise imediata e para as propriedades físicas, que indicaram maior densidade verdadeira, maior porosidade e uma estrutura carbonosa mais desenvolvida.

Ainda assim, é importante ressaltar que para a garantia da qualidade de ambos os carvões vegetais, o controle da temperatura de carbonização é fundamental, pois influencia diretamente a liberação de materiais voláteis, o enriquecimento em carbono e o desenvolvimento da estrutura porosa do carvão. Processos sem controle tendem a gerar materiais mais heterogêneos, enquanto condições mais controladas favorecem a obtenção de carvões com propriedades energéticas mais uniformes e previsíveis.

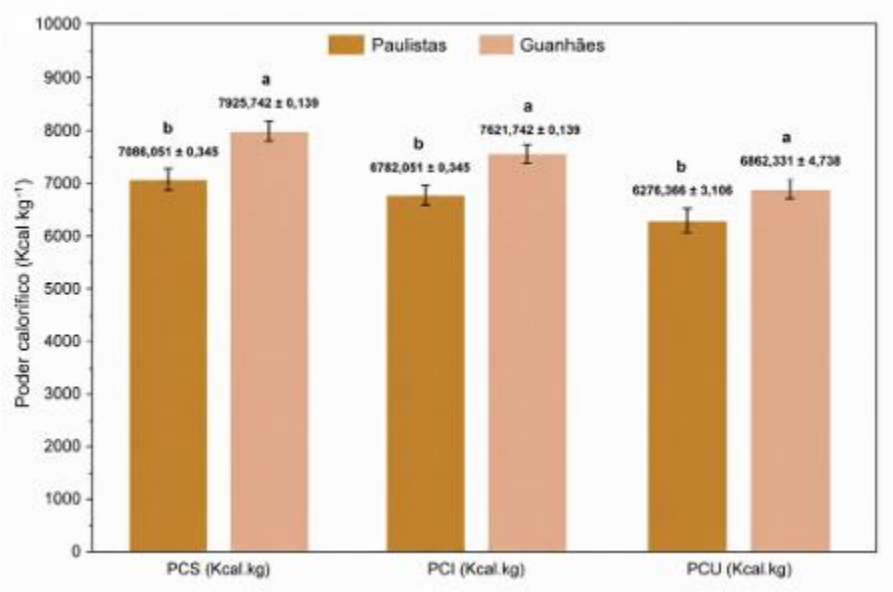


Figura 4 – Valores médios do poder calorífico superior (PCS), poder calorífico inferior (PCI) e poder calorífico útil (PCU), expressos em Kcal kg^{-1}, para o carvão vegetal de Paulistas e Guanhães.

4. Conclusões

As amostras de carvão vegetal provenientes de Paulistas e Guanhães apresentaram diferenças relevantes nas propriedades físicas, químicas e energéticas avaliadas, indicando perfis distintos de material. O carvão de Guanhães apresentou maior teor de carbono fixo, menores teores de materiais voláteis, maiores valores de poder calorífico, além de maior densidade verdadeira e porosidade, sugerindo maior grau de carbonização. Por outro lado, o carvão de Paulistas destacou-se pelo menor teor de umidade e maiores densidades a granel e

aparente. Ambos os materiais apresentaram baixos teores de cinzas e características compatíveis com o uso energético. Dessa forma, os resultados não indicam superioridade entre os materiais, mas sim diferenças associadas às condições de produção e/ou à matéria-prima utilizada. Essas variações refletem propriedades que podem ser mais ou menos adequadas a depender da aplicação pretendida, reforçando a importância do controle do processo de carbonização e da definição de critérios de qualidade alinhados ao uso final do carvão vegetal.

5. Referências bibliográficas

Brito, J. (1993). Reflexões sobre qualidade do carvão vegetal para uso siderúrgico. *Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais: Circular Técnica*, (180), 6. http://www.ipef.br/publicacoes/ctecnica/nr181.pdf

Cordero, T., Marquez, F., Rodriguez-Mirasol, J., & Rodriguez, J. J. (2001). Predicting heating values of lignocellulosics and carbonaceous materials from proximate analysis. *Fuel*, 1567–1571.

Costa, L. J. (2017). Caracterização mecãnica do carvão vegetal de clones Corymbia [Uniersidade Federal de Lavras]. In *Scientia Forestalis/Forest Sciences*. https://doi.org/10.18671/scifor.v45n116.04

Da Silva, L. F., Arantes, M. D. C., Marcelino, R. A. G., Mendes Castro, A. F. N., Ataíde, G. D. M., Castro, R. V. O., Vieira, R. da S., Carneiro, A. de C. O., De Siqueira, H. F., Protásio, T. D. P., Baraúna, E. E. P., Baldin, T., & Colen, F. (2024). Kiln-Furnace System: Validation of a Technology for Producing Charcoal with Less Environmental Impact in Brazil. *Forests*, *15*(4). https://doi.org/10.3390/f15040645

Dufourny, A., Van De Steene, L., Humbert, G., Guibal, D., Martin, L., & Blin, J. (2019). Influence of pyrolysis conditions and the nature of the wood on the quality of charcoal as a reducing agent. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, *137*, 1–13. https://doi.org/10.1016/j.jaap.2018.10.013

Hou, G., Alkhayyat, A., Almalkawi, A., Yadav, A., Shreenidhi, H. S., Saini, V., Shomurotova, S., Singh, D., Jain, V., Smerat, A., & Khalid, A. (2025). Development of robust machine learning models to estimate hydrochar higher heating value and yield based upon biomass proximate analysis. *Bioresources and Bioprocessing*, *12*(1). https://doi.org/10.1186/s40643-025-00979-1

IBÁ (Indústria Brasileira de Árvores). (2025). *Ibá: Relatório anual de 2025*.

Mencarelli, A., Greco, R., & Grigolato, S. (2025a). Can the qualitative characteristics of commercial charcoal-based products affect combustion performance during grilling? *Biomass Conversion and Biorefinery*, *15*(18), 24995–25006. https://doi.org/10.1007/s13399-025-06830-z

Navarro-Martínez, J., Ávila-Pérez, H., Borja de la Rosa, M. A. M., Gallardo-Bernal, I., Rosas-Acevedo, J. L., Bernal-Mendoza, L. I., & Guzmán-Martínez, M. (2025). Quality Assessment of Quercus scytophylla Liebm Charcoal Produced in a Metal Kiln in the Cordón Grande Ejido, Guerrero, Mexico. *Forests*, *16*(12). https://doi.org/10.3390/f16121877

Oliveira, T. R., da Silva, Á. M., Cupertino, G. F. M., Delatorre, F. M., Amorim, G. A., de Souza, M. P., Brito, J. O., & Dias Júnior, A. F. (2025). Influence of Pyrolysis Temperature on Critical Variables Related to Charcoal Spontaneous Combustion. *Bioresources and Bioproducts*, *1*(2), 6. https://doi.org/10.3390/bioresourbioprod1020006

Osei Bonsu, B., Takase, M., & Mantey, J. (2020). Preparation of charcoal briquette from palm kernel shells: case study in Ghana. *Heliyon*, *6*(10). https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e05266

Parikh, J., Channiwala, S. A., & Ghosal, G. K. (2005). A correlation for calculating HHV from proximate analysis of solid fuels. *Fuel*, *84*(5), 487–494. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2004.10.010

Ramos, D. C., Carneiro, A. de C. O., de Siqueira, H. F., Oliveira, A. C., & Pereira, B. L. C. (2023). Wood and charcoal quality of four Eucalyptus clones at 108 and 120 months. *Ciencia Florestal*, *33*(1). https://doi.org/10.5902/1980509848302

Safarian, S. (2023). To what extent could biochar replace coal and coke in steel industries? In *Fuel* (Vol. 339). Elsevier Ltd. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2023.127401

Sangsuk, S., Suebsiri, S., & Puakhom, P. (2018). The metal kiln with heat distribution pipes for high quality charcoal and wood vinegar production. *Energy for Sustainable Development*, *47*, 149–157. https://doi.org/10.1016/j.esd.2018.10.002

Silva, R. C. da, Marchesan, R., Fonseca, M. R., Dias, A. C. C., & Viana, L. C. (2018). Influência da temperatura final de carbonização nas características do carvão vegetal de espécies tropicais. *Pesquisa Florestal Brasileira*, *38*. https://doi.org/10.4336/2018.pfb.38e201801573

SINDIFER. (2025). *Anuário estatístico de Produção de ferro-gusa em Minas Gerais e no Brasil*.

Sukarta, I. N., Sastrawidana, I. D. K., & Suyasa, I. W. B. (2023). Proximate Analysis and Calorific Value of Fuel Briquettes from Wood and Coffee Skins Biomass as a Renewable Energy Source. *Ecological Engineering and Environmental Technology*, *24*(8), 291–298. https://doi.org/10.12912/27197050/172506

Avaliação da Resistência Mecânica de Briquetes Autorredutores de Finos de Minério de Manganês e Carvão Vegetal

Gustavo Augusto Senna do Nascimento [a], Gabriel Pereira Chediak [a], Pedro Venâncio Wate [a], Thiago de Paula Protásio [a], Tiago José Pires de Oliveira [b*]

[a] Universidade Federal de Lavras, Departamento de Ciências Florestais, CEP 37200-000, Lavras, Minas Gerais, Brasil.
[b] Universidade Federal de Lavras, Departamento de Engenharia Química e de Materiais, 37200-000, Lavras, Minas Gerais, Brasil.

Resumo: A geração de finos de minério de manganês e carvão vegetal representa um desafio para a indústria de ferroligas, devido às limitações de seu aproveitamento em processos convencionais. Este trabalho avaliou a produção e a caracterização de briquetes autorredutores utilizando finos de minério de manganês, finos de carvão vegetal e farinha de trigo como ligante. Foram realizadas análises granulométrica, elementar, química imediata e determinação do poder calorífico superior do carvão vegetal, além de ensaios de densidade a granel, resistência à compressão, impacto e abrasão dos briquetes. O carvão vegetal apresentou elevado teor de carbono fixo (67,59%) e poder calorífico superior de 26,93 MJ/kg, demonstrando potencial para aplicação como agente redutor. Os briquetes apresentaram resistência média à compressão de 637,74 ± 66,47 N. Entretanto, nos ensaios de impacto (Drop Test) e abrasão (Tumbler Test), ocorreu a destruição completa das amostras, evidenciando limitações quanto à resistência mecânica dinâmica e indicando a necessidade de otimização da formulação e do processo de briquetagem.

Palavras-chave: Metalurgia sustentável; Densificação; Caracterização mecânica

1. Introdução

O setor de ferroligas no Brasil, atualmente principal destino do minério de manganês extraído constitui um segmento estratégico para a indústria metalúrgica, sendo responsável pelo fornecimento de insumos essenciais para a produção de aço e outras ligas metálicas. De acordo com a Associação Brasileira dos Produtores de Ferroligas e de Silício Metálico, o setor movimentou R$ 10,9 bilhões em 2024 e apresentou crescimento médio anual de 12% entre

2013 e 2024. No mesmo período, a produção nacional alcançou 1,022 milhão de toneladas, consolidando a competitividade brasileira no mercado internacional. Minas Gerais destaca-se como um dos principais polos produtores, concentrando importantes unidades industriais nos municípios de Ouro Preto, Barbacena, Jeceaba e Sete Lagoas.

Além dos finos de carvão vegetal, o beneficiamento do minério de manganês também gera quantidades expressivas de partículas finas. Contudo, a reduzida granulometria desses resíduos limita seu aproveitamento industrial, resultando frequentemente em seu descarte ou armazenamento em barragens de rejeitos (MU et al., 2024). Nesse cenário, a briquetagem apresenta-se como uma alternativa tecnológica para o reaproveitamento simultâneo dos finos de minério de manganês e de carvão vegetal, promovendo maior aproveitamento de resíduos, redução de impactos ambientais e melhoria da eficiência dos processos metalúrgicos.

Os briquetes autorredutores são aglomerados constituídos por partículas de minério e agente redutor compactadas em uma única matriz. Durante o aquecimento, o carbono presente no briquete reage formando monóxido de carbono (CO), responsável pela redução indireta dos óxidos metálicos, enquanto parte da redução também pode ocorrer pelo contato direto entre o carbono sólido e o minério. A reação de Boudouard desempenha papel fundamental nesse processo ao regenerar continuamente CO no interior do briquete, favorecendo a atmosfera redutora e aumentando a eficiência da redução carbotérmica (LARSSEN; TANGSTAD, 2020). A eficiência dessas reações depende diretamente das propriedades físico-químicas do carvão vegetal, como teor de carbono fixo, granulometria, porosidade e reatividade, que influenciam tanto a difusão dos gases quanto a cinética de redução (HUANG et al., 2026; XU et al., 2024; NETO et al., 2024).

Além do desempenho metalúrgico, a resistência mecânica dos briquetes é um requisito indispensável para garantir sua integridade durante as etapas de transporte, armazenamento e alimentação dos reatores. Essa propriedade é influenciada pela composição da mistura, pelas proporções entre minério e agente redutor e pelo tipo e teor de ligante empregado. Entre os ligantes inorgânicos, o silicato de sódio destaca-se pela elevada estabilidade e capacidade de promover forte coesão entre as partículas, embora sua dosagem deva ser cuidadosamente controlada para evitar aumento do teor de cinzas e redução da permeabilidade aos gases (PASCOAL et al., 2022).

Apesar dos avanços na produção de briquetes autorredutores, ainda existem lacunas quanto à influência das proporções de carvão vegetal e ligante sobre a resistência mecânica. O equilíbrio entre a quantidade de agente redutor e a quantidade de ligante, responsáveis pela

integridade estrutural dos briquetes, é determinante para sua aplicação industrial. Nesse contexto, este trabalho teve como objetivo avaliar o efeito das proporções de carvão vegetal e de silicato de sódio na resistência mecânica de briquetes autorredutores de manganês produzidos em prensa de rolos, contribuindo para o desenvolvimento de uma rota de reaproveitamento de resíduos mais eficiente e sustentável.

2. Material e Métodos

As matérias-primas utilizadas neste estudo foram finos de minério de manganês e finos de carvão vegetal, empregados como fonte de óxidos metálicos e agente redutor, respectivamente. Os finos de minério de manganês foram fornecidos pela Fermavi Soluções Minerais, localizada em Varginha-MG, enquanto os finos de carvão vegetal, produzidos a partir de madeira de *Eucalyptus* spp., foram fornecidos pela RIMA Industrial.

Como ligante, utilizou-se uma solução aquosa de silicato de sódio, composta por 40% de silicato de sódio e 60% de água (m/m). O ligante foi selecionado devido à sua disponibilidade comercial, facilidade de aplicação e elevada capacidade de promover a coesão entre as partículas, aumentando a resistência mecânica dos briquetes.

As caracterizações químicas das matérias-primas e os ensaios físicos e mecânicos dos briquetes foram realizados no Laboratório Multiusuário de Biomateriais e Energia da Biomassa (LAMBEB) e no Laboratório de Processos Energéticos e Químicos (LAPEQ), ambos da Universidade Federal de Lavras (UFLA).

2.1 Produção dos Briquetes

A briquetagem por prensa de rolos foi realizada utilizando um compactador industrial da marca LIPPEL equipado com rolos contra rotativos. Durante o processo de compactação, foi aplicada uma pressão na faixa de 120 a 130 MPa, promovendo a densificação da mistura e a formação dos briquetes. Após a conformação, as amostras foram submetidas ao processo de secagem.

2.2 Análises Físico-Químicas

2.2.1 Finos de carvão vegetal

Antes das análises, os finos de carvão vegetal foram secos em estufa a 105 ± 5 °C até massa constante, para remoção da umidade livre.

Os finos de carvão vegetal foram caracterizados quanto à distribuição granulométrica, análise química imediata, análise elementar e poder calorífico superior (PCS). A distribuição granulométrica foi determinada por peneiramento mecânico de 200 g de amostra utilizando peneiras de 12, 20, 35, 60, 80 e 100 mesh.

A análise imediata foi realizada na fração passante em 40 mesh e retida em 60 mesh, conforme a norma ASTM D1762-84, determinando-se os teores de umidade, materiais voláteis, cinzas e carbono fixo.

A análise elementar foi conduzida em analisador VARE MCRO, utilizando a fração passante em 60 mesh e retida em 200 mesh, conforme a norma ASTM D3176-24, para determinação dos teores de carbono, hidrogênio, nitrogênio e enxofre, sendo o oxigênio calculado por diferença.

O poder calorífico superior foi determinado em calorímetro digital IKA C-200, conforme a norma ASTM E711-87. Posteriormente, os briquetes foram produzidos em prensa de rolos a partir da mistura de finos de minério de manganês, finos de carvão vegetal e ligante, sendo submetidos à secagem em estufa e, em seguida, aos ensaios de caracterização física, mecânica e de redução.

2.2.2 Caracterização dos finos de minério de manganês

A composição química do minério de manganês foi determinada por ICP-OES. Inicialmente, a amostra foi submetida à digestão ácida para solubilização dos elementos presentes. Em seguida, a solução obtida foi introduzida no equipamento, utilizando plasma de argônio para excitação dos átomos e íons. Foram determinados os teores de manganês, ferro, silício, alumínio, cálcio, magnésio, fósforo e enxofre. Os resultados foram expressos em percentual ou concentração e utilizados na caracterização química do minério, na identificação de impurezas e no cálculo estequiométrico da quantidade de agente redutor necessária.

2.2.3 Caracterização física dos briquetes

Após a etapa de briquetagem e secagem, os briquetes foram submetidos à determinação da densidade a granel, resistência à compressão, resistência ao impacto e resistência à abrasão, visando avaliar seu desempenho durante o manuseio, transporte e processamento.

2.2.3.1 Densidade a granel

A densidade a granel foi determinada pelo método da massa por volume aparente. Os briquetes foram acondicionados em um recipiente de volume conhecido, sem aplicação de compactação adicional. A massa dos briquetes foi determinada em balança analítica e a densidade a granel calculada pela razão entre a massa total da amostra e o volume interno do recipiente.

2.2.3.2 Resistência à compressão

A resistência à compressão foi determinada por ensaio de compressão uniaxial em máquina universal de ensaios. Foram usados 10 briquetes como amostra que foram posicionados entre as placas de compressão e submetidos à aplicação contínua de carga até a quebra. A carga máxima suportada por cada briquete foi registrada como parâmetro de resistência mecânica.

2.2.3.3 Resistência ao impacto (Drop Test)

A resistência ao impacto foi avaliada por meio do ensaio de queda livre (*Drop Test*). Foram utilizados 15 briquetes, soltos individualmente de uma altura de 2,0 m sobre uma superfície rígida. Após o ensaio, os briquetes foram avaliados quanto à integridade física, verificando-se a ocorrência de trincas, fraturas ou fragmentação.

2.2.3.4 Resistência à abrasão (Tumbler Test)

A resistência à abrasão foi determinada pelo ensaio de tamboramento (*Tumbler Test*). Uma amostra composta por 15 briquetes foi submetida a 400 rotações em tambor rotativo. Ao término do ensaio, os briquetes foram avaliados quanto à perda de massa e à integridade física, permitindo estimar sua resistência ao desgaste provocado pelo atrito durante o manuseio e transporte.

3. Resultados e discussão

3.1 Análise granulométrica

A análise granulométrica do material foi realizada a partir de ensaio de peneiramento, permitindo a construção da curva de distribuição acumulada (% passante em função da abertura das peneiras). Os resultados granulométricos obtidos apresentaram valores superiores aos reportados por Neto et al. (2024) indicando uma distribuição de partículas mais grosseira. Enquanto a literatura encontrou valores de 0,01 mm, 0,11 mm e 0,19 mm para D_{10}, D_{50} e D_{90}, respectivamente, neste trabalho foram obtidos valores médios de 0,23 ± 0,02 mm, 0,46 ± 0,02 mm e 1,26 ± 0,07 mm.

3.2 Análise Elementar

A análise elementar do carvão vegetal permitiu estimar a reatividade do material. Os resultados estão apresentados na Tabela 1.

Tabela 1: Análise elementar do carvão vegetal

Composição (%)	*Carbono*	*Hidrogênio*	*Nitrogênio*	*Enxofre*	*Oxigênio*
Carvão Vegetal	73,9 ± 3,8	2,5 ± 0,1	0,3 ± 0,0	-	9,9 ± 4

Fonte: Autor (2026)

3.3 Química Imediata

A caracterização imediata do carvão vegetal apresentou resultados compatíveis com os reportados na literatura para os teores de umidade, materiais voláteis e carbono fixo. Entretanto, o teor de cinzas apresentou valores divergentes, possivelmente em decorrência da contaminação da moinha. Os resultados percentuais estão na tabela 2:

Tabela 2: Análise imediata do carvão vegetal

Composição (%)	*Umidade*	*Voláteis*	*Cinzas*	*Carbono Fixo*
Carvão Vegetal	*4,59 ± 0,12*	*19,04 ± 0,39*	*13,37 ± 1,16*	*63,00 ± 1,45*

Fonte: Autor (2026)

Os resultados da análise imediata indicam que o carvão apresenta baixo teor de umidade (4,59%), o que é positivo, pois reduz perdas energéticas durante o aquecimento inicial e favorece a eficiência térmica do processo. O teor de voláteis (19,04%) fortemente influenciado pelas condições de carbonização da biomassa pode ser considerado moderado. Por outro lado, o teor de cinzas (13,37%) apresentou valor relativamente elevado, o que pode estar relacionado às condições de coleta da moinha de carvão vegetal. Caso o material tenha permanecido em contato direto com o solo durante o armazenamento, é possível que tenha ocorrido a incorporação de partículas inorgânicas, como areia e solo, contribuindo para o aumento do conteúdo de cinzas, valores elevados de cinzas foram obtidos por Pascoal et al (2022) e Neto et al. (2024) que também utilizaram finos de carvão vegetal. Esse material, frequentemente é coletado diretamente do solo o que favorece a contaminação adicional por partículas inorgânicas, contribuindo para o aumento do conteúdo de cinzas. Esta característica impacta negativamente o poder calorífico e a reatividade.

De forma geral, o carvão apresenta características adequadas para aplicação em briquetes autorredutores, embora o teor de cinzas deva ser considerado como um fator de atenção no desempenho global do sistema.

3.4 Poder Calorífico Superior

O PCS experimental (26,93 ± 0,28 MJ/kg) é próximo ao PCS calculado pela equação de Dulong (25,14 MJ/kg), indicando boa concordância entre os valores e coerência na composição elementar do material. Essa proximidade sugere que a equação empírica representa adequadamente o poder calorífico da amostra, refletindo de forma consistente os teores de carbono, hidrogênio e oxigênio, além de indicar baixa influência de fatores que poderiam gerar desvios significativos, como alto teor de cinzas ou heterogeneidade do material.

3.4 Resistência Mecânica

Nos ensaios de resistência à compressão, a carga aplicada aumentou progressivamente com a deformação até atingir um valor máximo, seguido pela ruptura estrutural dos briquetes, comportamento característico de materiais aglomerados frágeis. As dez amostras avaliadas apresentaram cargas máximas entre 598,74 N e 714,49 N, indicando uma dispersão moderada dos resultados.

Esse comportamento está de acordo com os resultados reportados por Yankovych e Korol (2025), que observaram que a resistência mecânica dos briquetes é fortemente influenciada pela densidade aparente e pelas condições de compactação. Os autores verificaram que briquetes produzidos com 15% de amido apresentaram maior densidade aparente e melhores índices de resistência ao impacto e à compressão, evidenciando que a qualidade da compactação exerce papel fundamental na integridade estrutural dos briquetes. De modo geral, os resultados demonstram que o processo de briquetagem produziu briquetes com comportamento mecânico consistente, evidenciando a importância do controle das condições de fabricação para garantir maior uniformidade e resistência mecânica.

Apesar dessa variabilidade, todos os briquetes apresentaram capacidade de suportar cargas compressivas de 637,74 ± 66,47 N, demonstrando resistência à compressão de acordo com a literatura (Y. CHAI et al., 2021). Entretanto, esse desempenho não se refletiu na resistência aos esforços dinâmicos. Nos ensaios de tamboramento (*Tumbler Test*) e de resistência ao impacto (*Drop Test*), os briquetes foram totalmente destruídos, evidenciando baixa resistência à abrasão e aos impactos. Esses resultados indicam que, embora os briquetes apresentem boa capacidade de suportar cargas estáticas de compressão, sua integridade mecânica durante as etapas de manuseio, transporte e alimentação em processos industriais ainda é insuficiente, indicando a necessidade de otimização da formulação ou das condições de briquetagem para aumentar sua resistência mecânica global.

4. Conclusões

O carvão vegetal apresentou características adequadas para aplicação em briquetes autorredutores, destacando-se o poder calorífico superior típico de finos de carvão de 26,93 MJ/kg, indicando potencial para atuar como agente redutor. A análise granulométrica evidenciou partículas mais grosseiras em comparação à literatura, enquanto a análise imediata mostrou um teor de cinzas relativamente elevado, possivelmente associado à contaminação da moinha durante a coleta e o armazenamento, o que teve impacto negativo no percentual de carbono fixo.

Os briquetes produzidos em prensa de rolos apresentaram resistência média à compressão de 637,74 ± 66,47 N, evidenciando capacidade de suportar esforços estáticos. Entretanto, o desempenho nos ensaios de impacto e abrasão foi insatisfatório, com destruição total das

amostras, indicando baixa resistência a esforços dinâmicos e limitações para as etapas de manuseio, transporte e alimentação em processos industriais.

Dessa forma, embora a formulação avaliada apresente potencial para a produção de briquetes autorredutores, são necessários estudos voltados à otimização das proporções de carvão vegetal e ligante, bem como das condições de briquetagem, visando aumentar a resistência mecânica sem comprometer o desempenho metalúrgico do material.

5. Agradecimentos

Os autores agradecem à Universidade Federal de Lavras (UFLA), ao LAMBEB e ao LAPEQ pela infraestrutura e suporte experimental, à Fermavi Soluções Minerais e à RIMA Industrial pelo fornecimento das matérias-primas, e à CAPES, ao CNPq e à FAPEMIG pelo apoio à pesquisa.

6. Referência bibliográficas

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DOS PRODUTORES DE FERROLIGAS E DE SILÍCIO METÁLICO (ABRAFE). *Anuário Estatístico ABRAFE 2026: ano-base 2025*. Belo Horizonte: ABRAFE, 2026. Disponível em: https://abrafe.ind.br/wp-content/uploads/2026/06/Anuario-Estatistico-ABRAFE-2026.pdf.

BAGATINI, Maurício C.; FERNANDES, Thiago; SILVA, Rubia; GALVÃO, Douglas Felipe; FLORES, Ismael V. Mill scale and flue dust briquettes as alternative burden to low height blast furnaces. *Journal of Cleaner Production*, v. 276, p. 124332, 2020. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.124332.

CHAI, Yifan; WANG, Shijie; ZHANG, Jiaming; SHI, Yanshuo; LIU, Peijun; AN, Shengli; WANG, Chuan; NING, Xiaojun. Study on strength and reduction characteristics of iron ore powder-green carbon composite briquettes. *Fuel*, v. 377, p. 132741, 2024. DOI: 10.1016/j.fuel.2024.132741.

HAN, Chengjin; WEI, Guangsheng; ZHU, Rong; LI, Ceng; WANG, Runzhe. Biochar-based direct reduced iron production for short-process steelmaking: Current research status and future

prospects. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 157, p. 150524, 2025. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2025.150524.

LARSSEN, Trine Asklund; SENK, Dieter; TANGSTAD, Merete. Reduction of manganese ores in CO–CO_2 atmospheres. *Metallurgical and Materials Transactions B*, v. 52, n. 1, p. 187–202, 2021. DOI: 10.1007/s11663-020-02018-0.

MU, Panpan; YANG, Yibo; ZHAO, Jianying; TANG, Yusheng; ZHANG, Xiaoguang; XIAO, Mengchen; YANG, Chenye; PAN, Meichen; ZHAO, Hang; JIANG, Guosai; WU, Jixian; TAN, Zhe; FANG, Gang; PAN, De'an. Research progress in preparation of manganese-based materials from multisource manganese ores. *Green and Smart Mining Engineering*, v. 2, p. 483–514, 2025. DOI: 10.1016/j.gsme.2025.05.010.

NGENE, Gloria Ifunanya; BOUESSO, Bénit; GONZÁLEZ MARTÍNEZ, María; NZIHOU, Ange. A review on biochar briquetting: Common practices and recommendations to enhance mechanical properties and environmental performances. *Journal of Cleaner Production*, v. 469, art. 143193, 1 set. 2024. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.143193.

PASCOAL, Aline da Luz; ROSSONI, Hygor Aristides Victor; KAFFASH, Hamideh; TANGSTAD, Merete; HENRIQUES, Andréia Bicalho. Study of the physical behaviour and the carbothermal reduction of self-reducing briquettes developed with iron ore fines, charcoal and silica fume residues. *Sustainability*, v. 14, n. 17, p. 10963, 2022. DOI: 10.3390/su141710963.

ROSSO NETO, Lucio; COLETI, Jorge Luís; JUNCA, Eduardo; BORGERT, Carlos Henrique; FRIZON, Tiago Elias Allievi; GRILLO, Felipe Fardin; OLIVEIRA, José Roberto de; ZIMMERMANN, Matheus Vinicius Gregory. Sustainable steel production: Evaluating the reduction kinetics of iron ore self-reducing briquettes with eucalyptus charcoal. *Journal of Cleaner Production*, v. 457, p. 142426, 2024. DOI: 10.1016/j.jclepro.2024.142426.

YANKOVYCH, Viktor; KOROL, Nataliya. Mechanochemical and molecular analysis of organic binders in charcoal briquetting for enhanced cold mechanical strength. *Cleaner*

Engineering and Technology, v. 29, p. 101113, 2025. DOI: https://doi.org/10.1016/j.clet.2025.101113.

Avaliação das propriedades da madeira de dois clones de *Eucalyptus* nas idades de 6 e 10 anos

João Lucas Arruda de Jesus[1]; Julyo Pedro Dias de Sousa[1]; João Paulo Sardo Madi[1], Bárbara Luísa Corradi Pereira[1]; Aylson Costa Oliveira[1]

[1] Faculdade de Engenharia Florestal, Universidade Federal de Mato Grosso, Brasil.
[2] Programa de pós-graduação em Ciências Florestais e Ambientais, Universidade Federal do Mato Grosso, Brasil.

Resumo: A crescente demanda por madeira para diferentes aplicações industriais exige compreender a influência da idade e do material genético sobre as propriedades da madeira de *Eucalyptus*. Este estudo teve como objetivo avaliar o efeito da idade nas propriedades da madeira dos clones *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus camaldulensis* (VM01) e *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* (I144), cultivados no Mato Grosso, considerando a influência das diferentes posições ao longo do fuste na proporção de cerne e alburno, densidade básica, energética e no poder calorífico superior. Foram avaliadas 16 árvores, sendo quatro por combinação entre clone e idade. Coletaram-se discos de madeira em diferentes posições longitudinais do fuste. Observou-se redução da proporção de cerne e aumento do alburno com o aumento da altura no fuste. O avanço da idade aumentou a proporção média de cerne de 20,54% para 33,62% no I144 e de 22,45% para 36,01% no VM01, com redução correspondente do alburno de 81,97% para 66,38% e de 77,55% para 63,99%, respectivamente. A densidade básica média aumentou de 0,435 para 0,452 g cm^{-3} no I144 e de 0,455 para 0,498 g cm^{-3} no VM01, proporcionando incrementos de 2,5% e 10% na densidade energética dos clones, respectivamente. O poder calorífico superior não diferiu significativamente entre clones e idades, com valor médio de 4.510 kcal kg^{-1}. Conclui-se que a idade e o material genético influenciam diretamente a qualidade da madeira, destacando-se o clone VM01 pelo seu maior desenvolvimento de cerne, densidade básica e energética, enquanto o potencial energético avaliado não variou com a idade.

Palavras-chave: Cerne; Densidade Básica; Poder Calorífico Superior.

Evaluation of wood properties of two *Eucalyptus* clones at 6 and 10 years of age

Abstract: The growing demand for wood for various industrial applications necessitates an understanding of how age and genetic material influence the properties of *Eucalyptus* wood. This study aimed to evaluate the effect of age on the wood properties of *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus camaldulensis* (VM01) and *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* (I144) clones grown in Mato Grosso, considering the influence of different positions along the stem on heartwood and sapwood proportions, basic density, energy density, and gross calorific value. Sixteen trees were evaluated, with four representing each clone-age combination. Wood discs were collected at various longitudinal positions along the stem. A decrease in heartwood proportion and an increase in sapwood proportion were observed with increasing stem height. Advancing age increased the mean heartwood proportion from 20.54% to 33.62% for I144 and from 22.45% to 36.01% for VM01, with a corresponding reduction in sapwood from 81.97% to 66.38% and from 77.55% to 63.99%, respectively. Mean basic density increased from 0.435 to 0.452 g cm^{-3} for I144 and from 0.455 to 0.498 g cm^{-3} for VM01, resulting in increases of 2.5%

and 10% in the energy density of the clones, respectively. Gross calorific value did not differ significantly between clones or ages, with a mean value of 4,510 kcal kg^{-1}. It is concluded that age and genetic material directly influence wood quality; the VM01 clone stood out due to greater heartwood development and higher basic and energy densities, whereas the evaluated energy potential did not vary with age.

Keywords: Heartwood; Basic Density; Higher Heating Value.

1. Introdução

O gênero *Eucalyptus* destaca-se entre as principais espécies florestais cultivadas no mundo devido ao rápido crescimento, elevada produtividade e ampla adaptação às diferentes condições edafoclimáticas (VIDAURRE et al., 2020). No Brasil, constitui a principal fonte de madeira proveniente de florestas plantadas, abastecendo os setores de celulose e papel, painéis reconstituídos, carvão vegetal e bioenergia (IBÁ, 2025). A produtividade e a versatilidade tornam o gênero estratégico para a cadeia florestal brasileira, sendo as propriedades da madeira, fator que determina sua eficiência e valorização nos diferentes processos industriais (VIDAURRE et al.,2020).

No estado de Mato Grosso, o cultivo de *Eucalyptus* tem apresentado crescimento expressivo em função da expansão da agroindústria e da crescente demanda por biomassa destinada à secagem de grãos, geração de calor industrial e abastecimento das usinas de etanol de milho (IMEA, 2017; IMEA, 2025). Nesse cenário, a utilização de clones comerciais adaptados às condições edafoclimáticas da região tem contribuído para o fortalecimento da silvicultura estadual e para o suprimento energético das cadeias produtivas (MICHETTI et al., 2022; IBÁ, 2025). Estudos recentes realizados na região demonstram o potencial energético de diferentes clones de *Eucalyptus spp.* para abastecimento da agroindústria mato-grossense (CAMPOS, 2025; JAMBERS et al., 2025).

A qualidade da madeira destinada a geração energética está diretamente relacionada à propriedades como densidade básica, teor de lignina, teor de extrativos, teor de cinzas e poder calorífico superior, que influenciam o desempenho da biomassa nos processos de combustão (PROTÁSIO et al., 2019). No entanto, a qualidade da madeira é resultado da interação entre fatores genéticos, ambientais e silviculturais, além das variações estruturais inerentes ao desenvolvimento da árvore. Durante o crescimento cambial, modificações na organização dos tecidos lenhosos promovem alterações nas propriedades anatômicas, físicas, químicas e mecânicas da madeira, influenciando diretamente seu desempenho e potencial energético (VIDAURRE et al., 2011).

Entre essas variações, a distribuição longitudinal da madeira constitui importante fonte de heterogeneidade, estando relacionada à predominância relativa de lenho juvenil e o lenho adulto (VIDAURRE et al., 2011). Além disso, o material genético exerce influência significativa sobre as propriedades da madeira de *Eucalyptus*, uma vez que clones distintos apresentam diferenças na formação de cerne, na densidade básica, na composição química e no potencial energético. Essas características são determinadas pelas particularidades genéticas de cada material e influenciam diretamente a qualidade da madeira e sua aplicação industrial (VIDAURRE et al., 2020; VIEIRA et al., 2023).

O avanço da idade também influencia a proporção de cerne e alburno no tronco. O cerne corresponde à região interna composta por células fisiologicamente inativas e enriquecidas por extrativos, enquanto o alburno é responsável pelo transporte de água e nutrientes (VIDAURRE et al., 2020). Nesse contexto, o presente trabalho teve como objetivo avaliar o efeito da idade nas propriedades da madeira dos clones VM01 (*Eucalyptus urophylla* × *Eucalyptus camaldulensis*) e I144 (*Eucalyptus urophylla* × *Eucalyptus grandis*), cultivados no estado de Mato Grosso, considerando a influência das diferentes posições ao longo do fuste na proporção de cerne e alburno e na densidade básica.

2. Material e Métodos

Para a condução do presente estudo, foram avaliados dois clones, VM01 (*Eucalyptus urophylla x E. camaldulensis*) e I144 (*Eucalyptus grandis x E. urophylla*) com idades de 6 e 10 anos, provenientes de plantio comercial localizado no estado de Mato Grosso. Foram selecionadas e abatidas quatro árvores de cada material genético em cada idade avaliada, totalizando quatro repetições por tratamento. Após o abate, os fustes foram seccionados na altura comercial e coletaram-se seis discos com aproximadamente 6 cm de espessura nas posições: 0% (base), DAP, 25%, 50%, 75% e 100% da altura comercial. Essa amostragem permite avaliar a variação das propriedades da madeira (cerne, alburno e densidade básica) ao longo do fuste, conforme as metodologias descritas na Tabela 1.

Tabela 1 – Descrição das metodologias adotadas na determinação das propriedades da madeira de dois clones de *Eucalyptus* spp.

Análise	Descrição	Referência metodológica
Cerne e Alburno (%)	Aplicação de amarelo de metila, obtenção de imagens digitais e mensuração das áreas cerne e alburno utilizando o software ImageJ.	Câmara (2020)

Densidade básica (kg.cm^{-3})	Determinada pelo método da balança hidrostática, utilizando o volume saturado e a massa seca em estufa	ABNT NBR 11941 (2003)
PCS (kcal kg^{-1})	Determinação do poder calorífico superior em bomba calorimétrica	ASTM E711-87 (2004)
Densidade Energética (Kcal.cm^{-3})	DE = DB (kg.cm^{-3}) x PCS (kcal kg^{-1})	
Análise estatística	Os dados foram submetidos a análise de variância ANOVA e, quando significativo, as médias foram comparadas pelo teste de Sidak, ao nível de significância de 5% ($p \leq 0,05$), utilizando o software RStudio.	

3. Resultados e Discussão

De acordo com a análise visual, a zona de alburno foi identificada constituindo a região mais clara da seção radial. Por sua vez, o cerne, porção mais escura da madeira, apresentou maior contraste em discos abaixo de 50% da altura comercial (Tabela 2).

A idade influenciou significativamente a proporção de cerne e alburno na posição correspondente ao diâmetro à altura do peito (DAP) para os clones VM01 e I144 (Tabela 2). Observou-se aumento da proporção de cerne e redução do alburno com o avanço da idade, comportamento característico do processo de maturação da madeira. No clone I144, a proporção média de cerne aumentou de 20,54% aos 6 anos para 33,62% aos 10 anos, resultando na redução da proporção de alburno. Da mesma forma, o clone VM01 apresentou aumento da proporção média de cerne de 22,45% para 36,01% e redução do alburno. Segundo Vidaurre et al. (2020), o crescimento das árvores promove modificações anatômicas, físicas e químicas que refletem diretamente na qualidade tecnológica da madeira. Durante esse processo, ocorre a conversão gradual do alburno em cerne em decorrência da perda da atividade fisiológica das células parenquimáticas, da oclusão dos vasos e da deposição de extrativos, características típicas da cernificação (VIDAURRE et al., 2011; BRITO et al., 2020).

Tabela 2 – Variação longitudinal das porcentagens de cerne e alburno de dois clones de eucalipto nas idades de 6 e 10 anos

			Posição Longitudinal					
Clone	**Idade**	**Parâmetro**	**0%**	**DAP**	**25%**	**50%**	**75%**	**100%**
I144	**6**	Cerne	$21,33^{(0,20)}$	$21,82^{(0,21)}$	$22,42^{(0,21)}$	$19,36^{(0,21)}$	$19,37^{(0,21)}$	$19,45^{(0,21)}$
		Alburno	$82,15^{(0,21)}$	$81,65^{(0,20)}$	$81,06^{(0,21)}$	$84,11^{(0,21)}$	$84,10^{(0,21)}$	$84,03^{(0,20)}$

		Imagem						
		Cerne	37,65$^{(0,21)}$	36,78$^{(0,14)}$	35,94$^{(0,14)}$	35,03$^{(0,13)}$	32,70$^{(0,17)}$	31,01$^{(0,19)}$
		Alburno	62,35$^{(0,21)}$	63,22$^{(0,14)}$	64,06$^{(0,14)}$	64,97$^{(0,13)}$	67,30$^{(0,17)}$	68,99$^{(0,19)}$
I144	**10**	Imagem						
		Cerne	23,77$^{(0,21)}$	23,96$^{(0,19)}$	24,26$^{(0,19)}$	21,93$^{(0,20)}$	19,85$^{(0,21)}$	19,94$^{(0,21)}$
		Alburno	76,23$^{(0,21)}$	76,04$^{(0,19)}$	75,74$^{(0,19)}$	78,07$^{(0,20)}$	80,15$^{(0,21)}$	80,06$^{(0,21)}$
VM01	**6**	Imagem						
		Cerne	39,30$^{(0,23)}$	39,15$^{(0,25)}$	38,48$^{(0,25)}$	37,40$^{(0,25)}$	34,59$^{(0,27)}$	34,69$^{(0,27)}$
		Alburno	60,70$^{(0,23)}$	60,85$^{(0,25)}$	61,52$^{(0,25)}$	62,60$^{(0,25)}$	65,41$^{(0,27)}$	65,31$^{(0,27)}$
VM01	**10**	Imagem						

Em relação à posição longitudinal no fuste, não foram observadas diferenças significativas na proporção de cerne e alburno entre as alturas avaliadas (Tabela 2), indicando que a distribuição dessas regiões ao longo do tronco apresentou comportamento semelhante para os clones estudados. Esse resultado sugere que, nas idades avaliadas, a variação longitudinal exerceu menor influência sobre a formação de cerne quando comparada ao efeito da idade. Segundo Vidaurre et al. (2011), a distribuição longitudinal do cerne pode variar em função da idade, do material genético e das condições de crescimento, não apresentando um padrão único entre diferentes materiais genéticos. Brito et al. (2020) também destacam que a influência da posição ao longo do fuste sobre as propriedades da madeira depende das características de desenvolvimento de cada clone e do estágio de maturação do lenho.

O aumento da proporção de cerne e a redução do alburno com o avanço da idade corroboram o padrão descrito para espécies do gênero *Eucalyptus*, (VIDAURRE et al., 2011; BRITO et al., 2020). Entretanto, a velocidade desse processo é influenciada pela interação entre idade, material genético e condições de crescimento (VIDAURRE et al., 2020; SANTOS et al., 2024).

Sob o ponto de vista tecnológico, o aumento da proporção de cerne representa uma característica desejável, pois esse tecido apresenta menor teor de umidade, maior concentração de extrativos e maior estabilidade química em relação ao alburno (VIDAURRE et al., 2020). Além disso, a formação do cerne está frequentemente associada ao aumento da densidade básica da madeira, refletindo o processo de maturação do lenho e contribuindo para a melhoria de suas propriedades tecnológicas (VIDAURRE et al., 2020).

A distribuição longitudinal da densidade básica variou em função da idade e do material genético (Figura 1).

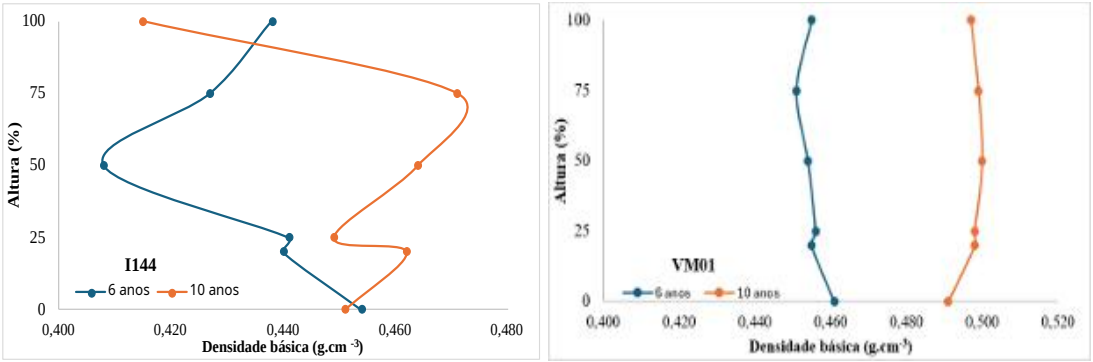


Figura 1 – Variação longitudinal da densidade básica da madeira dos clones VM01 e I144 aos 6 e 10 anos de idade.

De modo geral, observou-se incremento da densidade básica com o avanço da idade em ambos os clones (Figura 1), evidenciando o efeito da maturação da madeira sobre essa propriedade. O clone I144 apresentou aumento da densidade básica média de 0,435 g cm^{-3}, aos 6 anos, para 0,452 g cm^{-3}, aos 10 anos, enquanto o clone VM01 apresentou incremento de 0,455 g cm^{-3} para 0,498 g cm^{-3} nas respectivas idades. Segundo Vidaurre et al. (2020), o desenvolvimento da árvore promove alterações anatômicas e estruturais que resultam na formação de lenho adulto, caracterizado pelo maior espessamento das paredes celulares e redução do diâmetro do lume das fibras. Essas modificações favorecem o aumento da densidade básica da madeira e, consequentemente, sua qualidade tecnológica.

O clone VM01 apresentou distribuição longitudinal mais homogênea da densidade básica nas duas idades avaliadas. Aos 6 anos, observaram-se pequenas variações ao longo do fuste, enquanto aos 10 anos ocorreu incremento da densidade em todas as posições avaliadas, mantendo-se um perfil relativamente uniforme. De acordo com Vidaurre et al. (2020), a maior uniformidade da densidade básica está relacionada às características genéticas do material e

constitui uma característica desejável para a utilização industrial da madeira, uma vez que proporciona maior regularidade das propriedades físicas e mecânicas.

Em contraste, o clone I144 apresentou maior variabilidade longitudinal da densidade básica, principalmente aos 6 anos. Embora tenha ocorrido incremento da densidade aos 10 anos, o perfil longitudinal permaneceu mais irregular quando comparado ao clone VM01. Conforme discutido por Santos et al. (2024), diferenças na distribuição da madeira juvenil e adulta ao longo do fuste, associadas às características genéticas de cada material, podem resultar em maior heterogeneidade da densidade básica. Vidaurre et al. (2020) também destacam que a interação entre idade e material genético exerce influência direta sobre a distribuição longitudinal dessa propriedade.

Comparando-se os materiais genéticos, verificou-se que o clone VM01 apresentou densidades básicas superiores às do clone I144 na maior parte das posições avaliadas, com médias de 0,455 e 0,498 g cm^{-3} aos 6 e 10 anos, respectivamente, enquanto o clone I144 apresentou médias de 0,435 e 0,452 g cm^{-3} nas mesmas idades. Campos (2025), avaliando o clone VM01, também verificou incremento da densidade básica com o avanço da idade. Esse comportamento evidencia a influência do genótipo sobre a qualidade da madeira, uma vez que diferenças anatômicas e fisiológicas entre clones determinam distintos padrões de crescimento e deposição de biomassa na parede celular. Vieira et al. (2023) ressaltam que a genética dos clones interfere diretamente nas propriedades físicas da madeira.

O aumento da densidade básica observado neste estudo acompanhou o incremento da proporção de cerne (Tabela 1). À medida que ocorre a conversão do alburno em cerne, há maior deposição de extrativos, processo que contribui para o aumento da densidade e para a melhoria da qualidade tecnológica da madeira (VIDAURRE et al., 2020). Esse comportamento foi igualmente observado por Campos (2025), que verificou aumento simultâneo da relação cerne/alburno e da densidade básica para o clone VM01. Entretanto, embora o avanço da idade tenha promovido alterações nas características anatômicas e físicas da madeira, esse comportamento não se refletiu no seu potencial energético.

O poder calorífico superior (PCS) não apresentou diferença significativa entre as idades avaliadas para os clones I144 e VM01 (Tabela 3). O clone I144 apresentou valores médios de 4606 kcal kg^{-1} aos 6 anos e 4548 kcal kg^{-1} aos 10 anos, enquanto o clone VM01 apresentou 4420 kcal kg^{-1} e 4464 kcal kg^{-1}, respectivamente. Apesar das pequenas variações observadas, a idade não influenciou significativamente essa propriedade, indicando que o potencial energético da madeira permaneceu estável.

Tabela 3 - Poder calorífico superior e Densidade energética dos clones VM01 e I144 aos 6 e 10 anos de idade

	Poder Calorífico (kcal.kg^{-1})		**Densidade energética (kcal.cm^{-3})**	
	6 anos	**10 anos**	**6 anos**	**10 anos**
I144	$4606^{(38,54)}$a	$4548^{(53,03)}$a	2003,61	2055,7
VM01	$4420^{(8,49)}$a	$4464^{(13,79)}$a	2011,1	2223,07

A estabilidade do PCS indica que o aumento da proporção de cerne não foi suficiente para alterar significativamente a energia liberada durante a combustão. Conforme Protásio et al. (2019), essa propriedade está mais relacionada à composição química da madeira, especialmente aos teores de lignina e extrativos, do que às alterações anatômicas decorrentes da idade. De forma complementar, Vieira et al. (2023) demonstraram que a composição química dos clones exerce influência direta sobre o potencial energético da biomassa.

Os resultados obtidos corroboram os encontrados por Carneiro et al. (2014) e Ramos et al. (2023), que observaram reduzida variação do poder calorífico superior entre diferentes idades e clones de eucalipto, mesmo diante de alterações em outras propriedades da madeira. Da mesma forma, Brito et al. (2020) destacam que a influência da idade não ocorre de maneira uniforme sobre as propriedades, sendo as características energéticas menos sensíveis ao avanço da idade do que as propriedades anatômicas e físicas. Esse comportamento também foi relatado por Campos (2025), que verificou, para o clone VM01, aumento da proporção de cerne sem alterações significativas no poder calorífico superior.

Apesar da estabilidade do poder calorífico superior, a densidade energética aumentou com o avanço da idade, registrando incrementos de aproximadamente 2,5% para o clone I144 e 10% para o VM01. Esse resultado demonstra que o envelhecimento da madeira favorece o aumento da energia disponível por unidade de volume, em função do incremento da densidade básica. Resultado semelhante foi descrito por Campos (2025), que observou aumento progressivo da densidade energética do clone VM01 entre 54 e 144 meses de idade, associado ao aumento da densidade básica, mesmo diante de reduzida variação do poder calorífico superior.

4. Conclusões

A idade influenciou significativamente as propriedades da madeira dos clones VM01 e I144, promovendo aumento da proporção de cerne e redução do alburno. Em relação à posição longitudinal do fuste, não foram observadas diferenças significativas nas proporções de cerne e

alburno, indicando, nas condições avaliadas, a menor influência da altura de amostragem comparada à idade.

Houve incremento da densidade básica com aumento da idade, especialmente no clone VM01, que apresentou distribuição longitudinal mais uniforme e maiores valores de densidade em relação ao clone I144.

O incremento da densidade básica proporcionou aumento da densidade energética, especialmente no clone VM01, evidenciando maior concentração de energia por unidade de volume da madeira com o avanço da idade.

O poder calorífico superior permaneceu estatisticamente semelhante entre as idades avaliadas para ambos os clones. De maneira geral, os resultados demonstram que a idade de corte e o material genético são fatores determinantes para a qualidade da madeira de Eucalyptus.

5. Agradecimentos

À Arefloresta, ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), ao Laboratório de Tecnologia da Madeira e à Universidade Federal de Mato Grosso.

6. Referências bibliográficas

Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2003). NBR 11941: madeira – determinação da densidade básica. ABNT

ASTM International. (2004). Standard test method for gross calorific value of refuse-derived fuel by the bomb calorimeter (ASTM E711-87). ASTM

Brito, A. S., Silva, J. G. M., Vidaurre, G. B., & Trugilho, P. F. (2020). Influência da idade nas propriedades da madeira de eucalipto. Em G. B. Vidaurre, J. G. M. Silva, J. C. Moulin, & A. C. O. Carneiro (Eds.), Qualidade da madeira de eucalipto proveniente de plantações no Brasil (pp. 104–131). EDUFES

Câmara, A. P., Vidaurre, G. B., Moulin, J. C., & Bobadilha, G. S. (2020). A relação cerne e alburno na madeira de eucalipto. Em G. B. Vidaurre, J. G. M. Silva, J. C. Moulin, & A. de C. O. Carneiro (Eds.), Qualidade da madeira de eucalipto proveniente de plantações no Brasil (pp. 70–102). EDUFES

Campos, C. M. (2025). Avaliação da madeira de clones de eucalipto plantados em Mato Grosso para lenha de uso industrial (Dissertação de mestrado). Universidade Federal de Mato Grosso.

Carneiro, A. C. O., Castro, A. F. N. M., Castro, O. R. V., Santos, R. C., & Ferreira, L. P. (2014). Potencial energético da madeira de Eucalyptus sp. em função da idade e de diferentes materiais genéticos. Revista Árvore, 38(2), 375–381. https://doi.org/10.1590/S0100-67622014000200019

Indústria Brasileira de Árvores. (2025). Relatório anual IBÁ 2025. IBÁ. https://bit.ly/3IN90YO

Instituto Mato-Grossense de Economia Agropecuária. (2017). Análise de clusters de etanol de milho em Mato Grosso. IMEA.

Instituto Mato-Grossense de Economia Agropecuária. (2025). Dashboard de comercialização de grãos e plumas em Mato Grosso. IMEA. https://www.imea.com.br/imea-site/dashboards?c=5&d=1136862482273345536

Jambers, V. T., Amorim, C. N., Campos, C. M., Rocha, L. L., Carneiro, A. C. O., Carvalho, A. M. M. L., Oliveira, A. C., & Pereira, B. L. C. (2025). Qualidade da lenha de clones de Eucalyptus spp. para suprimento da agroindústria em Mato Grosso, Brasil. Revista Árvore, 49, e4921. https://doi.org/10.53661/1806-9088202549263901.

Michetti, M., Harris, V. M. G., & Muniz, M. R. (2022). Mapeamento da produção silvicultural em Mato Grosso. IMEA.

Protásio, T. P., Scatolino, M. V., Araújo, A. C. C., Oliveira, A. F. C. F., Figueiredo, I. C. R., Assis, M. R., & Trugilho, P. F. (2019). Assessing proximate composition, extractive concentration, and lignin quality to determine appropriate parameters for selection of superior eucalyptus firewood. BioEnergy Research, 12(3), 626–641. https://doi.org/10.1007/s12155-019-10004-x.

Ramos, D. C., et al. (2023). Qualidade da madeira e do carvão vegetal de quatro clones de Eucalyptus com idades entre 108 e 120 meses. Ciência Florestal, 33(1), e63721. https://doi.org/10.5902/1980509848302

Santos, V. B., Da Conceição, G. J., Rodrigues, P. D., Cirilo, N. R. M., Almeida, M. N. F., Rocha, M. F. V., Guimarães, J. F. R., Carvalho, A. M. M. L., Gomes, F. J. B., Marcelino, P. R. C., Barbosa, V. O. D. P., Neto, T. C. C., Moulin, J. C., Pedrazzi, C., & Vidaurre, G. B. (2024). Impact of age and genotype on the quality of eucalyptus wood for dissolving pulp. Industrial Crops and Products, 218, 118930. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2024.118930.

Vidaurre, G., Lombardi, L. R., Oliveira, J. T. D. S., & Arantes, M. D. C. (2011). Lenho juvenil e adulto e as propriedades da madeira. Floresta e Ambiente, 18(4), 469–480. https://doi.org/10.4322/floram.2011.066.

Vidaurre, G. B., Silva, J. G. M. da, Moulin, J. C., & Carneiro, A. de C. O. (Eds.). (2020). Qualidade da madeira de eucalipto proveniente de plantações no Brasil. EDUFES.

Vieira, T. A. S., Trugilho, P. F., Carabineiro, S. A. C., Zanuncio, A. J. V., Carvalho, A. G., & Branco-Vieira, M. (2023). Impact of chemical composition on Eucalyptus wood clones for sustainable energy production. Forests, 14(11), 2240. https://doi.org/10.3390/f14112240

Avaliação de resíduos gerados na produção de polpa celulósica: uma alternativa para o uso energético

Jovita Oliveira Dantas[1]; Arthur Pedro Alves Fernandes[1]; Carlos Eduardo Barbosa da Silva[1]; William Jerônimo Araújo Nascimento[2]; Ademilson Coneglian [2]; Matheus Peres Chagas [1]; Macksuel Fernandes da Silva[1]; Carlos Roberto Sette Junior [1]

[1] Universidade Federal de Goiás - UFG
[2] Universidade Estadual de Goiás - UEG

Resumo: O resíduo gerado na indústria de celulose e papel, denominado de *screen reject*, é ainda pouco estudado sob a perspectiva de seu aproveitamento energético. Este trabalho teve como objetivo avaliar suas características físicas e energéticas para verificar sua viabilidade como combustível. Foram realizadas análises de granulometria, umidade, densidade a granel, poder calorífico superior e inferior e análise imediata (cinzas, voláteis e carbono fixo). Os resultados mostraram predominância de partículas grossas (91,3%), baixa umidade (5,96%), porém elevado teor de cinzas (50,48%), baixo carbono fixo (7,16%) e reduzido poder calorífico superior (1.211Kcal/g). O *screen reject* da indústria de celulose e papel apresenta limitações energéticas quando utilizado sozinho, sendo recomendado seu uso em mistura com outras biomassas (como a madeira) para viabilizar o aproveitamento desse resíduo.

Palavras-chave: *screen reject*; polpa celulósica; recuperação energética

Evaluation of Residues Generated During Pulp Production: An Alternative for Energy Utilization

Abstract: The waste generated in the pulp and paper industry, known as “screen reject,” has not yet been extensively studied from the perspective of its use as an energy source. The objective of this study was to evaluate its physical and energy characteristics to assess its viability as a fuel. Analyses were conducted for particle size distribution, moisture content, bulk density, higher and lower heating values, and immediate analysis (ash, volatiles, and fixed carbon). The results showed a predominance of coarse particles (91.3%), low moisture content (5.96%), but high ash content (50.48%), low fixed carbon (7.16%), and low gross calorific value (1,211 kcal/g). Screen reject from the pulp and paper industry has energy limitations when used alone; therefore, it is recommended to use it in combination with other biomass (such as wood) to make the utilization of this waste feasible.

Keywords: screen reject; cellulosic pulp; energy recovery

1. Introdução

Nos últimos anos a busca por novas fontes de energias renováveis tem movimentado a sociedade. Um exemplo de busca e aproveitamento energético renovável, são as indústrias, principalmente as de produção de celulose e papel, que possuem em suas plantas diversas etapas, onde os seus resíduos são reaproveitados para gerar vapor e energia elétrica. O Brasil é o segundo maior produtor de celulose do mundo, o que gera uma grande quantidade de resíduos, sendo demandada uma gestão eficiente (Dias, 2021).

Um dos resíduos provenientes da produção da celulose e do papel é o *screen rejects*, um subproduto composto por fibras celulósica e lascas de madeira, sendo gerado durante a purificação da polpa para remover contaminantes e material lenhoso não totalmente cozido (Germgård; Sjöstrand; Fiskari, 2023). Esse material frequentemente é composto por areia e feixes de fibras preservados com superfícies homogêneas (César et al.,2017).

Em muitos casos esse material é descartado em aterros sanitários, o que pode ter um custo elevado além de resultar em emissões de gases a medida em que se decompõe o material orgânico presente (Rauzi; Tschirner, 2022). Contudo, o *screen rejects* pode ser utilizado para a recuperação energética dentro do sistema da indústria de celulose ou papel (Licursi et al., 2016). Dentro do processo industrial esse resíduo é comumente utilizado para queima em caldeira junto com outros materiais orgânicos de cascas e quebras de madeira (Klabin, 2016).

O presente estudo teve como objetivo avaliar as características energéticas do *screen rejects*, gerado pela indústria de celulose e papel, a fim de verificar sua aptidão para utilização como combustível.

2. Material e métodos

O *screen rejects* (Figura 1), foi coletado de uma indústria de produção de celulose e papel e posteriormente levado para Laboratório de Qualidade da Madeira e Bioenergia da Universidade Federal de Goiás para a caracterização energética, conforme descrito a seguir.



Figura 1 - Resíduo *screen reject* obtido da indústria de celulose e papel é utilizado para a caracterização energética.

Granulometria

A distribuição granulométrica foi determinada de acordo com a ISO 17827-1, por meio do método de peneiramento oscilatório para biocombustíveis sólidos não densificados. Inicialmente, a amostra foi homogeneizada e uma porção representativa, previamente seca, foi pesada em balança analítica. Em seguida, o material foi submetido ao peneiramento em um conjunto de peneiras com aberturas correspondentes às malhas 7, 20, 40, 60 e 100 *mesh*, dispostas em ordem decrescente de abertura e acopladas a um agitador de peneiras com movimento oscilatório.

O ensaio foi realizado durante 5 minutos, sob frequência de 80 batidas intermitentes por minuto, promovendo a separação das partículas em função de seu tamanho. Ao término do ensaio, o material retido em cada peneira e na bandeja coletora foi pesado individualmente, sendo a distribuição granulométrica expressa como a porcentagem de massa retida em cada fração em relação à massa total da amostra.

Análise imediata

Para a determinação da análise imediata, composta pelo teor de materiais voláteis, cinzas e carbono fixo, foi utilizada parte da fração retida na peneira de 60 *mesh* que foi seca (0%). Os ensaios de teor de voláteis e teor de cinzas foram realizados em triplicata, utilizando cadinhos de porcelana previamente calcinados.

O teor de voláteis foi baseado na norma ISO 18123. Em cada cadinho e tampa de massas conhecidas, foi inserido aproximadamente 1,0 g de material, sendo levado para a mufla a 900°C,

permanecendo em seu interior durante três minutos com a porta da mufla aberta e nos próximos sete minutos com a porta fechada. Por fim o cadinho foi resfriado em dessecador por 30 minutos e pesado em temperatura ambiente. O teor de voláteis foi calculado conforme a equação 1.

$$MV = Mi - MfMa * 100 \quad \text{Eq. 1}$$

Em que: MV: Teor de materiais voláteis da biomassa (%); Mi: Massa inicial do cadinho + amostra (g); Mf: Massa final do cadinho + amostra (g); Ma: massa da amostra (g).

O teor de cinzas foi determinado conforme a norma ISO 18122. Assim como na análise do teor de voláteis, cerca de 1,0 g de biomassa foi inserida em cada cadinho, sem tampa. Em seguida, os cadinhos foram introduzidos na mufla, com aquecimento gradual até atingir ±550 °C, mantendo-se essa temperatura por 2 horas. Após o período, as amostras foram resfriadas em dessecador e pesadas à temperatura ambiente. O teor de cinzas foi então obtido conforme a Equação 2.

$$CZ = Mf - McMa * 100 \quad \text{Eq. 2}$$

Em que: CZ: Teor de cinzas no carvão, em %; Mf: Massa final do cadinho + amostra (g); Mc: Massa do cadinho (g); Ma: amostra inicial (g).

O teor de carbono fixo é uma medida indireta, dependente dos teores de materiais voláteis e teor de cinzas para sua determinação, obtido através da Equação 3.

$$CF = 100 - (CZ + MV) \quad \text{Eq. 3}$$

Em que: CF = Teor de carbono fixo (%); CZ = Teor de cinzas (%); MV = Teor de materiais voláteis (%).

Densidade a granel

O material foi utilizado para a determinação da densidade a granel, de acordo com a metodologia estabelecida na norma ISO 17228: relação da massa do material analisado e o volume conhecido de um recipiente (Equação 4).

$$DG = MaVr \quad \text{Eq. 4}$$

Em que: DG = Densidade à granel (kg.m-3); Ma = Massa da amostra (kg); Vr = Volume do recipiente (m3).

Poder calorífico superior e inferior

O Poder Calorífico Superior - PCS ($MJ.kg^{-1}$) foi determinado utilizando-se um calorímetro IKA WORKS C-200, conforme ISO 18125.

O Poder Calorífico Inferior – PCI (MJ kg^{-1}) foi calculado de acordo com a Equação 5, conforme a teoria do poder calorífico líquido (*Net Calorific Value*) proposta por Van Loo e Koppejan (2002), considerando o teor de umidade e o teor de hidrogênio na biomassa.

$$PCI = PCS\ (1-u/100) - 2{,}447\ u/100 - 2{,}447 \times 9{,}01 \times H/100\ (1-u/100) \quad Eq.\ 5$$

Em que: PCI = poder calorífico inferior (MJ kg^{-1}, base úmida); PCS = poder calorífico superior (MJ kg^{-1}, base seca); u = teor de umidade da biomassa (% base úmida); H = teor de hidrogênio da biomassa (% base seca); 2,447 MJ kg^{-1} = calor latente de vaporização da água a 25 °C; 9,01 = fator estequiométrico correspondente à massa de água formada pela combustão do hidrogênio.

Densidade energética

A densidade energética (DE) foi calculada pelo produto do poder calorífico inferior (PCI) e a densidade a granel (DG), conforme a Equação 6.

$$DE = PCI\ x\ DG \qquad Eq.\ 6$$

Em que: DE = Densidade Energética (MJ m^{-3}); PCI = Poder Calorífico Inferior (MJ.kg^{-1}); DG = Densidade a granel (kg m^{-3}).

Teor de Umidade

O teor de umidade foi obtido de acordo com a norma ISO 18134 determinado de acordo com a equação 7:

$$U = Mi - Mf/Mi * 100 \quad Eq.\ 7$$

Em que: U: Teor de umidade (%); Mi: Massa inicial (g); Mf: Massa final (g).

3. Resultados e discussão

O perfil granulométrico do resíduo (Figura 2), mostrou que a maior parte do material ficou retido na fração de 7 *mesh*, o que é determinado como um material com granulometria grosseira.

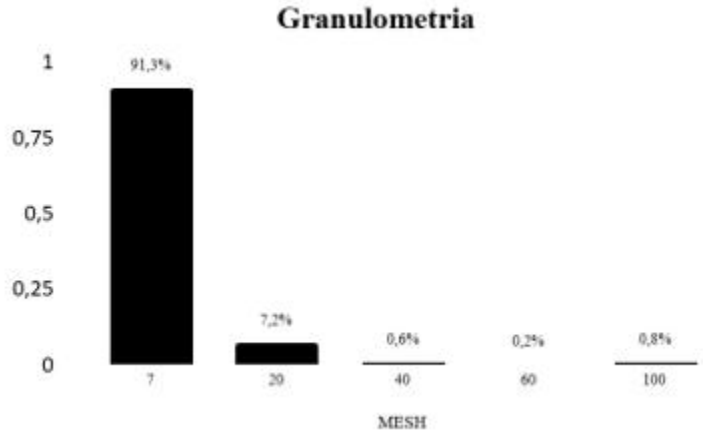


Figura 2 - Distribuição granulométrica do resíduo, em percentual retido nas peneiras de 7, 20, 40, 60 e 100 mesh.

Na análise imediata (Tabela 1), o teor de materiais voláteis apresentou uma média de 42,36%. Segundo Bersch et.al (2018) o maior teor de materiais voláteis ocasiona uma degradação mais acelerada do material. Para biomassas mais usuais como a madeira do eucalipto, essa média costuma ser maior: Silva (2022) encontrou valores entre 83 a 87 % para a madeira de diferentes clones de eucalipto. Santos (2020) encontrou média entre 82,1 e 82,8 % para cavaco de eucalipto.

Tabela 1 - Teores de Cinzas, Materiais voláteis e Carbono fixo

Repetição	Cinzas (%)	M. voláteis (%)	Carbono fixo (%)
1	51,10	42,00	6,91
2	47,98	42,61	9,41
3	52,36	42,48	5,16
Média	50,48	42,36	7,16

A teor de cinzas é uma medida essencial para entender a capacidade energética do material, segundo Oliveira et al. (2023), materiais com elevado teor de cinzas apresentam um baixo Poder Calorífico Superior (PCS), o que pode tornar certas biomassas inadequadas para a combustão direta. Na (Tabela 1**)** podemos observar que o teor médio de cinzas foi de 50,48 %, uma média extremamente alta quando comparamos com a madeira de eucalipto. O elevado teor de cinzas do *screen reject* está relacionado à sua composição, caracterizada pela presença de feixes de fibras, partículas de madeira parcialmente cozidas (shives), casca e contaminantes minerais, como areia e outros materiais inorgânicos, que são concentrados durante a etapa de peneiramento da polpa. Esses constituintes aumentam a fração inorgânica do resíduo e

comprometem seu desempenho como combustível quando utilizado isoladamente (Germgård; Sjöstrand; Fiskari, 2023). Sette Jr. et al (2020) encontrou um teor de cinzas de 0,57 % para a madeira de *E. urophylla* e Santos (2020) encontrou uma média variando de 0,71 a 2,30% de cinzas também para a madeira.

Com os dados da análise imediata foi possível determinar o teor de carbono, como uma medida indireta. A média de carbono fixo foi de 7,16 %, um valor aproximado do que foi encontrado por Orellana et al, (2020) em uma avaliação dos resíduos do processamento do feijão, que foi de 7,70%. Altos teores de carbono fixo proporcionam uma queima mais lenta do material, aumentando a sua durabilidade em fornos (Bersch et.al 2018).

A densidade a granel é importante para gerar dados necessários na logística e transporte do material, pois mostra os espaços vazios e o volume real do resíduo (Oliveira et. al, 2017). Para o *screen reject* a densidade a granel encontrada foi de 210 kg.m³, um valor próximo ao encontrado por Santos (2020) para o cavaco de eucalipto, que foi entre 214 e 239 kg.m³.

O poder calorífico superior (PCS) é uma importante variável para selecionar a melhor biomassa, resíduo já que mostra a quantidade de energia que é liberada durante a queima do resíduo (Carneiro et al, 2014). Silva (2022), em um estudo que avaliou a madeira de *Eucalyptus* spp. encontrou valores entre 19,68 e 20,05 MJ/kg^{-1}, Orellana et al, (2020) obteve um valor de 16,78 MJ/kg^{-1} para a casca do café é 18,52 MJ/kg para o sabugo do milho, valores muito superiores ao resíduo de peneiramento, que variou entre 5,03 a 5,11 MJ/kg^{-1}. O poder calorífico inferior (PCI), que mostra na prática quanto de energia pode ser realmente produzida durante a queima (Alves et al, 2020) foi de 3,37 MJ/kg^{-1}, um valor baixo em comparação com outros resíduos, como o encontrado por Alves et al, (2020) que avaliou os resíduos de processamento de sucos, obtendo um resultado que variou entre 15,24 a 17,03 MJ/kg.

Tabela 2 - Teores de Umidade, Densidade a granel e Densidade Energética

Repetição	Teor de Umidade (%)	Densidade a granel (Kg m³)	Densidade Energética (MJ/m
1	5,96	206,20	696,03
2	5,93	200,02	668,05
3	5,98	209,31	714,10
Média	5,96	205,18	692,73

O *screen reject* apresentou uma densidade energética média (Tabela 2) de 692,72 MJ/m³, Silva (2022) em um estudo com madeira de eucalipto foi encontrado um valor entre 8035,0 a 9052,1 MJ/m³.

O teor de umidade é um dos fatores que mais influenciam no uso para energia (Santos, 2020). O mesmo autor encontrou uma umidade em cavaco de eucalipto entre 14 e 14,3%, enquanto valor médio encontrado para o *screen reject* (Tabela 2) foi de 5,96%, um valor bem abaixo do comumente encontrado em materiais mais usuais como o eucalipto.

4. Conclusões

Não há a indicação de utilização do resíduo da indústria de celulose e papel *screen reject* de forma isolada, para fins energéticos, principalmente pelo alto teor de cinzas, baixo carbono fixo e reduzido poder calorífico. Desta maneira, recomenda-se o seu uso como um blend com outros resíduos, preferencialmente orgânicos e com características energéticas superiores.

5. Referências bibliográficas

Alves, J. L. F., Carvalho, M. A. de, Silva, M. A. da, & Cardoso, M. (2020). Lignocellulosic residues from the Brazilian juice processing industry as novel sustainable sources for bioenergy production: Preliminary assessment using physicochemical characteristics. Journal of the Brazilian Chemical Society, 31(5), 955–965. https://doi.org/10.21577/0103-5053.20190224

Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2016). ABNT NBR ISO 17827-1: Biocombustíveis sólidos — Determinação da distribuição granulométrica para combustíveis não comprimidos — Parte 1: Método do peneiramento oscilatório utilizando peneiras com abertura igual ou superior a 3,15 mm. ABNT.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2016). ABNT NBR ISO 18123: Biocombustíveis sólidos — Determinação do teor de matérias voláteis. ABNT.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2017). ABNT NBR ISO 18125: Biocombustíveis sólidos — Determinação do poder calorífico. ABNT.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2017). ABNT NBR ISO 18134-2: Biocombustíveis sólidos — Determinação do teor de umidade — Método por secagem em estufa — Parte 2: Umidade total — Método simplificado. ABNT.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2021). ABNT NBR ISO 17228: Biocombustíveis sólidos — Determinação da densidade a granel. ABNT.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2022). ABNT NBR ISO 18122: Biocombustíveis sólidos — Determinação do teor de cinzas. ABNT.

Carneiro, A. de C. O., Castro, A. F. N. M., Castro, R. V. O., Santos, R. C. dos, Ferreira, L. P., Damásio, R. A. P., & Vital, B. R. (2014). Potencial energético da madeira de Eucalyptus sp. em função da idade e de diferentes materiais genéticos. Revista Árvore, 38(2), 375–381. https://doi.org/10.1590/S0100-67622014000200019

César, A. A. da S., Bufalino, L., Tahara, A. S., Mesquita, R. G. de A., Souza, T. M. de, Andrade, L. M. F., Mori, F. A., & Mendes, L. M. (2019). Pretreated unbleached cellulose screen reject for cement-bonded fiberboards. European Journal of Wood and Wood Products, 77(4), 581–591. https://doi.org/10.1007/s00107-019-01422-x

Dias, W. A. (2021). Avanços para o desenvolvimento sustentável da indústria de papel e celulose através do gerenciamento de seus resíduos (Monografia de graduação). Universidade Federal de Uberlândia. https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/32780

Germgård, U., Sjöstrand, B., & Fiskari, J. (2023). Screening of chemical pulp: Revisiting technology options and the state-of-the-art. The Canadian Journal of Chemical Engineering, 101(10), 5643–5660. https://doi.org/10.1002/cjce.24755

Klabin. (2016). Relatório ambiental preliminar: Ampliação Unidade Puma. International Finance Corporation (IFC).

Licursi, D., Antonetti, C., Martinelli, M., Ribechini, E., Zanaboni, M., & Raspolli Galletti, A. M. (2016). Monitoring/characterization of stickies contaminants coming from a papermaking plant: Toward an innovative exploitation of the screen rejects to levulinic acid. Waste Management, 49, 469–482. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.01.026

Oliveira, K. D., Cademartori, P. H. G., Muniz, G. I. B., Luz-Junior, L. F. L., & Ávila-Neto, C. N. (2023). Biorefineries in Kraft pulp mills for biofuels production: A critical review. The Canadian Journal of Chemical Engineering, 101(5), 2403–2422. https://doi.org/10.1002/cjce.24633

Oliveira, L. H., Barbosa, P. V. G., Lima, P. A. F., Yamaji, F. M., & Sette Junior, C. R. (2017). Aproveitamento de resíduos madeireiros de Pinus sp. com diferentes granulometrias para a produção de briquetes. Revista de Ciências Agrárias, 40(3), 683–691. https://doi.org/10.19084/RCA17010

Orellana, B. B. M. A., Vale, A. T. do, Orellana, J. B. P., Chaves, B. S., & Moreira, A. C. de O. (2020). Caracterização de resíduos agroindustriais da região do Distrito Federal para fins energéticos. Energia na Agricultura, 35(1), 46–61. https://doi.org/10.17224/EnergAgric.2020v35n1p46-61

Rauzi, J., & Tschirner, U. (2022). Enzymatic glucose and xylose production from paper mill rejects. Recycling, 7(2), Article 24. https://doi.org/10.3390/recycling7020024[

Santos, J. R. S. (2020). Caracterização de resíduos madeireiros reprocessados para uso energético (Tese de doutorado). Universidade de São Paulo.

Sette Junior, C. R., Silva, M. F., Tomazello Filho, M., Yamaji, F. M., Laclau, J. P., & Gava, J. L. (2020). Does the presence of bark in the wood of fast-growing forest species significantly change the energy potential? BioEnergy Research, 13(1), 222–228. https://doi.org/10.1007/s12155-019-10091-0

Silva, M. F. (2022). Potencial energético de clones de Eucalyptus spp. provenientes de testes clonais em dois diferentes tipos de solo (Tese de doutorado). Universidade de Brasília.

Avaliação do biochar de lodo primário Kraft para descarbonização e uso no solo

Luís Henrique Cabral Barral[1]; Camila Juliana Sampaio Pereira[2]; Taís Aparecida das Neves Custódio[2]; Luiza Xavier Tomaz Lima[1]; Carlos Henrique Reis dos Santos Silva[3]; Angélica de Cássia Oliveira Carneiro[2]; João Gilberto Meza Ucella-Filho[2]

[1] Universidade Federal de Viçosa (UFV), Departamento de Engenharia Civil
[2] Universidade Federal de Viçosa (UFV), Departamento de Engenharia Florestal
[3] Universidade Federal de Viçosa (UFV), Departamento de Química

Resumo: A valorização de resíduos industriais celulósicos via pirólise surge como uma alternativa para o sequestro de carbono em matrizes recalcitrantes no solo. Desse modo, este trabalho teve como objetivo avaliar o potencial de sequestro de carbono e condicionamento do solo com base na caracterização química elementar e nas razões molares do material. A metodologia consistiu na secagem do lodo e sua pirólise a 550 °C por 45 minutos em forno-mufla, seguida de análise elementar em analisador LECO. Os resultados demonstraram elevado teor de carbono (78,756%) e reduções marcantes em hidrogênio (2,564%) e oxigênio (11,041%). As baixas razões molares H/C (0,391) e O/C (0,105) confirmaram alta estabilidade e condensação aromática, estimando permanência no solo superior a 1000 anos. A razão N/C de 0,003 atestou o caráter inerte do biochar, sem risco de emissões de N_2O. O biochar de lodo primário atua como um eficiente sumidouro de carbono, retendo água e nutrientes no solo sem gerar emissões gasosas.

Palavras-chave: Carbono Fixo; Pirólise; Resíduo Industrial.

Evaluation of Kraft primary sludge biochar for decarbonization and soil amendment

Abstract: Cellulosic industrial waste valorization through pyrolysis is a promising strategy for long-term carbon sequestration in soils. This study evaluated the carbon sequestration potential and soil-conditioning properties of primary sludge biochar based on elemental composition and molar ratios. Primary sludge was dried and pyrolyzed at 550 °C for 45 min, followed by elemental analysis. The biochar showed high carbon content (78.76%) and reduced hydrogen (2.56%) and oxygen (11.04%) contents. Low H/C (0.391) and O/C (0.105) ratios indicated high aromatic stability and an estimated soil residence time exceeding 1,000 years. The low N/C ratio (0.003) suggested an inert material with negligible N_2O emission potential. Primary sludge biochar acts as an efficient carbon sink while improving soil water and nutrient retention.

Keywords: Fixed Carbon; Pyrolisis; Industrial Waste.

1. Introdução

A crise climática global mostra a necessidade de estratégias integradas para combater o aumento da temperatura média do planeta. O Acordo de Paris estabeleceu metas jurídicas para

limitar o aquecimento global a níveis abaixo de 2°C em relação aos níveis pré-industriais, buscando ainda esforços para atingir o limite de 1,5°C. Para atingir essa meta, o 6° Relatório do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, 2023) explica que a redução das emissões de gases de efeito estufa (GEE) não será suficiente. A implementação de tecnologias em larga escala de Remoção de Dióxido de Carbono (CDR) torna-se necessária. Assim, a retenção e o armazenamento de carbono em matrizes recalcitrantes no solo surgem como alternativas promissoras e custo-benéficas de CDR disponíveis atualmente (LEHMANN & JOSEPH, 2024).

Nesse contexto, a indústria de papel e celulose enfrenta o desafio de descarbonizar suas operações e gerenciar de forma eficiente grandes volumes de resíduos sólidos (DEL RIO et.al, 2022). A produção de papel e celulose corresponde a cerca de 17% de todos os resíduos sólidos industriais gerados no mundo (HASAN et.al, 2025). No processamento da madeira pelo processo Kraft, amplos volumes de efluentes são direcionados para as Estações de Tratamento de Efluentes (ETEs) e ali, o tratamento primário por clarificação física gera um passivo denominado lodo primário. No setor de celulose e papel, o lodo é produzido principalmente por meio de métodos biológicos, mecânicos ou químicos, representando 60% do custo total do tratamento de águas residuais. (DEL RIO et.al, 2022).

Composto predominantemente por fibras celulósicas finas não retidas, hemicelulose e subprodutos da lignina associados a cargas minerais (HASAN et.al, 2025), o lodo primário é comumente destinado a aterros industriais ou à incineração. Porém, essas práticas a cada dia se tornam mais inviabilizadas pelas restrições ambientais, custos altos para a logística e a alta emissão de GEE, contrariando preceitos da economia circular.

A conversão termoquímica do lodo primário via pirólise é uma tecnologia promissora para contornar esse cenário (SUDIBYO et.al, 2025). O processo consiste na decomposição térmica da biomassa sob uma alta temperatura em um espaço com limitação de oxigênio, transformando a fração orgânica instável do resíduo em um material sólido carbonoso, poroso e quimicamente recalcitrante, o biochar (LEHMANN & JOSEPH, 2024).

Através da aplicação do biochar no solo, é viável alcançar o sequestro de carbono a longo prazo (IBI, 2015). Porém, para atestar a eficiência enquanto modelo para CDR, é necessário comprovar sua estabilidade química, grau de condensação aromática e validar os riscos de impactos ambientais (LEHMANN & JOSEPH, 2024). Nesse aspecto, a caracterização da química elementar e a determinação das razões molares H/C, O/C e N/C fornecem os indicadores para prever o tempo de permanência do carbono no solo e garantir a ausência de

emissões secundárias no ecossistema (SUDIBYO et.al, 2025). Portanto, este presente trabalho tem como objetivo avaliar o potencial do biochar derivado de lodo primário da produção de polpa celulósica Kraft para uso no solo e descarbonização.

2. Material e métodos

2.1 Obtenção e Preparo da Biomassa

O lodo primário utilizado no desenvolvimento do trabalho foi obtido em indústria de Celulose Kraft, localizada em Minas Gerais. A referida empresa processa madeira de *Eucalyptus* spp. Voltada à fabricação de polpa celulósica Kraft branqueada. No Laboratório de Painéis e Energia da Madeira (LAPEM) da Universidade Federal de Viçosa (UFV), o material foi submetido à secagem em estufa com temperatura de 105°C por 24 horas, visando a eliminação da umidade livre. Por fim, o lodo seco foi homogeneizado, em relação a granulometria, para posterior processamento térmico.

2.2. Produção do Biochar via Pirólise

A conversão termoquímica foi conduzida em forno-mufla sob atmosfera limitada oxigênio. O material foi submetido à uma temperatura de 550°C em um tempo de residência de 45 minutos, recomendado por literaturas pois essas características para a pirólise favorece a clivagem de cadeias alifáticas e a reorganização dos átomos de carbono em anéis aromáticos estáveis (SUDIBYO et.al, 2025). O biochar foi triturado e passado em peneiras granulométricas para a seleção da fração mantida entre 40 e 60 *mesh*, viabilizando a análise.

2.3. Análise de Química Elementar

A caracterização química elementar (CHONS) do biochar foi realizada em um analisador elementar TruSpec Micro (LECO). O ensaio se baseou na combustão das amostras a uma temperatura de 1050°C. Os gases gerados foram filtrados, separados de acordo com suas massas moleculares e quantificados por software específico.

O nitrogênio foi quantificado através da condução térmica, enquanto o carbono e o hidrogênio foram mensurados por detectores infravermelhos. O teor de enxofre foi determinado por meio do módulo acoplado TruSpec S. O percentual de oxigênio foi estimado por diferença, seguindo a norma EN 15296 (DIN, 2011). Por fim, as razões molares H/C, N/C e O/C foram calculadas para a análise do grau de pirólise e a estabilidade química do biochar.

2.4. Análise dos Dados

Para determinar a composição química elementar (C, H, N, S e O) foram realizadas triplicatas em busca da confiabilidade dos resultados. Os valores obtidos foram tabulados em planilha eletrônica, sendo calculadas a média aritmética e o desvio padrão para cada elemento analisado. A partir dos resultados médios da composição elementar, foram calculadas as razões molares H/C, O/C e N/C, necessárias para avaliar o grau de carbonização, a estabilidade química e o potencial de permanência do biochar no solo.

3. Resultados e discussão

A composição elementar e as razões molares verificadas para o biochar de lodo primário Kraft estão dispostas na Tabela 1 e 2, respectivamente.

Tabela 1 - Composição Elementar do biochar de lodo primário Kraft.

Composição Elementar (%)		
-	Média	Desvio Padrão
C	78,756	0,134
H	2,564	0,220
N	0,290	0,008
S	0,148	0,009
O	11,041	0,355

Tabela 2 - Razões Molares do biochar de lodo primário Kraft.

Razões Molares		
-	Média	Desvio Padrão
H/C	0,391	0,033
O/C	0,105	0,004
N/C	0,003	0,000

O processo térmico promoveu uma concentração de carbono orgânico fixado no biochar, alcançando a média de 78,756% (Tabela 1). Em termos comparativos, lodos primários *in-natura* e biomassa vegetais não tratadas tendem a apresentar teores de carbono entre 40% e 48% (HASAN et.al, 2025). Esse acréscimo é decorrente da energia fornecida durante a pirólise à 550°C superar a energia de ligação dos polímeros alifáticos da hemicelulose e celulose, retirando a fração volátil na forma de gases condensáveis e densificando o carbono na matriz sólida residual (SUDIBYO et.al, 2025).

Porém, constatou-se quedas nos teores de hidrogênio (2,564%) e oxigênio (11,041%) no biochar quando comparados aos valores típicos reportados na literatura para o lodo primário *in-natura*, os quais variam entre 5% a 7% para o hidrogênio e entre 35% a 45% para o oxigênio (DEL RIO et.al, 2022). Essa desoxigenação e desidrogenação ocorrem por reações endotérmicas de desidratação, descarbonilação (CO) e descarboxilação (CO_2) (SUDIBYO et.al, 2025). Como consequência, a remoção desses elementos diminui a polaridade do material, iniciando a condensação dos esqueletos de carbono em arranjos aromáticos contínuos (LEHMANN & JOSEPH, 2024).

Já os teores de nitrogênio (0,290%) e enxofre (0,148%) mostram ser reduzidos, quando comparados aos teores observados em lodos secundários da mesma indústria. Esses valores indicam a natureza estritamente lignocelulósica do lodo primário Kraft, diferindo do lodo secundário ou biológico, o qual apresenta altos teores de N e S provenientes da massa celular bacteriana (HETMANENKO et.al, 2025).

A relação H/C obtida para o biochar em questão foi de 0,391 (Tabela 2). Sabendo-se que a razão H/C é o principal indicador do grau de aromaticidade de matriz carbonosa, resultados abaixo de 0,4 caracterizam a conversão quase completa de cadeias alifáticas abertas em anéis aromáticos policíclicos condensados, típicos do “black carbon” (SUDIBYO et.al, 2025). Portanto, o valor atingido a 550°C mostra que o lodo primário sofreu intenso rearranjo térmico rompendo pontes alifáticas e formando redes conjugadas de estabilidade termodinâmica, o que confere alta resistência ao ataque enzimático microbiano (LEHMANN & JOSEPH, 2024).

A razão molar O/C fixou-se em 0,105, refletindo a perda substancial de grupos funcionais oxigenados hidrofílicos e a diminuição da polaridade superficial (LEHMANN & JOSEPH, 2024). Segundo as diretrizes internacionais da *International Biochar Initiative* (IBI, 2015) e do *European Biochar Certificate*, biochar que apresentam razão O/C menor que 0,2 são enquadrados na classe máxima de estabilidade química.

Assim, a junção das baixas razões H/C e O/C coloca o biochar de lodo primário em uma zona de recalcitrância excepcional. Sob a perspectiva de modelos de decaimento edáfico, materiais com essas características exibem meia-vida no solo estimada em mais de 1000 anos (SUDIBYO et.al, 2025). Isso demonstra que a pirólise a 550°C converteu com sucesso o carbono instável do resíduo em uma matriz capaz de armazenar carbono em escala geológica.

O valor obtido para a razão molar N/C de 0,003 constitui um dado determinante para fundamentar a segurança ambiental na implementação desse biochar no solo. Em solos agrícolas e florestais, a adição de resíduos orgânicos com alto teor de nitrogênio costuma

intensificar os processos microbianos de nitrificação e desnitrificação, culminando na emissão secundária de óxido nitroso (N_2O) (LEHMANN & JOSEPH, 2024) – um gás estufa no qual o potencial de aquecimento global é 272 vezes superior ao do CO_2 em 100 anos (IPCC, 2023). O baixo teor de N (0,290%) e a razão N/C de 0,003 asseguram que o biochar de lodo primário atue como um sumidouro inerte de carbono, sem fornecer substrato para a geração de N_2O ou compostos NO_x (SUDIBYO et.al, 2025).

Sob a ótica agronômica, mesmo que a adição de resíduos *in natura* com alta relação C/N possa provocar a fixação do N mineral do solo, esse fenômeno não acontece com o biochar pirolisado a 550°C. Como o seu carbono se encontra estruturado em anéis aromáticos condensados, ele não se encontra biologicamente disponível para o consumo microbiano rápido. Consequentemente, o biochar não induz à imobilização do nitrogênio nativo do solo, funcionando essencialmente como um condicionador físico e suporte estrutural para o ecossistema (HETMANENKO et.al, 2025).

O teor mínimo de enxofre (0,148%) atesta a ausência de riscos associados à acidificação secundária. Esse perfil químico limpo viabiliza o retorno seguro do biochar aos próprios solos florestais de cultivo de *Eucalyptus* sp., promovendo o fechamento do ciclo produtivo na indústria de celulose Kraft sob as diretrizes da economia circular (DEL RIO et.al, 2022).

Em adição, a desvolatilização e o rearranjo estrutural ocorridos durante a pirólise a 550 °C geram uma rede microporosa de elevada área superficial específica, a qual amplia a Capacidade de Troca Catiônica (CTC) e a retenção de água no perfil do solo (SUBIBYO et al., 2025). Essa porosidade atua como um refúgio microbiano protegido e reduz a lixiviação de nutrientes essenciais, como cálcio, magnésio e potássio, em solos tropicais altamente intemperizados (HETMANENKO et al., 2025). Dessa forma, o aproveitamento do lodo primário transita de uma gestão de resíduos para o desenvolvimento de um condicionador edáfico estratégico, unindo o sequestro prolongado de carbono ao ganho de resiliência e produtividade nos plantios florestais (DEL RIO et al., 2022; LEHMANN & JOSEPH, 2024).

4. Conclusões

A pirólise à 550°C promoveu a densificação expressiva do carbono presente no lodo primário Kraft. As baixas razões molares H/C e O/C ratificaram a formação de uma matriz aromática policíclica recalcitrante, assegurando a permanência do carbono no solo por períodos

superiores a 1000 anos. Além disso, a razão molar N/C garantiu que o biochar atue como um sumidouro inerte de carbono, sem o risco de desencadear emissões secundárias de óxido nitroso (N_2O) no solo.

Dessa forma, a conversão do lodo primário Kraft em biochar consolida uma alternativa de economia circular técnica e ambientalmente segura como ferramenta para a CDR e mitigação das mudanças climáticas, atendendo ao objetivo proposto no estudo. Como próximos passos, visa-se a realização de avaliações de ecotoxicologia em campo, visando consolidar as doses ideais de aplicação, avaliar a retenção de água e nutrientes e mapear as respostas do microbioma do solo frente ao uso contínuo desse biochar.

5. Agradecimentos

À Universidade Federal de Viçosa (UFV), ao Departamento de Engenharia Florestal (DEF), ao Laboratório de Resíduos da Indústria Florestal (LABRIF), à Fundação de Amparo à pesquisas de Minas Gerais (FAPEMIG), à Fundação de Coordenadora de Aperfeiçoamento Pessoal de Nível Superior (CAPES) ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico Tecnológico (CNPq).

6. Referências bibliográficas

Del Rio Furszyfer, D. D., Sovacool, B. K., Griffiths, S., Bazilian, M., Kim, J., Foley, A. M., & Rooney, D. (2022). Decarbonizing the pulp and paper industry: A critical and systematic review of sociotechnical developments and policy options. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 167, 112706. https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112706

Deutsches Institut für Normung. (2011). *Solid biofuels — Conversion of analytical results from one basis to another* (Norma EN 15296). Beuth Verlag.

Hasan, M. R., Islam, S., Rahman, M. M., Jameel, H., & Salem, K. S. (2025). A review on sustainable valorization of pulp and paper sludge for energy and material applications. *Next Research*, 2, 100543. https://doi.org/10.1016/j.nexres.2025.100543

Hetmanenko, V., Krylach, S., Skrylnyk, Y., & Kutova, A. (2025). Biochar from pulp and paper mill sludge: Co-pyrolysis with bentonite, nutrient retention and leachability. *AgroLife Scientific Journal*, 14(1), 89-98.

International Biochar Initiative. (2015). *Standardized product definition and product testing guidelines for biochar that is used in soil* (Version 2.1). IBI. https://biochar-international.org/characterization-standard/

IPCC. (2023). *Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (Core Writing Team, H. Lee, & J. Romero, Eds.). IPCC. https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6/9789291691647

Lehmann, J., & Joseph, S. (Eds.). (2024). *Biochar for Environmental Management: Science, Technology and Implementation* (2nd ed.). Routledge.

Sudibyo, H., Durán-Jiménez, G., Sudiyani, Y., Cahyani, A., Jupesta, J., Sadewo, B. R., Budhijanto, B., & Budiman, A. (2025). Pyrolysis of pulp and paper mill sludge: Mechanistic effects of process conditions and feldspar catalysis on product formation and biochar carbon permanence. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 185, 107376. https://doi.org/10.1016/j.jaap.2025.107376

Avaliação do comportamento térmico e combustibilidade de pellets de resíduos de poda de abacateiro

Genilson Maia Corrêa[1]; Valdenia Medeiros de Araújo[1]; Elvis Vieira dos Santos[1]; Raffael Ferreira Campideli[1]; Vinícius Rosa Moreira[1] Pedro Maranha Peche[2]; Paulo Fernando Trugilho[1]; Thiago de Paula Protásio[1]

[1]Universidade Federal de Lavras, Escola de Ciências Agrárias de Lavras, Departamento de Ciências Florestais
[2]Universidade Federal de Lavras, Escola de Ciências Agrárias de Lavras, Departamento de Agricultura

Resumo: A busca por fontes renováveis de energia tem impulsionado o uso de biomassa lignocelulósica densificada. Este trabalho teve como objetivo avaliar a composição química imediata e a eficiência de combustão de pellets produzidos a partir de resíduos de poda do abacateiro (folhas e galhos). A biomassa foi processada e peletizada, sendo os pellets submetidos a análises de materiais voláteis, cinzas e carbono fixo, além de ensaios de combustibilidade com monitoramento de temperatura e perda de massa ao longo do tempo. Os resultados evidenciaram que a origem da fração morfológica impacta diretamente a qualidade do biocombustível. Os pellets de galho apresentaram desempenho superior, atingindo pico de temperatura de 260 ºC e maior reatividade, comportamento justificado pelo seu alto teor de voláteis (79,53%) e baixo teor de cinzas (1,54%). Em contrapartida, os pellets de folha demonstraram severas limitações térmicas, com pico máximo de apenas 137 ºC e maior retenção de massa residual. Embora as folhas possuam um teor mais elevado de carbono fixo (22,16%), a sua alta carga mineral inorgânica (5,41% de cinzas) atuou como supressor térmico, prejudicando a liberação de energia. Conclui-se que a fração lenhosa (galhos) apresenta viabilidade energética significativamente superior para uso como combustível sólido, demonstrando que o processo físico de peletização isoladamente não é capaz de superar as barreiras químicas inerentes à matéria-prima foliar.

Palavras-chave: Bioenergia; Biomassa lignocelulósica; Densificação; Desempenho energético

Evaluation of thermal behavior and combustibility of pellets from avocado pruning residues

Abstract: The search for renewable energy sources has driven the use of densified lignocellulosic biomass. This study aimed to evaluate the proximate chemical composition and combustion efficiency of pellets produced from avocado pruning residues (leaves and branches). The biomass was processed and pelletized, and the pellets were subjected to proximate analysis (volatile matter, ash, and fixed carbon) and combustibility tests with monitoring of temperature and mass loss over time. The results showed that the origin of the morphological fraction directly impacts the biofuel quality. Branch pellets showed superior performance, reaching a peak temperature of 260 ºC and higher reactivity, a behavior justified by their high volatile content (79.53%) and low ash content (1.54%). In contrast, leaf pellets demonstrated severe thermal limitations, with a maximum peak of only 137 ºC and greater retention of residual mass. Although leaves have a higher fixed carbon content (22.16%), their high inorganic mineral load (5.41% ash) acted as a thermal suppressor, hindering energy release. It is concluded that the woody fraction (branches) presents significantly superior energetic viability for use as a solid fuel, demonstrating that the physical pelletization process alone cannot overcome the chemical barriers inherent to leaf raw material

Keywords: Bioenergy; Lignocellulosic biomass; Densification; Energetic performance

1. Introdução

A busca por fontes de energia renováveis e neutras e carbono intensificou-se nas últimas décadas como resposta direta à necessidade global de substituir combustíveis fósseis e mitigar as mudanças climáticas (Senneca & Cerciello, 2023). A biomassa lignocelulósica bruta, embora abundante e de baixo custo, apresenta características físicas desfavoráveis para processos industriais, como baixa densidade energética, teor de umidade variável, propriedades higroscópicas e alta heterogeneidade, gerando sérias limitações no transporte, estocagem e estabilidade de chama (Rupasinghe et al., 2023).

O processo de peletização resolve essas limitações por meio da densificação mecânica, onde a biomassa semi-seca, previamente moída até uma granulometria fina, é forçada sob alta pressão e temperatura através de matrizes perfuradas (Arora et al., 2025). Durante a extrusão mecânica, o calor gerado pelo atrito ativa a lignina nativa da parede celular da biomassa, que atua como agente aglutinante natural responsável por manter a integridade física e a alta durabilidade do pellet resultante.

As propriedades e a qualidade do biocombustível sólido podem ser influenciadas por fatores relacionados à matéria-prima e ao processo (Zhang et al., 2018). Assim, torna-se importante avaliar o seu comportamento durante o processo de combustão. Os testes de combustibilidade ajudam a avaliar propriedades especificas, como tamanho de partícula, distribuição de forma e reatividade, que são vitais para prever o comportamento da combustão (Korbee et al., 2003).

Esse comportamento de combustão é influenciado por características físico-químicas e macromoleculares da biomassa, as quais são mapeadas de forma prática através da análise química imediata (teores de materiais voláteis, carbono fixo e cinzas) (Garcia et al., 2019). Enquanto os materiais voláteis e as frações estruturais de celulose e hemiceluloses promovem a desvolatilização e ignição na fase gasosa, a lignina e o carbono fixo atuam na manutenção da queima heterogênea da fração sólida. Em contrapartida, o teor de cinzas representa a fração mineral que pode comprometer a reatividade e a estabilidade térmica dos pellets.

Embora o teste de combustibilidade seja essencial para otimizar o desempenho do combustível, também é importante reconhecer que os resultados podem variar significativamente entre os diferentes tipos de combustível, exigindo abordagens de testes

personalizados para cada tipo de combustível. Dessa maneira, o objetivo deste trabalho foi avaliar a eficiência de combustão e a composição química imediata de pellets de resíduos de biomassa lignocelulósica.

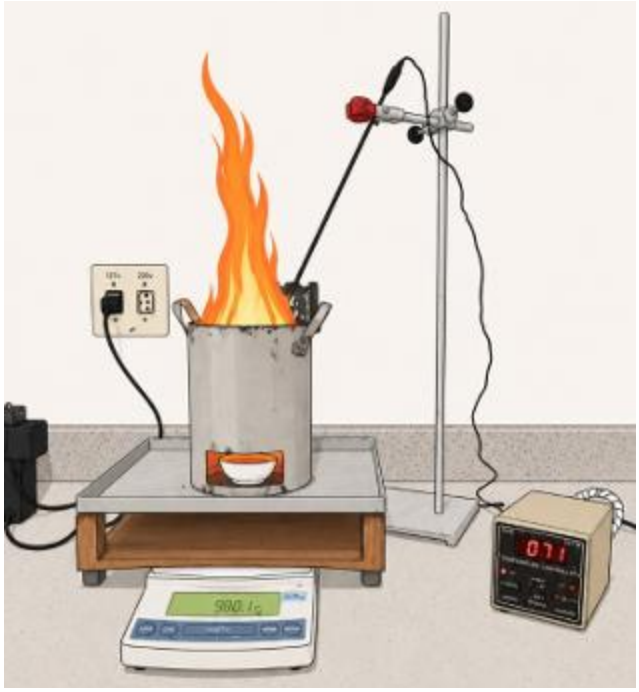
2. Material e métodos

Este trabalho utilizou resíduos provenientes da poda do abacateiro (*Persea americana*) – galhos e folhas, coletados no setor de fruticultura da Universidade Federal de Lavras – MG. A biomassa foi separada, moída e classificada em peneira de 4 mesh para padronização das partículas. Os pellets foram produzidos em peletizadora de escala laboratorial da marca ENG -MAQ modelo ENG 0200V com capacidade de produção de 110 kg/h com canais de compressão de 6mm.

A análise química imediata foi realizada utilizando 1 g de pellets moídos para cada repetição, sendo duas repetições em triplicata e, posteriormente secas em estufa a 103 ± 2 ºC para obtenção da massa seca. A determinação dos materiais voláteis e cinzas foi realizada em forno elétrico tipo mufla, conforme a norma D 1762-84 (ASTM D1762 – 84, 2021). O teor de carbono fixo foi obtido por diferença (100 – (Cinzas % + Voláteis %)).

O ensaio de combustibilidade seguiu o método proposto por Setter et al. (2020). Foram utilizados aproximadamente 50 g dos pellets que foram produzidos a partir das folhas e galhos de abacate. Os pellets foram colocados em combustor, e utilizado 20 g de etanol em recipiente para a ignição inicial e 10 g de etanol foram adicionados em cima dos pellets dentro do combustor. Todo o etanol foi consumido não influenciando nos resultados. A duração do teste foi de aproximadamente 15 minutos, e os dados de massa e temperatura foram coletados a cada minuto. Os dados registrados foram processados para construir as curvas de massa versus tempo e temperatura versus tempo. O teste de combustibilidade é demostrado na Figura 1.

Figura 1 – Teste de combustibilidade.



Fonte: Autor (2026)

3. Resultados e discussão

Os resultados da análise química imediata dos pellets de folhas e galhos de abacate estão apresentados na Tabela 1, e apresentaram variações significativas na composição e que influenciam na qualidade do combustível sólido.

Tabela 1 – Composição química imediata dos pellets

Pellets	TMV (%)	TCz (%)	TCF (%)
Folha de abacate	72,43	5,41	22,16
Galho de abacate	79,53	1,54	18,93

TMV: teor de materiais voláteis; TCz: teor de cinzas; TCF: teor de carbono fixo

Os pellets produzidos a partir de folhas de abacateiro apresentaram teor de cinzas de 5,41% valor aproximadamente 3 vezes superior ao observado nos pellets de galho (1,54%). Em contrapartida, a fração lenhosa (galho) destacou-se pelo maior teor de materiais voláteis (79,53%) em relação aos pellets de folha (72,43%). Quanto ao teor de carbono fixo, os pellets de folhas exibiram percentual mais elevado (22,16%) quando comparados aos pellets de galho (18,93%), evidenciando que, embora a folha detenha quantidade expressiva de carbono

remanescente na matriz sólida, ela também carrega carga mineral inorgânica consideravelmente maior.

O comportamento de combustão de materiais lignocelulósicos é influenciado por um conjunto de características físicas e químicas, tais como a composição macromolecular (celulose, hemiceluloses e lignina), a composição elementar (CHNS-O), o teor de cinzas, a umidade, a área superficial e a densidade aparente. Sabe-se que as hemiceluloses e a celulose são os principais componentes que contribuem para a desvolatilização inicial, favorecendo o rendimento e a liberação de gases voláteis. Por outro lado, a lignina, devido à sua maior estabilidade térmica, atua majoritariamente no rendimento da fração sólida e na manutenção da queima heterogênea. No que tange à composição elementar, a presença de hidrogênio e oxigênio na estrutura da biomassa contribui diretamente para os mecanismos de ignição no início do processo de combustão (Garcia et al., 2019).

O perfil térmico obtido durante o ensaio de combustibilidade (Figura 2) revelou expressiva diferença na liberação de calor entre os pellets. Os pellets produzidos a partir do galho demonstraram maior reatividade e capacidade de liberação energética, atingindo o pico de temperatura máxima de aproximadamente 260 ºC logo aos 3 minutos de ensaio. Em contrapartida, os pellets de folha apresentaram severa limitação térmica, alcançando o ápice de apenas 137 ºC aos 4 minutos de queima. Ambas as curvas demonstraram declínio gradual de temperatura após os respectivos picos, convergindo para o equilíbrio térmico próximo aos 14 minutos, evidenciando que a fração lenhosa (galho) possui propriedades que favorecem a combustão significativamente mais intensa.

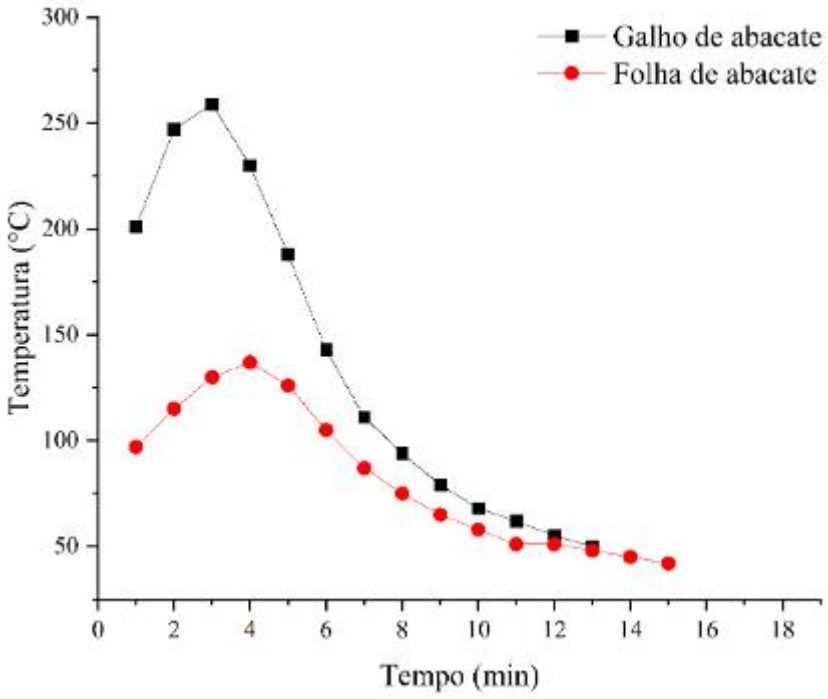


Figura 2 – Temperatura atingida durante a combustão dos pellets de galho e folhas de abacate.

O pico de temperatura superior alcançado pelos pellets de galho (260ºC) é plenamente justificado pela sua composição imediata apresentada na Tabela 1. A fração lenhosa possui o maior teor de materiais voláteis (79,53%) e o menor teor de cinzas (1,54%). Como destacado por Santos et al. (2013), a maior proporção de voláteis permite que a biomassa inflame mais facilmente, acelerando a reação de oxidação. Por outro lado, a limitação térmica dos pellets de folha reflete o seu menor teor de voláteis, somado ao alto teor de cinzas (5,41%), que não contribuem para a geração de calor.

A cinética de degradação térmica e o consumo dos combustíveis sólidos ao longo do tempo foram determinados por meio do ensaio de perda de massa (Figura 3). Observou-se que ambos os pellets apresentaram comportamento acentuado de redução de massa nos instantes iniciais, característico do processo de ignição. Contudo, os pellets de galho exibiram a taxa de consumo mais veloz e drástica, decaindo para cerca de 50% de sua massa remanescente no segundo minuto e estabilizando abaixo de 20% após o quarto minuto de ensaio. Os pellets de folha, embora também tenham sofrido degradação acelerada no início, demonstraram a perda de massa ligeiramente mais gradual e retiveram percentual de massa residual sutilmente superior ao longo de quase todo o monitoramento.

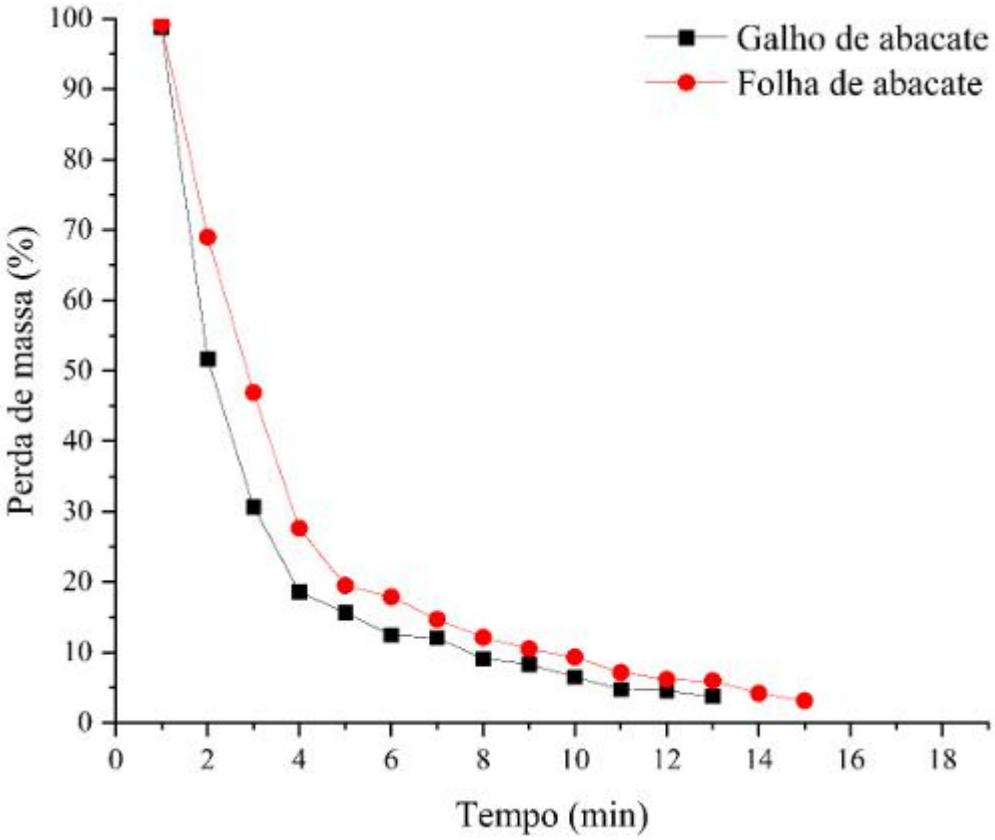


Figura 3 – Perda de massa em função do tempo dos pellets de galho e folhas de abacate

Essa degradação mais gradual e a maior retenção de massa dos pellets de folha (Figura 3) também são consequências diretas de sua composição química. As folhas carregam carga mineral inorgânica significativamente maior (5,41% de cinzas) que não é consumida na queima. Além disso, o seu teor de carbono fixo (22,16%) demanda mais tempo para ser oxidado na fase heterogênea da combustão, resultando em percentual de massa remanescente superior ao dos pellets de galho, que apresentaram consumo mais veloz e drástico.

Apesar da literatura apontar que materiais com alto teor de carbono fixo deveriam liberar energia por mais tempo (Bersch et al., 2018), observou-se no presente estudo que os pellets de folhas tiveram desempenho térmico inferior, mesmo detendo teor elevado de carbono fixo (22,16%). Esse fenômeno evidencia o efeito das cinzas no processo, o alto teor de minerais presentes nas folhas causa problemas na ignição e reduz a temperatura de combustão (Demibras, 20014). Consequentemente, essa elevada carga orgânica dificulta a queima, impedindo que o potencial energético do carbono fixo das folhas seja plenamente aproveitado.

O perfil de combustão dos pellets é pouco relatado na literatura, no entanto, é evidente que o processo de peletização da biomassa pode aumentar o tempo de combustão de

combustíveis sólidos, permitindo que a liberação de calor se prolongue quando comparado com a biomassa a granel (Setter et al., 2020). Combustíveis sólidos densificados apresentam maiores densidades a granel, o que reduz a taxa de desvolatilização durante a combustão e prolonga o tempo de queima do material (Shan et al., 2017).

4. Conclusões

O presente trabalho demonstrou que os pellets dos resíduos da poda do abacate influenciam diretamente a eficiência de combustão dos pellets.

Os pellets produzidos com os galhos apresentam viabilidade energética superior, sendo a melhor alternativa para a geração de calor. O desempenho dos galhos, evidenciado pelo pico de temperatura mais elevado e pela queima mais intensa, é justificado pela sua composição química, que combina alto teor de matérias voláteis e baixa quantidade de cinzas.

Em contrapartida, os pellets produzidos a partir das folhas do abacateiro apresentam limitações térmicas. Conclui-se que, apesar das folhas possuírem elevado teor de carbono fixo, o seu alto conteúdo mineral (cinzas) atua como supressor térmico, prejudicando a liberação de energia e gerando maior resíduo de massa não consumida.

Portanto, fica evidente que o processo físico de peletização, por si só, não é suficiente para superar as barreiras químicas inerentes à matéria-prima foliar.

5. Agradecimentos

Os autores agradecem ao Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia em Tecnologias da Madeira da Amazônia (INCT Madeiras da Amazônia – Processo CNPq 408800/2024-0) e ao Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia em Biorrefinaria de Materiais Lignocelulósicos (INCT InovaLigno - Processo CNPq 408984/2024-4). Agradecemos, ainda, ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia da Madeira (PPGCTM) e à Universidade Federal de Lavras (UFLA). Os autores também expressam seu agradecimento ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES).

6. Referências bibliográficas

Arora, J. K., Bakshi, D. K., Alkesh, & Singh, M. (2025). Production and characterization of fuel pellets from *Lantana camara* and *Emblica officinalis* pomace biomass combinations. *Journal of the Indian Academy of Wood Science, 22*(1), 50–56. https://doi.org/10.1007/s13196-024-00359-w

ASTM International. (2021). *Standard test method for chemical analysis of wood charcoal* (ASTM D1762-84).

Garcia, D. P., Caraschi, J. C., Ventorim, G., Vieira, F. H. A., & de Paula Protásio, T. (2019). Assessment of plant biomass for pellet production using multivariate statistics (PCA and HCA). *Renewable Energy, 139*, 796–805. https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.02.103

Korbee, R., Boersma, A. R., Cieplik, M. K., Slort, D. J., & Kiel, J. H. A. (2003). *Fuel characterisation and test methods for biomass co-firing*.

Rupasinghe, R. L., Perera, P., Bandara, R., Amarasekera, H., & Vlosky, R. (2024). Insights into properties of biomass energy pellets made from mixtures of woody and non-woody biomass: A meta-analysis. *Energies, 17*(1), 54. https://doi.org/10.3390/en17010054

Senneca, O., & Cerciello, F. (2023). Kinetics of combustion of lignocellulosic biomass: Recent research and critical issues. *Fuel, 347*, 128310. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2023.128310

Setter, C., Borges, F. A., Cardoso, C. R., Mendes, R. F., & Oliveira, T. J. P. (2020). Energy quality of pellets produced from coffee residue: Characterization of the products obtained via slow pyrolysis. *Industrial Crops and Products, 154*, 112731. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2020.112731

Shan, F., Lin, Q., Zhou, K., Wu, Y., Fu, W., Zhang, P., Song, L., Shao, C., & Yi, B. (2017). An experimental study of ignition and combustion of single biomass pellets in air and oxy-fuel. *Fuel, 188*, 277–284. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2016.09.069

Zhang, G., Sun, Y., & Xu, Y. (2018). Review of briquette binders and briquetting mechanism. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 82*, 477–487. https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.09.072

Avaliação do potencial das sementes de *Geoffroea spinosa* para obtenção de compostos químicos renováveis via pirólise rápida

Ivaneide Maria da Silva Barbosa[1]; Ageu da Silva Monteiro Freire[1]; Gabriel Joaquim Santos Silva[1] ; Grazielle Melo de Oliveira[1]; Júlio de Andrade Oliveira Marques[1]; Isabelle Mariane de Lima Ferreira [1]; Renata Martins Braga[1]

[1] Universidade Federal do Rio Grande do Norte 01

Resumo: A busca por fontes de energia renováveis visa mitigar impactos ambientais e reduzir a dependência dos combustíveis fósseis. A biomassa de *Geoffroea spinosa* surge como uma alternativa promissora devido à sua disponibilidade no semiárido e potencial para conversão termoquímica. Este trabalho avaliou o potencial das sementes de *G. spinosa* para obtenção de produtos químicos renováveis via pirólise rápida. A amostragem passou por análise imediata e pirólise rápida analítica (Py-GC/MS) a 500 °C. A análise imediata revelou teores adequados de umidade (9,94% ±0,30) e baixos teores de cinzas (1,37% ±0,09), parâmetros favoráveis para processos de conversão térmica. O elevado teor de materiais voláteis (87,05% ±2,11) indicou alta reatividade térmica e potencial para produção de vapores condensáveis, enquanto o baixo teor de carbono fixo (0,31% ±0,23) apontou menor rendimento em biocarvão. A caracterização química dos vapores da pirólise demonstrou a formação de 82% de compostos oxigenados, 11% de hidrocarbonetos e 7% de compostos nitrogenados. Na fração oxigenada, destacou-se a predominância de cetonas (51,7%), seguidas de éteres, álcoois e ácidos carboxílicos (39,9%). A elevada presença de compostos oxigenados ressalta a necessidade de etapas posteriores de *upgrading* catalítico (como desoxigenação) para otimizar o poder calorífico e a estabilidade do bio-óleo. Assim, a *Geoffroea spinosa* destaca-se como uma biomassa promissora a ser explorada para a obtenção de biocombustíveis, condicionada a etapas de aprimoramento catalítico.

Palavras-chave: Biocombustíveis; Análise imediata; Py-GC/MS

Evaluation of the potential of *Geoffroea spinosa* seeds for obtaining renewable chemical compounds via fast Pyrolysis

Abstract: Biofuels; Proximate analysis; Py-GC/MS

Keywords: The search for renewable energy sources aims to mitigate environmental impacts and reduce dependence on fossil fuels. *Geoffroea spinosa* biomass emerges as a promising alternative due to its availability in semi-arid regions and its potential for thermochemical conversion. This study evaluated the potential of *G. spinosa* seeds for producing renewable chemicals via fast pyrolysis. The samples underwent proximate analysis and analytical fast pyrolysis (Py-GC/MS) at 500 °C. Proximate analysis revealed suitable moisture content (9.94% ±0.30) and low ash content (1.37% ±0.09)—parameters favorable for thermal conversion processes. The high volatile matter content (87.05% ±2.11) indicated high thermal reactivity and potential for producing condensable vapors, while the low fixed carbon content (0.31% ±0.23) pointed to a lower biochar yield. Chemical characterization of the pyrolysis vapors

showed the formation of 82% oxygenated compounds, 11% hydrocarbons, and 7% nitrogenous compounds. Within the oxygenated fraction, ketones predominated (51.7%), followed by ethers, alcohols, and carboxylic acids (39.9%). The high presence of oxygenated compounds highlights the need for subsequent catalytic upgrading steps (such as deoxygenation) to optimize the bio-oil's calorific value and stability. Thus, *Geoffroea spinosa* stands out as a promising biomass source for biofuel production, subject to catalytic upgrading processes.

1. Introdução

A matriz energética mundial ainda apresenta forte dependência de combustíveis fósseis, cuja utilização é relacionada à emissão de gases de efeito estufa e intensificação de impactos ambientais. Nesse contexto, novas alternativas de energia têm sido desenvolvidas com o objetivo de promover a sustentabilidade e diversificar a matriz energética com a valorização de fontes renováveis (FERREIRA; FURTADO, 2024; OLIVEIRA; JUNGER, 2020). Novas fontes de energia apresentam potencial para minimizar os impactos ambientais, destacando-se, entre elas, aquelas provenientes da biomassa (GOLDEMBERG; LUCON, 2007), pois promovem maior equilíbrio no ciclo de carbono, no qual o dióxido de carbono (CO_2) é liberado durante o processo de conversão energética, sendo parcialmente compensado pelo carbono previamente fixado durante o crescimento vegetal. (DEMIRBAS, 2009).

A biomassa vegetal constitui uma importante fonte de energia renovável, sendo composta por polímeros estruturais: celulose, hemicelulose e lignina, apresentando um elevado potencial para conversão em produtos energéticos por meios de diferentes rotas de aproveitamento (DEMIRBAS, 2004). Uma diferenciação entre os combustíveis fosseis e as biomassas está associado ao caráter renovável desta última, associado à capacidade regenerativa dos recursos naturais fotossintéticos, processo no qual ocorre a fixação do dióxido de carbono (CO_2) atmosférico. Embora com a conversão energética da biomassa resulte em emissão de carbono, também parte dele foi capturada contribuindo para um ciclo mais equilibrado quando comparado dos usos dos combustíveis fosseis. (GOLDEMBERG; LUCON, 2007).

Nesse cenário, os biocombustíveis obtidos a partir de biomassas vegetais têm recebido destaque por apresentarem potencial para substituir parcial ou totalmente derivados do petróleo em diferentes setores energéticos. A *Geoffroea spinosa* surge como uma espécie promissora para aplicações energéticas devido à sua ampla distribuição em regiões semiáridas, elevada disponibilidade de biomassa e composição lignocelulósica favorável à conversão termoquímica. Além disso, o aproveitamento dessa espécie pode contribuir para a valorização de recursos vegetais nativos e para a diversificação das fontes renováveis destinadas à produção

de biocombustíveis, fortalecendo estratégias voltadas à transição energética e ao desenvolvimento sustentável (DEMIRBAS, 2004).

Nesse sentido, a *Geoffroea spinosa* apresenta características que justificam sua investigação como matéria-prima para processos de pirólise, a espécie produz biomassa passível de aproveitamento energético, contribuindo para a valorização de recursos vegetais nativos e para o desenvolvimento de alternativas sustentáveis de geração de energia LIMA JÚNIOR et al. (2015). Entre as rotas de conversão disponíveis, os processos termoquímicos destacam-se pela capacidade de transformar materiais lignocelulósicos em produtos de maior valor agregado, ampliando as possibilidades de aproveitamento energético da biomassa (MCKENDRY, 2002). Dentre esses processos, a pirólise se sobressai como uma tecnologia promissora para a produção de biocombustíveis e produtos químicos renováveis.

A pirólise consiste na decomposição térmica de materiais orgânicos na ausência ou em condições limitadas de oxigênio, resultando na formação de frações: gases condensáveis, biocarvão e gases não condensáveis (BRIDGWATER, 2012; MOHAN et al., 2006). Dentre esses produtos, a pirólise se destaca por suas condições operacionais, que favorecem a formação da fração volátil condensável, resultando na produção de bio-óleo. Além de sua relevância científica, o aproveitamento de biomassas vegetais nativas contribui para estratégias de transição energética e bioeconomia, estando alinhado aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), especialmente os ODS 7, 12 e 13, bem como às políticas públicas brasileiras voltadas à expansão dos biocombustíveis e à descarbonização da matriz energética. Nesse contexto, este estudo teve como objetivo avaliar o potencial das sementes de *Geoffroea spinosa* como matéria-prima para pirólise rápida analítica, por meio da caracterização dos produtos condensáveis obtidos por Py-GC/MS.

2. Material e métodos

2.1. Coleta de material

Os frutos de *Geoffroea spinosa* foram coletados em uma população da espécie, em fragmento de Caatinga, localizado na Escola Agrícola de Jundiaí, no Município de Macaíba-RN, nas coordenadas geográficas 5°53'02.7"S e 35°22'06.2"W. Após a coleta, os frutos (Figuras 1a,b,c, d) foram devidamente higienizados em água corrente, despolpados e as sementes foram secadas em estufa com circulação de ar (SOLAB) a 60 °C durante 48h. Depois, foi passada em moinho de facas tipo Willey, granulometria média de 2 mm para a realização da pirólise convencional.

Figura 1. Etapas de preparo das sementes para a realização da pirólise rápida analítica: (a) fruto; (b) sementes após o despolpamento; (c) sementes preparadas para secagem; e (d) sementes após a moagem.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

2.2. Caracterização por análise imediata

A análise imediata da biomassa foi realizada com base na determinação dos teores (%) de umidade, voláteis, cinzas e carbono fixo, seguindo procedimentos padronizados da ASTM "American Society for Testing and Materials". O teor da umidade baseado na ASTM E871-82 (reaprovada em 2019) foi obtido pela secagem da amostra em estufa com circulação de ar forçado, mantida a 105± 1 °C, até a obtenção de massa constante. A pesagem foi realizada em balança analítica de precisão (SOLAB), permitindo determinar a fração de umidade presente na biomassa, parâmetro essencial para avaliação da eficiência energética. Seguindo a recomendação de que as análises sejam realizadas em triplicata, ou pelo menos duplicata para garantir a repetitividade dos resultados. Nesse trabalho de caracterização as análises foram realizadas em triplicata. Para o cálculo do percentual de umidade a Equação 1 foi utilizada.

Para a determinação do teor (%) de umidade foi utilizada a Equação

$$U\,(\%) = \frac{M_{inicial} - m_{final}}{m_{inicial}} \times 100$$

Em que: Mi: Massa inicial da amostra (g); Mf: Massa final da amostra (g).

O teor de voláteis foi determinado pelo aquecimento da amostra em cadinhos de porcelana, em mufla a 50 °C por 7 minutos, em atmosfera controlada, quantificando a liberação de compostos gasoso combustíveis. Essa metodologia é utilizada para determinar o teor percentual de vapores liberados na decomposição da biomassa baseado na ASTM E872- 82 (Reaprovada em 2019), para o cálculo do percentual de voláteis, a Equação 02 foi utilizada:

O teor de voláteis foi determinado pela equação

Equação 02

$$\text{Voláteis (\%)} = \frac{m_{\text{seca}} - m_{\text{resíduo.}}}{m_{\text{seca}}} \times 100$$

Em que: Massa da amostra seca: mseca Massa do resíduo após aquecimento

O teor de cinzas foi obtido pela combustão completa da amostra em mufla 600 °C por 3 horas, procedimento que permite quantificar a fração mineral inorgânica residual. Para esta análise também foram utilizados cadinhos de porcelana e balança analítica. O valor das cinzas indica a quantidade materiais minerais presentes e a tendência da biomassa em causar incrustações ou desgastes em equipamentos térmicos. A metodologia segue os procedimentos da ASTM E1755-01 (Reaprovada em 2020). Para o cálculo do percentual de cinzas, a Equação 03 foi utilizada:

O teor de Cinzas pode ser calculado usando a seguinte equação

Equação 03

$$\%\ Cinza = \frac{m_{final} - m_{cad.}}{m_{inicial} - m_{cad.}} \times 100$$

Em que: m_{cinzas} é a massa de cinzas encontrada no final e $m_{amostra}$ é a massa da amostra seca que foi colocada no forno da primeira vez. O carbono fixo foi calculado de forma indireta, a partir da diferença entre 100% e a soma dos teores de umidade, cinzas e voláteis. Seguindo os procedimentos da ASTM E870- 82 (Reaprovada em 2019). Uma observação importante é que as porcentagens de umidade, cinzas e voláteis devem estar na mesma base de referência em relação à umidade.

2.3. Análises realizadas: Pirólise Rápida Analítica

A pirólise rápida foi realizada em micropirolisador Pyroprobe 5200 HP-R Analytical, a temperatura de pirólise foi de 500°C, com taxa de aquecimento de 10,0 °C ms^{-1} e tempo de retenção de 20 s. Foram utilizada 2 mg da amostra, que foram acondicionadas em tubos de quartzo com lã de vidro, nas extremidades como suporte. O tubo foi inserido no sistema de pirólise, que realizou a decomposição térmica da amostra. Os vapores gerados foram conduzidos a um sistema de aprisionamento contendo Tenax, aonde foram dessorvidos a 300°C. Em seguida, os compostos foram conduzidos a um sistema GC/MS (cromatografia gasosa acoplada à espectrometria de massas), integrado por um cromatógrafo gasoso Varian 3900, equipado com coluna cromatográfica VF-5ms (30 m × 0,25 mm × 0,25 µm), acoplado ao espectrômetro de massas Saturn 2100T Varian, possibilitando a separação, identificação e quantificação dos compostos.

A identificação dos compostos foi realizada por comparação com biblioteca NIST e conforme descrito por Calixto *et al*. (2025) permitindo a determinação da composição química e a classificação dos produtos formados. Os compostos presentes na fração condensável foram inicialmente identificados no software do equipamento por comparação dos espectros de massas com auxílio da biblioteca NIST, adotando um índice de similaridade superior a 90%, conforme metodologia descrita por Calixto et al. (2025). Em seguida, foi realizada a análise semiquantitativa por normalização das áreas relativas dos picos cromatográficos, possibilitando a estimativa da participação relativa de cada composto e a determinação da composição química dos produtos gerados via pirólise.

3. Resultados e discussão

A distribuição dos compostos químicos presentes no bio-óleo mostrou predominância de compostos oxigenados (82%), seguidos por hidrocarbonetos (11%) e compostos nitrogenados (7%). (Gráfico 1)

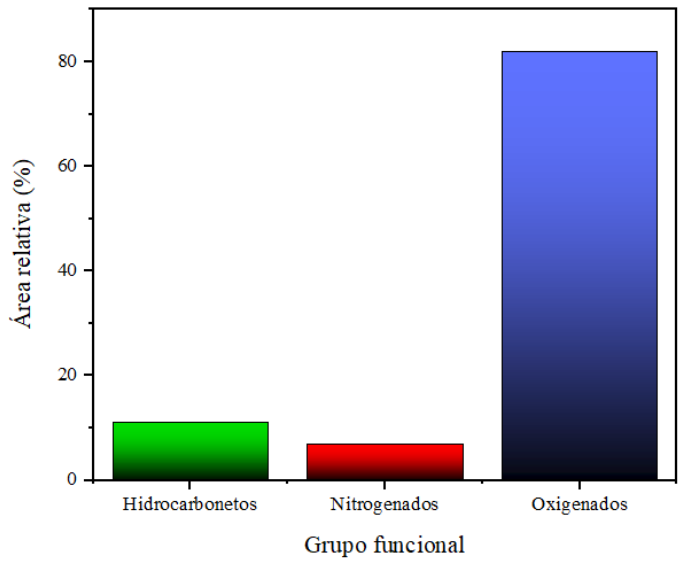


Gráfico 1. Distribuição por grupos químicos

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

A presença de hidrocarbonetos é particularmente interessante do ponto de vista energético, uma vez que esses compostos apresentam elevado poder calorífico e características mais próximas às encontradas nos combustíveis fósseis convencionais. Por outro lado, os compostos nitrogenados são menos desejáveis, pois podem contribuir para a formação de óxidos de nitrogênio (NOx) durante a combustão, além de afetarem negativamente a qualidade do combustível. O elevado teor de compostos oxigenados obtido na pirólise das sementes de

Geoffroea spinosa representa um desafio para a utilização direta do bio-óleo como combustível. Isso ocorre porque a presença dessas moléculas está frequentemente associada a características indesejáveis, como maior acidez, menor estabilidade durante o armazenamento e redução do poder calorífico quando comparado aos combustíveis derivados do petróleo (BRIDGWATER, 2012; MOHAN *et al*., 2006). No entanto, esse resultado não deve ser interpretado apenas como uma limitação. Na realidade, a elevada concentração de compostos oxigenados evidencia o potencial do bio-óleo para etapas posteriores de upgrading, nas quais sua composição pode ser modificada e aprimorada. (Tabela 1).

Tabela. 1 Distribuição percentual das subdivisões de compostos

Subdivisão (Oxigenados)	**(%) oxigenados**	**(%) no total**
Cetonas	51,7	41,7
Demais classes principais (Éter, Álcoois, Ácido carboxílico)[1]	39,9	32,3
Classes minoritárias (Éster, Fenol, Aldeído)[2]	8,4	6,7
Total	100,0	80,7

Fonte: Elaborada pelo autor (2026).

[1] Classes com participação individual superior a 10% da fração oxigenada.

[2] Classes com participação individual inferior a 5% da fração oxigenada.

Nesse contexto, a aplicação de catalisadores em processos de desoxigenação destaca-se como uma estratégia promissora para melhorar a qualidade do produto obtido. Reações como hidrodesoxigenação, descarboxilação e descarbonilação promovem a remoção seletiva do oxigênio presente nas moléculas orgânicas, reduzindo características indesejáveis, como elevada acidez e instabilidade química, enquanto favorecem a formação de hidrocarbonetos e o aumento da densidade energética (ALVES et al., 2026).

A incorporação de tratamentos catalíticos adequados tem potencial para gerar uma mistura mais estável e energeticamente eficiente, com propriedades físico-químicas mais próximas às dos combustíveis fósseis e maior potencial de aplicação na infraestrutura energética já existente. As amostras da análise imediata da biomassa apresentaram resultados satisfatórios, pois, de acordo com Demirbas (2004), valores de umidade inferiores a 15% são ideais para maior eficiência energética. Os teores de umidade obtidos apresentaram média de 9,94% (±0,30)**,** ou seja, dentro do que é considerado uma faixa adequada para processos termoquímicos. O baixo percentual no

teor de cinzas apresentou média de 1,37% (±0,09) também está de acordo com McKendry (2002), que relata que biomassas lignocelulósicas apresentam valores inferiores a 5%, o que favorece sua utilização em processos de conversão térmica. A caracterização dos materiais voláteis refere-se à fração da biomassa que, no processo de volatilização durante o aquecimento na ausência de oxigênio, apresenta reatividade térmica. O alto percentual de materiais voláteis apresentou média de 87,05% (±2,11) superior ao de algumas biomassas florestais, indicando maior potencial para a produção de bio-óleo e gases durante a pirólise (Demirbas, 2004; Bridgwater, 2012). A caracterização do carbono fixo corresponde a uma fração sólida residual que ocorre após a liberação dos voláteis, no processo de uma decomposição vagarosa. Em contraste, o baixo teor de carbono fixo apresentou média de 0,31% (±0,23), indicando menor rendimento na produção de biocarvão quando comparado a espécies com maior fração de carbono (McKendry, 2002) (Tabela 2).

Tabela. 2 Análise imediata da biomassa de sementes de umari (*Geoffroea spinosa*), expressa em teores de umidade (%), cinzas (%), materiais voláteis (%) e carbono fixo (%).

Umidade (%)	Teor de Cinzas (%)	Voláteis (%)	Carbono fixo (%)
10,25	1,45	87,72	0,58
9,92	1,28	84,64	0,16
9,65	1,37	88,79	0,19

Fonte: Elabora pelo autor (2026).

4. Conclusões

Os resultados obtidos demonstram que as sementes de *Geoffroea spinosa* apresentam propriedades importantes para a caracterização da biomassa e para uma possível aplicação futura em processos de conversão termoquímica, evidenciando sua viabilidade como matéria-prima. Esta análise constitui uma etapa importante, na qual se buscou compreender as propriedades físicas e químicas da biomassa, sendo avaliados parâmetros de interesse como teor de umidade, cinzas, materiais voláteis e carbono fixo.

Os resultados da análise imediata evidenciaram baixos teores de umidade (9,65% a 10,25%) e cinzas (1,27% a 1,45%), além de elevado teor de materiais voláteis (≈88%). Esses parâmetros são importantes para a caracterização da biomassa, pois influenciam diretamente seu comportamento durante processos térmicos, contribuindo para a compreensão de sua estabilidade, reatividade e composição. Assim, a análise dos materiais voláteis da biomassa da semente da espécie florestal *Geoffroea spinosa* revelou elevados teores, o que indica alta

reatividade térmica e maior eficiência energética no processo de combustão. Entretanto, os baixos teores de carbono fixo apontam para menor rendimento na produção de carvão vegetal. A análise da composição química dos produtos da pirólise revelou a predominância de compostos oxigenados, característica comum de bio-óleos produzidos por pirólise convencional de biomassas lignocelulósicas. Embora essa composição limite sua utilização direta como combustível, ela indica a necessidade de etapas subsequentes de *upgrading* para melhorar suas propriedades físico-químicas. Nesse sentido, a aplicação de processos catalíticos de desoxigenação surge como uma estratégia promissora para aumentar a fração de hidrocarbonetos e adequar o produto às especificações exigidas para uso energético. Assim, a *Geoffroea spinosa* destaca-se como uma biomassa promissora a ser explorada para a obtenção de biocombustíveis, condicionada a etapas de aprimoramento catalítico.

5. Agradecimentos

Agradecimentos a Universidade Federal do Rio Grande do Norte, UFRN-EAJ, à professora e orientadora Dra. Renata Braga e ao Laboratório de Tecnologia Ambiental - LABTAM e Laboratório de Bioenergia Captura e Conversão de CO_2 - LABEC envolvidos pelo suporte técnico e infraestrutura disponibilizada.

6. Referências bibliográficas

ALVES, José Luiz Francisco; DE DEUS JUNIOR, Joemil Oliveira; DE OLIVEIRA, Gislane Pinho; DE ANDRADE OLIVEIRA MARQUES, Júlio; DE ARAÚJO, Tomaz Rodrigues; DE SOUZA, Lídia Gabriela Rodrigues; MELO, Dulce Maria de Araújo; BRAGA, Renata Martins. Screening of alternative catalysts for upgrading pyrolysis vapors from Chlorella sp. to hydrocarbon-rich bio-oil as a strategy for valuing naturally occurring materials and industrial wastes. Renewable Energy, v. 256, p. 124620, 2026. DOI: 10.1016/j.renene.2025.124620.

BRIDGWATER, A. V. Review of fast pyrolysis of biomass and product upgrading. Biomass and Bioenergy, 2012.

BRIDGWATER, A. V. Review of fast pyrolysis of biomass and product upgrading. Biomass and Bioenergy, v. 38, p. 68–94, 2012.

CALIXTO, Guilherme Quintela et al. Catalyst screening for conversion of Chlorella sp. to aromatic fuel additives: a sustainable strategy for CO_2 capture. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, v. 185, p. 106874, 2025. DOI: 10.1016/j.jaap.2024.106874.

DEMIRBAS, A. *Combustion characteristics of different biomass fuels*. Progress in Energy and Combustion Science, v. 30, n. 2, p. 219–230, 2004. DOI: 10.1016/j.pecs.2003.10.004

DEMIRBAS, A. Pyrolysis mechanisms of biomass materials. Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects, v. 31, n. 13, p. 1186–1193, 2009. DOI: 10.1080/15567030801952268.

DEMIRBAS, Ayhan. *Biofuels from agricultural biomass*. Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects, v. 31, n. 17, p. 1573–1582, 2009. DOI: 10.1080/15567030802094011.

FERNANDO, E. M. P. Geoffroea in Flora e Funga do Brasil. Jardim Botânico do Rio de Janeiro, 2020. Disponível em: https://floradobrasil.jbrj.gov.br/FB22792. Acesso em: 16 maio 2026.

FERREIRA, Wagner; FURTADO, Andréia Cristina. Dos combustíveis fósseis às fontes renováveis de energia: uma breve revisão. Contribuciones a las Ciencias Sociales, São José dos Pinhais, v. 17, n. 12, e12965, 2024. DOI: 10.55905/revconv.17n.12-305.

GOLDEMBERG, José; LUCON, Oswaldo. Energia e meio ambiente no Brasil. Estudos Avançados, São Paulo, v. 21, n. 59, p. 7–20, 2007. DOI: 10.1590/S0103-40142007000100003.

LIMA JÚNIOR, Claudemiro de; LIMA, Regina Lúcia Félix de Aguiar; LIBERAL, Bruno Guimarães; GUERRERO, Jorge Recarte Henriquez; SAMPAIO, Everardo Valadares de Sá Barretto; MENEZES, Rômulo Simões Cezar. Viabilidade econômica do uso energético de lenha da Caatinga sob manejo sustentável. Revista Brasileira de Geografia Física, Recife, v. 8, n. 1, p. 156–166, 2015. DOI: 10.26848/rbgf.v8i1.233582.

MCKENDRY, Peter. Energy production from biomass (part 1): overview of biomass. Bioresource Technology, v. 83, n. 1, p. 37–46, 2002. DOI: 10.1016/S0960-8524(01)00118-3.

MOHAN, Dinesh; PITTMAN JR., Charles U.; STEELE, Philip H. Pyrolysis of wood/biomass for bio-oil: a critical review. Energy & Fuels, v. 20, n. 3, p. 848–889, 2006. DOI: 10.1021/ef0502397.

OLIVEIRA, Rafael Cajano de; JUNGER, Alex Paubel. Utilização de combustíveis fósseis no Brasil e suas consequências ambientais. *Research, Society and Development*, v. 9, n. 9, e466997537, 2020. DOI: 10.33448/rsd-v9i9.7537.

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Avaliando a influência da composição química de três espécies de *Eucalyptus* spp. na emissão gasosa durante a queima em fornos de pizza

Elias Costa de Souza[1]; Allana Katiussya Silva Pereira[2]; Fabíola Martins Delatorre[3]; Gabriela Fontes Mayrinck Cupertino[4]; Samara Teixeira da Silva[5]; João Gilberto Meza Ucella-Filho[6]; José Otávio Brito[7]; Ananias Francisco Dias Júnior[3]

[1] Universidade Federal Sul e Sudeste do Pará (UNIFESSPA).
[2] Universidade Federal do Recôncavo da Bahia (UFRB)
[3] Universidade Federal do Espírito Santo (UFES).
[4] Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA).
[5] Universidade Federal Rural da Amazônia (UFRA).
[6] Universidade Federal de Viçosa (UFV)
[6] Universidade de São Paulo (USP)

Resumo: A redução da emissão de gases do efeito estufa é uma preocupação global. Identificar as fontes de emissão e mitigar a atividade poluente são importantes em diferentes escalas. Assim, o objetivo deste trabalho foi verificar a influência da composição química de três espécies na emissão de efluentes gasosos durante a sua utilização para a cocção em um forno de pizza comercial. Para isso, foram utilizadas as madeiras de 10 indivíduos de três diferentes espécies florestais (*Corymbia citriodora* Hill & Johnson; *Eucalyptus saligna* Sm.; *Eucalyptus globulus* Labill.). As madeiras foram caracterizadas quimicamente (composição química estrutural e análise química imediata). Foram realizados três processos de cocções para cada espécie. As cocções foram divididas em três etapas distintas (aquecimento, cocção e resfriamento). Foi determinado a concentração de diferentes efluentes gasosos na chaminé do forno (CO - ppm; NO - ppm; NO_2 - ppm; H_2S - ppm; CO_2 - %; CH_4 - %; NO_X - ppm) durante a queima das diferentes espécies. Foi verificado uma correlação positiva entre o teor de extrativos e a emissão de materiais particulados, além de uma correlação positiva entre o teor de extrativos e a emissão de CO_2 e NO durante a queima da biomassa. O teor de lignina apresentou ligeira influência positiva na emissão dos materiais particulados, no entanto, apresentou correlação negativa forte para quase todos os outros efluentes observados (CO, NO_2, H_2S, CH_4). Para a confirmação e validação destas constatações, é importante que pesquisas futuras busquem avaliar outras espécies, com propriedades diferentes e variadas.

Palavras-chave: Bioenergia; Efluentes gasosos; Cocção de alimentos.

Evaluating the Influence of the Chemical Composition of Three *Eucalyptus* Species on Gaseous Emissions during Combustion in Pizza Ovens

Abstract: Reducing greenhouse gas emissions is a global concern. Identifying emission sources and mitigating polluting activities are essential at different scales. Therefore, the objective of this study was to evaluate the influence of the chemical composition of three wood species on gaseous effluent emissions during their use as fuel for cooking in a commercial pizza oven. Wood samples from ten trees of three different forest species (*Corymbia citriodora* Hill & Johnson, *Eucalyptus saligna* Sm., and *Eucalyptus globulus* Labill.) were used. The wood was chemically characterized through structural chemical composition and proximate analysis. Three cooking trials were carried out for each species. Each trial was divided into three distinct

stages: heating, cooking, and cooling. The concentrations of different gaseous effluents in the oven chimney (CO, ppm; NO, ppm; NO_2, ppm; H_2S, ppm; CO_2, %; CH_4, %; and NO_x, ppm) were determined during the combustion of each wood species. A positive correlation was observed between extractives content and particulate matter emissions, as well as between extractives content and CO_2 and NO emissions during biomass combustion. Lignin content showed a slight positive influence on particulate matter emissions; however, it exhibited a strong negative correlation with nearly all the other gaseous effluents evaluated (CO, NO_2, H_2S, and CH_4). To confirm and validate these findings, future studies should investigate additional wood species with a wider range of chemical and physical properties.

Keywords: Bioenergy; Gaseous effluents; Food cooking.

1. Introdução

A utilização de combustíveis não-renováveis continua trazendo uma série de questionamentos que envolvem a sustentabilidade do seu fornecimento e os seus prejuízos ao ambiente, considerando a matriz energética global. Assim, a madeira tem sido cada vez mais revalorizada como alternativa energética, o que tem sido muito facilitado, pela expressiva quantidade que dela já se faz uso para tal finalidade. Em 2021, a lenha e o carvão vegetal representam 8,3% da oferta de energia interna do Brasil, posicionando-se em quarto lugar no ranking das energias renováveis disponíveis (Empresa de Pesquisa Energética, 2026). A lenha é uma das fontes de energia mais utilizadas na forma de calor na cocção de alimentos em estabelecimentos comerciais. Estima-se que, em todo o mundo, cerca de 1.9 bilhões de m³ de madeira foram utilizadas para a geração de energia, em 2018 (Food and Agriculture Organization of the United States 2020).

Devido ao impacto ambiental causado pelo uso desenfreado de florestas nativas para a geração de produtos florestais, que demandam grande quantidade de biomassa, as madeiras provenientes de plantios comerciais vêm sendo utilizadas como uma fonte de energia primária de alta importância no uso doméstico e industrial (Dias Júnior et al. 2015). Por ter um rápido crescimento e possuir madeira de boa qualidade, as espécies do gênero Eucalyptus são as mais utilizadas para os mais diversos fins no setor florestal, como no seguimento de celulose e papel, chapas e fibras, lenha, carvão vegetal entre outros (Dias Júnior et al. 2016).

Boa parte da lenha que é utilizada para energia, é consumida por estabelecimentos comerciais como padarias, pizzarias e restaurantes (Empresa de Pesquisa Energética, 2026; Lima et al., 2020). Mesmo com diversos estudos realizados em relação à composição química das diversas espécies de eucalipto, pouco ainda se sabe a respeito da influência da composição da sua madeira e da dinâmica do processo de combustão, como o que ocorre, por exemplo,

durante a cocção de alimentos. Isso é ainda mais relevante, quando consideramos as emissões de materiais particulados, hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (HPAs) e outros efluentes gasosos.

Assim, o objetivo deste trabalho foi verificar a influência da composição química de três espécies na emissão de efluentes gasosos durante a sua utilização para a cocção em um forno de pizza comercial.

2. Material e métodos

Coleta e preparo do material para as cocções em forno de pizza

Para a realização deste estudo, foram coletadas as madeiras de 10 indivíduos de três diferentes espécies florestais, sendo elas: *Corymbia citriodora* Hill & Johnson, *Eucalyptus saligna* Sm. e *Eucalyptus globulus* Labill. Os indivíduos abatidos possuíam entre 6 e 8 anos de idade, eram de origem seminal e possuíam diâmetro médio variando entre 5 e 15 cm. O material foi coletado na cidade de Jerônimo Monteiro, ES (39° 38’ longitude Oeste e 21°19’ latitude Sul), o clima da região é classificado como “Cwa”, de acordo com a classificação de Köppen, com temperatura média anual igual a 23,1 °C e precipitação total média igual a 1341 mm (Lima et al., 2008).

As madeiras foram seccionadas em toretes de, aproximadamente, 1 m de comprimento em diferentes posições ao longo da árvore e, em seguida, permaneceram secando ao ar livre durante um período de 3 meses. Foram retirados discos a 1,30 m de altura da base para a realização de análises laboratoriais de caracterização da madeira.

Caracterizações químicas e energéticas das diferentes espécies

Para a determinação do teor de extrativos totais, lignina e holocelulose, 10 cunhas de cada espécie foram moídas em moinho do tipo Willey e peneiradas e a fração retida entre as peneiras de 40 e 60 mesh foram utilizadas. As análises foram realizadas com três repetições de 2 g cada, de acordo com as normas D1107 (ASTM, 2021a) e D1106 (ASTM, 2021b), para a determinação dos extrativos e do teor de lignina total, respectivamente. O teor de holocelulose foi determinado por diferença, de acordo com a Equação 1 (Oliveira et al., 2022).

$$\%H=100-(\%TE+\%L+\%CZ) \quad \text{Eq. 1}$$

Em que: %H= teor de holocelulose (%); %TE= teor de extrativos totais (%); %CZ= teor de cinzas (%);

A avaliação da composição imediata da madeira foi realizada adaptando-se a norma D1762 (ASTM, 2007). Para isso, foram utilizadas cinco repetições por espécie, com 2 g cada,

onde as amostras foram retiradas da amostra composta contendo as 10 cunhas de cada espécie já na granulometria específica para a análise.

Simulação das cocções

Com o objetivo de observar a relação entre as emissões e as diferentes etapas de cocção que ocorrem no forno, como apresentado na Tabela 1, as cocções foram divididas em três etapas distintas. Em experimentos prévios, foi estabelecido que o tempo de cocção completa de uma pizza foi igual a 1 min e 30 segs. Desse modo, o tempo de cocção considerado nas análises posteriores foi definido como sendo o tempo necessário para realizar a cocção de 50 pizzas. A terceira etapa é o resfriamento, que se inicia após os 45 minutos de cocção e finaliza no momento em que o forno atinge temperaturas próximas a 200 °C.

Tabela 1 - Etapas da cocção e os parâmetros de definição de início e finalização de cada etapa

Etapa	Início	Finalização
Aquecimento	Ignição do forno.	Momento em que o forno atinge 600 °C no termopar 3.
Cocção	Momento em que o forno atinge 600 °C no termopar 3.	Após 45 min.
Resfriamento	Após o fim da etapa de cocção.	Momento em que o forno atinge 200 °C.

Análise dos efluentes gasosos

Os efluentes gasosos foram analisados em dois pontos distintos. O primeiro ponto está localizado a 0,5 m de distância da porta do forno, onde foi utilizado um adaptador portátil (Aeroqual, modelo 200-S), onde foram avaliados a emissão de CO, CO_2 e Materiais Particulados (PM_{10} e $PM_{2,5}$). Em cada repetição um sensor foi utilizado, para garantir que a coleta foi realizada durante todas as etapas de cocção. O segundo ponto de coleta está localizado na chaminé do forno, onde foi utilizado um analisador de gases móvel (Seitron, modelo Chemist 900). Neste segundo ponto, foram coletadas a temperatura dos gases, a concentração de oxigênio (%) e a emissão de CO (ppm), NO (ppm), NO_2 (ppm), H_2S (ppm), CO_2 (%), CH_4 (%), NO_X (ppm).

3. Resultados e discussão

Em relação a composição química da madeira, é importante destacar a variabilidade do teor de lignina e holocelulose (celulose e hemiceluloses) das diferentes espécies, bem como a

leve variação no teor de extrativos totais encontrados na madeira das espécies estudadas, esta variabilidade nos permite prever com maior precisão como a variação na composição química da biomassa pode refletir em variações nas emissões dos efluentes gasosos. Em nosso estudo, a espécie que apresentou o maior teor de holocelulose (*C. citriodora*) apresentou, também, os maiores valores de densidade básica. Assim, como mostrado na Figura 1, a madeira de *E. globulus* apresentou a maior média do teor de extrativos (7,1%) entre as espécies estudadas, haja visto que não houve diferença significativa entre a madeira de *C. citriodora* e *E. saligna* para esta propriedade (ambas apresentaram média próxima a 6,75%. Por apresentar uma variedade significativa entre os compostos considerados extrativos da madeira, acredita-se que estes materiais podem influenciar na emissão de algum poluente emitido durante a queima da madeira.

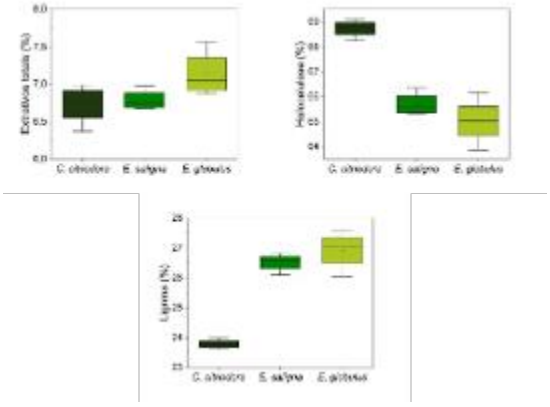


Figura 1 - Composição química das madeiras das espécies estudadas.

Para o teor de holocelulose, os maiores valores foram encontrados na madeira de C. citriodora (68,8%) e os menores valores médios foram encontrados para a madeira de E. globulus (65%). O contrário ocorre em relação ao teor de lignina das espécies estudadas, o *E. globulus* apresentou um maior valor médio (27%), com a madeira de *E. saligna* apresentando valores médios bem próximos, já os menores valores médios foram encontrados na madeira de *C. citriodora* (23,7%). O teor de lignina é um parâmetro importante para avaliar a viabilidade energética da madeira, haja visto que alguns estudos afirmam que este componente químico da madeira é um dos principais responsáveis pelo maior poder calorífico da madeira.

A Figura 2 apresenta os teores de materiais voláteis, carbono fixo e cinzas da madeira das três espécies avaliadas neste trabalho. De acordo com os dados coletados, o maior teor de

materiais voláteis foi encontrado na madeira de *C. citriodora* (84,3%) e as menores médias foram encontradas na madeira de *E. saligna* (82,9%) e *E. globulus* (82,5%), respectivamente. Já em relação ao teor de carbono fixo a relação inversa ocorreu, assim, os maiores valores foram encontrados para a madeira de *E. globulus* (16,5%) seguido de *E. saligna* (16%) e os menores valores foram encontrados para a madeira de *C. citriodora* (14,9%). Já o teor de cinzas, o menor valor foi encontrado para a madeira de *C. citriodora* (0,71%), seguido da madeira de *E. saligna* (0,9%) e *E. globulus* (0,91%).

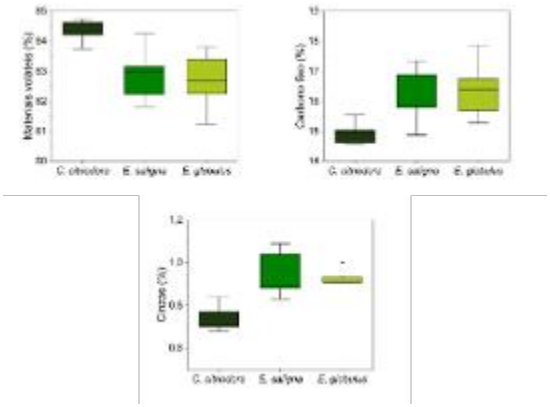


Figura 2 - Análise química imediata das madeiras estudadas.

Em relação aos efluentes gasosos emitidos durante todo o processo de cocção levando em consideração o aquecimento, a cocção e o resfriamento do forno, é possível observar uma alta variação entre as três diferentes espécies estudadas, como observado na Figura 3. É possível observar que para todos os efluentes gasosos avaliados durante as queimas, com exceção do CO e do H_2S, nas etapas iniciais, ou seja, aquecimento do forno e cocção propriamente dita, são liberadas maiores quantidades de gases do que na etapa final da queima, ou seja, durante o resfriamento do forno. Alguns estudos apontam que as variadas condições de temperatura durante a queima, bem como a intensidade de calor e a quantidade de ar presente na combustão podem influenciar diretamente nos compostos emitidos durante o processo (Simoneit, 2002).

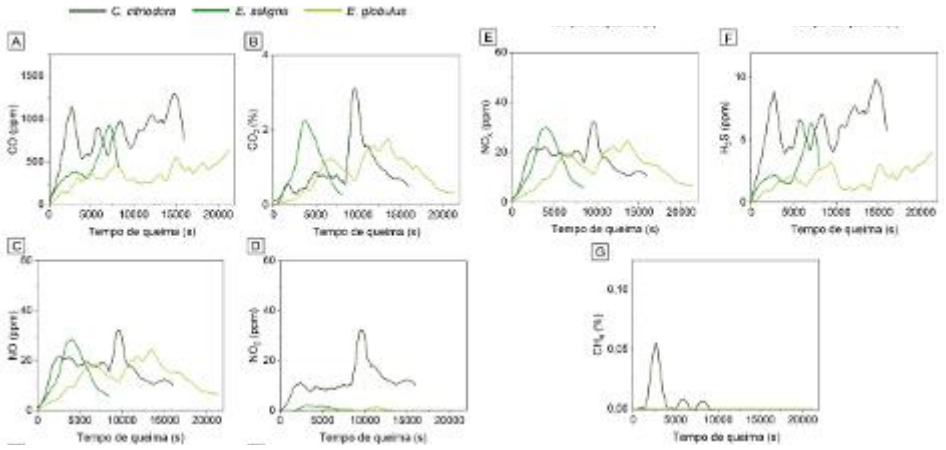


Figura 3 - Efluentes gasosos emitidos durante a queima das diferentes espécies estudadas, coletados na chaminé.

Já o H_2S, que é comumente encontrado no biogás produzido a partir da queima da biomassa, pode causar diversos problemas à saúde, até mesmo em baixas concentrações (abaixo de 20 ppm), podendo causar desde problemas mais simples, como irritação nos olhos, dor de cabeça e problemas respiratórios, até mesmo problemas a longo prazo, como tontura, irritabilidade e perda de memória (Chan et al., 2022; Dashtestani et al., 2021). Resultados semelhantes estão associados aos óxidos de nitrogênio (NOX) encontrados, principalmente, a partir da queima incompleta da biomassa (Oluwoye et al., 2020). A emissão dos NOX contribui diretamente com diversos problemas ambientais relacionados às mudanças climáticas e até mesmo problemas no sistema respiratório humano (Oluwoye et al., 2020). Já a emissão de CH4 foi detectada apenas na madeira de C. citriodora. O metano emitido pela queima da biomassa é um dos responsáveis pelos efeitos do aquecimento global na atmosfera e alguns estudos apontam que, devido à sua longa duração, pode atingir camadas da estratosfera, interferindo até mesmo nos ciclos de gases que ocorrem nesta região (Gupta et al., 2001).

As concentrações dos efluentes gasosos coletados próximos à porta do forno são apresentadas na Figura 4. Os valores de CO e CO_2 coletados próximos a porta do forno foram próximos aos encontrados na chaminé, indicando maior emissão de monóxido de carbono durante a etapa de cocção e resfriamento e maiores picos de CO_2 nas etapas iniciais da queima, com destaque para a madeira de *C. citriodora*, que emitiu maiores teores de CO e CO_2 em ambas as etapas da queima da madeira no forno.

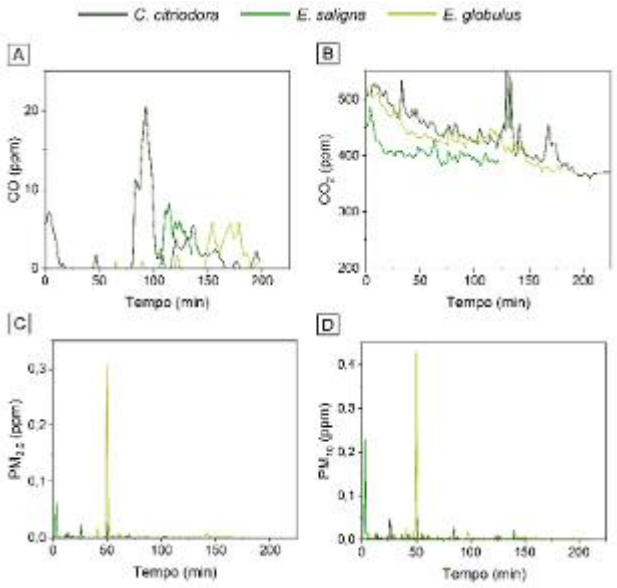


Figura 4 - Efluentes gasosos, coletados próximos a porta, com a queima das diferentes espécies estudadas

Em relação ao teor de material particulado (PM_{10} e $PM_{2,5}$) observados, é possível verificar que a madeira de *E. globulus* apresentou maiores médias que as outras espécies estudadas, com os maiores picos encontrados nas etapas iniciais da queima (aquecimento e cocção). No entanto, no momento logo após a ignição, foi verificado uma emissão significativa de materiais particulados da madeira de *E. saligna*. Os materiais particulados, além da possível contribuição para as mudanças climáticas, apresentam riscos significativos à saúde humana (Lima et al., 2020). Estudos realizados em pizzarias já apontaram a alta emissão de materiais particulados, de acordo com o combustível utilizado no forno, indicando, também, o risco de presença de metais pesados associados às estruturas dos materiais particulados, o que pode agravar ainda mais o risco direto à saúde humana (Li et al., 2022; Lima et al., 2020). Durante estes períodos em que ocorrem maiores emissões de materiais particulados na porta do forno é possível sentir um desconforto e irritação nos olhos e gargantas, o que pode evoluir para quadros mais graves caso a exposição ocorra de forma prolongada, sendo necessária maior atenção para os trabalhadores que trabalham diariamente nestes ambientes.

De acordo com as análises de correlação realizadas no nosso estudo, foi observado uma correlação positiva forte entre o teor de extrativos e a emissão de materiais particulados, tanto o $PM_{2,5}$ quanto o PM_{10}, além de uma correlação positiva média entre o teor de extrativos e a emissão de CO_2 e NO durante a queima da biomassa no forno de pizzas. O teor de lignina apresentou ligeira influência positiva na emissão dos materiais particulados, no entanto,

apresentou correlação negativa forte para quase todos os outros efluentes observados (CO, NO_2, H_2S, CH_4). Ou seja, quanto maior o teor de lignina da espécie, menor a emissão desses efluentes. Já quando avaliada a influência do teor de holocelulose, que é inversamente proporcional ao teor de lignina, ocorre a relação inversa com a emissão de diferentes poluentes. Ou seja, o maior teor de holocelulose presente nas espécies se correlacionou positivamente com a emissão de CO, NO_2, H_2S e CH_4 na saída da chaminé, além de se correlacionar positivamente com a emissão de CO e CO_2 na região próxima a porta do forno.

4. Conclusões

Com a realização desta pesquisa, foi possível observar que há correlações positivas e fortes entre as propriedades químicas das madeiras e a quantidade e a qualidade dos efluentes gasosos liberados durante a cocção de pizzas, especialmente em relação ao teor de holocelulose e o teor de extrativos. No entanto, para a confirmação e validação destas constatações, é importante que pesquisas futuras busquem avaliar outras espécies, com propriedades diferentes e variadas, com o objetivo de criar um modelo estatístico capaz de estimar a quantidade de efluentes gasosos liberados durante a queima da madeira, de acordo com as suas características.

5. Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

6. Referências bibliográficas

ASTM, (2021a). D1107-21 - Standard Test Method for Ethanol-Toluene Solubility of Wood.

ASTM, (2021b). D1106-21 - Standard Test Method for Acid-Insoluble Lignin in Wood.

ASTM, (2007). D 1762-84: Standard Test Method for Chemical Analysis of Wood Charcoal. https://doi.org/10.1520/D1762-84R07.2

Chan, Y.H., Lock, S.S.M., Wong, M.K., Yiin, C.L., Loy, A.C.M., Cheah, K.W., Chai, S.Y.W., Li, C., How, B.S., Chin, B.L.F., Chan, Z.P., Lam, S.S., (2022). A state-of-the-art review on capture and separation of hazardous hydrogen sulfide (H2S): Recent advances, challenges and outlook. Environ. Pollut. 314, 120219. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.120219

Dashtestani, F., Nusheh, M., Siriwongrungson, V., Hongrapipat, J., Materic, V., Pang, S., (2021). Effect of H2S and NH3 in biomass gasification producer gas on CO2 capture

performance of an innovative CaO and Fe2O3 based sorbent. Fuel 295, 120586. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.120586

Dias Júnior AF, Costa Júnior DS da, Andrade AM de, Oliveira E de, Lana AQ, Brito JO (2016) Quality of Eucalyptus Wood Grown in Rio de Janeiro State for Bioenergy. Floresta e Ambient 23:435–442. https://doi.org/10.1590/2179-8087.140315

Dias Júnior AF, Andrade AM de, Soares VW, Costa Júnior DS, Ferreira DHAA, Leles PS dos S (2015) Potencial energético de sete materiais genéticos de Eucalyptus cultivados no Estado do Rio de Janeiro. Sci For 43:. https://doi.org/10.18671/scifor.v43n108.8

Empresa de Pesquisa Energética, (2021). Brazilian Energy Balance. Rio de Janeiro.

Food and Agriculture Organization of the United States F (2020) FAOSTAT-Forestry database. Global production and trade in forest products in 2019. In: FAO. http://www.fao.org/forestry/statistics/80938/en. Accessed 24 Oct 2020

Gupta, P.K., Krishna Prasad, V., Sharma, C., Sarkar, A.K., Kant, Y., Badarinath, K.V.S., Mitra, A.P., (2001). CH4 emissions from biomass burning of shifting cultivation areas of tropical deciduous forests – experimental results from ground-based measurements. Chemosph. - Glob. Chang. Sci. 3, 133–143. https://doi.org/10.1016/S1465-9972(01)00003-4

Li, H., Tang, M., Luo, X., Li, W., Pang, Y., Huang, W., Zhao, Z., Wei, Y., Long, T., Mehmood, T., (2022). Compositional characteristics and toxicological responses of human lung epithelial cells to inhalable particles (PM10) from ten typical biomass fuel combustions. Particuology. https://doi.org/10.1016/j.partic.2022.09.006

Lima, F.D.M., Pérez-Martínez, P.J., de Fatima Andrade, M., Kumar, P., de Miranda, R.M., (2020). Characterization of particles emitted by pizzerias burning wood and briquettes: a case study at Sao Paulo, Brazil. Environ. Sci. Pollut. Res. 27, 35875–35888. https://doi.org/10.1007/s11356-019-07508-6

Lima, J.S. de S., Silva, S. de A., Oliveira, R.B. de, Cecílio, R.A., Xavier, A.C., (2008). Temporal variability of monthly rains in Alegre – ES, Brazil. Rev. Ciên. Agron. 39, 327–332.

Oliveira, P.R.S., Trugilho, P.F., Oliveira, T.J.P., (2022). Briquettes of acai seeds: characterization of the biomass and influence of the parameters of production temperature and pressure in the physical-mechanical and energy quality. Environ. Sci. Pollut. Res. 29, 8549–8558. https://doi.org/10.1007/s11356-021-15847-6

Oluwoye, I., Altarawneh, M., Gore, J., Dlugogorski, B.Z., (2020). Products of incomplete combustion from biomass reburning. Fuel 274, 117805. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.117805

Simoneit, B.R.., (2002). Biomass burning — a review of organic tracers for smoke from incomplete combustion. Appl. Geochemistry 17, 129–162. https://doi.org/10.1016/S0883-2927(01)00061-0

Bagaço da laranja para produção de biocombustíveis sólidos

Rafael Martins de Figueiredo[1]; Macksuel Fernandes da Silva[1]; João Paulo Tomazele[1]; Carlos Sette Jr[1]

[1] Universidade Federal de Goiás (UFG), Goiânia, Goiás, Brasil.

Resumo: O aproveitamento energético de resíduos agroindustriais é uma alternativa para reduzir o descarte de biomassa e agregar valor aos materiais antes considerados rejeito. Este estudo caracterizou o bagaço de laranja, resíduo da indústria de suco cítrico, quanto ao seu potencial para produção de biocombustíveis sólidos, como biochar e briquetes. Foram realizadas análises de umidade, teor de cinzas, materiais voláteis, carbono fixo, densidade a granel e poder calorífico superior, seguindo normas técnicas internacionais, com resultados comparados a valores de referência da madeira de eucalipto. O bagaço apresentou umidade elevada (média de 75,53%), exigindo secagem prévia antes de qualquer processo térmico-químico. O teor de cinzas (4,52%) manteve-se dentro dos limites aceitáveis para biomassas agrícolas, e o carbono fixo (20,06%) foi equivalente ou superior à da madeira do eucalipto, indicando bom potencial energético. O poder calorífico superior médio foi de 18,18 MJ/kg, valor compatível com outras biomassas usadas na produção de energia. A baixa densidade a granel, que dificulta o transporte a longas distâncias, favorece a briquetagem, sendo uma rota tecnológica viável tecnicamente para aumentar a densidade energética do resíduo. Conclui-se que o bagaço de laranja, mesmo com sua elevada umidade natural, é uma matéria-prima promissora para produção de biocombustíveis sólidos.

Palavras-chave: Biochar; Briquetagem; Resíduo.

Orange pomace to produce solid biofuels

Abstract: The energy utilization of agro-industrial residues is an alternative to reduce biomass disposal and add value to materials previously considered waste. This study characterized orange bagasse, a residue from the citrus juice industry, regarding its potential to produce solid biofuels, such as biochar and briquettes. Analyses of moisture content, ash content, volatile matter, fixed carbon, bulk density, and higher heating value were performed according to international technical standards, with the results compared to reference values for eucalyptus wood. The bagasse showed high moisture content (average of 75.53%), requiring prior drying before any thermochemical process. The ash content (4.52%) remained within acceptable limits for agricultural biomass, and the fixed carbon content (20.06%) was equivalent to or higher than that of eucalyptus wood, indicating good energy potential. The average higher heating value was 18.18 MJ/kg, a value compatible with other biomass sources used for energy production. The low bulk density, which hinders long-distance transportation, favors briquetting, making it a technically viable technological route to increase the energy density of the residue. It is concluded that orange bagasse, even with its naturally high moisture content, is a promising raw material to produce solid biofuels.

Keywords: Biochar; Briquetting; Waste

1. Introdução

Um dos maiores desafios para a indústria alimentícia é a gestão dos resíduos, tanto em questões ambientais quanto para a economia. Dados de 2023 da Food and Agriculture Organization (FAO), mostram que esse desperdício ocorre principalmente na colheita e em seu processamento, sendo que 14% dos alimentos para o consumo humano produzidos no mundo são perdidos ou desperdiçados. Para conclusão do ciclo produtivo, com foco na diminuição do desperdício, a reutilização desses alimentos se torna a maneira mais sustentável e economicamente viável. Segundo Yaashikaa; Kumar; Varjani, (2022), pensando na bioeconomia circular, essa prática de reuso dos resíduos agroindustriais minimiza os impactos no meio ambiente e agrega valores ao recurso, tanto em produtos quanto como processos.

Dentro das possibilidades de reaproveitamento de resíduos agroindustriais, destacam-se a sua aplicação para fins energéticos, como na forma do biochar e do briquete, sendo alternativas promissoras para a bioeconomia, agregando valor aos resíduos por meio da reutilização sustentável e do aproveitamento energético.

O biocarvão, ou biochar, é um material sólido com alto teor de carbono, obtido a partir da pirólise da biomassa. Esse processo consiste no aquecimento da matéria orgânica em altas temperaturas, sem oxigênio, quebrando suas moléculas e reorganizando as ligações químicas. O processo resulta em três produtos: biochar (fase sólida), bio-óleo (fase líquida) e gás de síntese (fase gasosa), todos com potencial de reaproveitamento energético. O diferencial do biochar em relação ao carvão vegetal está em seu uso agrícola, como corretivo de solos que melhora a produtividade. Além disso, contribui para mitigar as mudanças climáticas, ao evitar que a biomassa se decomponha rapidamente e libere gases de efeito estufa, como CO_2 e CH_4, (CARVALHO, 2025).

Já o briquete pode ser fabricado de duas maneiras, sendo o simples que é produzido a partir de apenas uma matéria prima e o composto resultado da união de diversos resíduos provenientes da biomassa. De acordo com Dantas (2012), além de ser combustível renovável o briquete tem algumas vantagens, como ser de fácil manuseio e armazenamento, calor homogêneo, maior temperatura da chama, pouca produção de fumaça, cinza e fuligem, não é um produto sazonal, é legalizado pelo IBAMA, totalmente reciclado, não produz labaredas, não é toxico; não precisa de monocultura; utiliza mão de obra humana e tecnológica, atingido vários campos de trabalho; é vendido em quantidade de massa; preserva mais árvores; por não necessitar que a empresa se desloque para outros lugares onde haja matéria-prima, tem um

menor custo de produção; é bastante praticado em territórios com escassez de terrenos e de árvores, pois utiliza restos de biomassa; pelo fato de não desmatar, não provoca erosão do solo e não influi na sua esterilidade.

Objetivo deste trabalho foi a caracterização energética do bagaço da laranja gerado pela indústria de suco. Os estudos são para analisar como esse resíduo se comporta *in natura*, partindo do ponto de vista energético, tendo como finalidade a produção de biocombustível sólido de alto valor agregado, como o Biochar e o Briquete.

2. Material e métodos

Os resíduos utilizados neste estudo são provenientes de uma indústria processadora de suco de laranja. Após a extração do líquido durante o processo industrial, o material excedente, constituído principalmente pelo bagaço da fruta (Figura 1), é descartado e destinado como resíduo agroindustrial.



Figura 1 – Bagaço da laranja *in natura* gerado pela indústria de suco e utilizado neste estudo para a caracterização energética

Teor de materiais voláteis

Para a determinação da análise imediata da biomassa, composta pelos teores de materiais voláteis, cinzas e carbono fixo, foi utilizada a fração retida na peneira de 60 mesh, previamente seca em estufa até massa constante (0% de umidade). As determinações dos teores de materiais voláteis e de cinzas foram realizadas em triplicata, utilizando
cadinhos de porcelana previamente calcinados e acondicionados em dessecador até o momento do uso.

O teor de materiais voláteis foi determinado de acordo com a norma ISO 18123. Para cada repetição, aproximadamente 1,0 g de amostra seca foi acondicionado em cadinho de

porcelana com tampa, ambos previamente pesados. Em seguida, os conjuntos foram introduzidos em mufla previamente estabilizada a 900 °C, permanecendo por sete

minutos sob atmosfera restrita, com a porta do equipamento mantida fechada durante todo o ensaio. Após o período de aquecimento, os cadinhos foram removidos da mufla, resfriados em dessecador por 30 minutos e posteriormente pesados em temperatura ambiente. O teor de materiais voláteis foi calculado conforme a Equação 1.

$$MV = \frac{Mi - Mf}{Ma} * 100 \qquad \text{Eq. 1}$$

Em que:

MV: Teor de materiais voláteis da biomassa (%);

Mi: Massa inicial do cadinho + amostra (g);

Mf: Massa final do cadinho + amostra (g);

Ma: massa da amostra (g).

Teor de cinzas

O teor de cinzas foi determinado conforme a norma ISO 18122. Para cada repetição, aproximadamente 1,0 g de biomassa seca foi acondicionada em cadinhos de porcelana previamente calcinados e pesados, sem a utilização de tampa. Os cadinhos foram então introduzidos em mufla, sendo submetidos a aquecimento gradual até a temperatura de 550 ± 10 °C. Após atingir a temperatura estabelecida, as amostras permaneceram em combustão por 2 horas, assegurando a completa oxidação da matéria orgânica.

Ao término do ensaio, os cadinhos foram removidos da mufla, resfriados em dessecador até temperatura ambiente e posteriormente pesados. O teor de cinzas, correspondente ao resíduo mineral remanescente após a combustão completa da biomassa, foi calculado de acordo com a Equação 2.

$$CZ = \frac{Mf - Mc}{Ma} * 100 \qquad \text{Eq. 2}$$

Em que:

CZ: Teor de cinzas no carvão, em %;

Mf: Massa final do cadinho + amostra (g);

Mc: Massa do cadinho (g);

Ma: amostra inicial (g).

Teor de carbono fixo

O teor de carbono fixo é uma medida indireta, dependente dos teores de materiais voláteis e teor de cinzas para sua determinação, obtido através da Equação 3.

$$CF = 100 - (CZ + MV) \qquad \text{Eq. 3}$$

Em que:

CF = Teor de carbono fixo (%);

CZ = Teor de cinzas (%);

MV = Teor de materiais voláteis (%).

Densidade a granel

A densidade a granel (kg m^{-3}) é determinada conforme os procedimentos descritos na ISO 17828, utilizando recipiente de volume conhecido e preenchido sob condições padronizadas. A densidade a granel é obtida pela razão entre a massa da amostra e o volume interno do recipiente, conforme apresentado na Equação 4.

$$DG = \frac{Ma}{Vr} \qquad \text{Eq. 4}$$

Em que:

DG = Densidade à granel (kg.m-3)

Ma = Massa da amostra (kg);

Vr = Volume do recipiente (m3).

Poder calorífico superior e inferior

O Poder Calorífico Superior (PCS, MJ·kg^{-1}) foi determinado utilizando-se um calorímetro IKA WORKS C-200, conforme a norma ISO 18125.

O Poder Calorífico Inferior (PCI, MJ·kg^{-1}) foi calculado de acordo com a Equação 5, conforme a teoria do poder calorífico líquido (*Net Calorific Value*) proposta por Van Loo e Koppejan (2002), considerando o teor de umidade e o teor de hidrogênio da biomassa.

$$PCI = PCS\left(1 - \frac{u}{100}\right) - 2{,}447\frac{u}{100} - 2{,}447 \times 9{,}01 \times \frac{H}{100}\left(1 - \frac{u}{100}\right) \qquad \text{Eq.5}$$

Em que:

PCI = poder calorífico inferior (MJ·kg^{-1}, base úmida);

PCS = poder calorífico superior (MJ·kg^{-1}, base seca);

u = teor de umidade da biomassa (% base úmida);

H = teor de hidrogênio da biomassa (% base seca);

2,447 MJ·kg^{-1} = calor latente de vaporização da água a 25 °C;

9,01 = fator estequiométrico correspondente à massa de água formada pela combustão do hidrogênio.

Teor de Umidade

O teor de umidade foi obtido de acordo com a norma ISO 18134 determinado de acordo com a equação 7:

$$U = \frac{Mi - Mf}{Mf * 100} \quad \text{Eq. 7}$$

Em que:

U: Teor de umidade (%);

Mi: Massa inicial (g);

Mf: Massa final (g).

3. Resultados e Discussão

Os resultados obtidos durante o desenvolvimento dos estudos, serão apresentados na Tabela 1**,** evidenciando os valores de Umidade (%), Cinzas (%), Materiais Voláteis (%), Carbono Fixo (%) e Densidade a Granel (g/cm³), comparada a valores de referência do eucalipto.

O teor de umidade obtido através do bagaço da laranja variou entre 72% e 74%, tendo média de 73%, o que evidencia a homogeneidade e a consistência das amostras. De acordo com Quirino *et al*. (2012) e Sette *et al*. (2018), a umidade da madeira do eucalipto *in natura* variam entre 30 e 40%, deste modo, os valores encontrados são superiores, essa elevada umidade se dá pela característica do bagaço da laranja, resultante do alto teor de água da fruta *in natura*.

Tabela 1 – Características energéticas do bagaço de laranja (n = 3) comparada a valores de referência do eucalipto.

Parâmetro	Rep. 1	Rep. 2	Rep. 3	Média	Eucalipto*
Umidade (%)	72,3	74,0	72,9	73,0	30–40
Cinzas (%)	4,5	4,5	4,5	4,5	0,03–1,00
Mat. Voláteis (%)	76,2	74,8	75,2	75,4	75–85
Carbono Fixo (%)	19,3	20,6	20,2	20,1	15–25
Dens. Granel (kg/m³)	370,0	410,0	430,0	400,0	180–250
PCS (kJ/kg)	18167	18197	-	18182	18500–20500

PCS = Poder calorífico superior *Valores médios para madeira de *Eucalyptus grandis* e *E. urophylla in natura*, conforme Quirino *et al.* (2012), Sette *et al.* (2018) e Eloy *et al.* (2016).

Nessas condições, há necessidade de secagem prévia, seja ela por meio mecânico ou ambiente, antes de qualquer processo. Umidades acima de 25% impactam negativamente o rendimento gravimétrico do biochar durante a pirólise, visto que parte da energia de processo é consumida na evaporação da água (BRAND, 2010).

Os resultados obtidos no Teor de Cinzas variaram entre 4,49% e 4,55%, tendo média de 4,52%, sendo inferior a 1% demonstrando a homogeneidade do resíduo. Mesmo que esse valor seja superior comparado ao eucalipto, Sette et al. e 2018; Eloy *et al*., 2016, consideram dentro da faixa aceitável para biomassas agrícolas e abaixo do limite máximo de 6% estabelecido por normativas para briquetes energéticos (ISO 17225-3).

O teor de cinzas do bagaço de laranja em relação ao eucalipto, tem como atribuição a composição mineral da casca e do albedo da fruta (camada esponjosa), que são ricos em compostos inorgânicos, sendo eles potássio, cálcio e magnésio (DEMIRBAS, 2023).

Os valores obtidos para teor de materiais voláteis, possuem variação entre 74,85% e 76,18%, tendo média de 75,41%, sendo considerado satisfatório para biomassas lignocelulósicas de origem agrícola. Esse comportamento evidencia que o resíduo possui características favoráveis para processos termoquímicos, especialmente a pirólise, demonstrando seu potencial como matéria-prima para a produção de biochar.

Vale ressaltar que o bagaço da laranja é rico em compostos orgânicos e grupos funcionais oxigenados, podendo favorecer a obtenção de biochars com elevada área superficial, tendo como característica capacidade de absorção, condicionantes de solo, retenção de nutrientes e remoção de contaminantes.

O teor médio de carbono fixo de 20,06% representou o resultado de maior relevância para a avaliação do potencial energético do bagaço de laranja. Esse valor supera a média inferior

da faixa reportada para madeiras de eucalipto (15–25), o que posiciona o bagaço de laranja como biomassa competitiva para a produção de biochar.

Sob a perspectiva do sequestro de carbono no solo, biochars com carbono fixo acima de 15% são considerados adequados para aplicação agrícola (LEHMANN; JOSEPH, 2015), critério amplamente atendido pela matéria-prima avaliada.

A densidade a granel média de 0,40 g/cm³, o que constitui vantagem logística relativa, com maior massa por volume transportado *in natura*. Essa densidade ainda favorece o armazenamento, permanecendo baixa para fins de transporte eficiente de longa distância, o que justifica plenamente a briquetagem como etapa de valorização.

A compactação mecânica típica (pressões de 80–150 MPa) eleva a densidade do produto para 900 a 1200 kg/m³ (QUIRINO *et al*., 2012), representando aumento de mais de 100% em relação ao material *in natura* e incremento significativo na densidade energética volumétrica.

O poder calorífico superior (PCS) médio do bagaço de laranja foi de 18.182 kJ kg^{-1} (18,18 MJ kg^{-1}), indicando que esse resíduo agroindustrial apresenta potencial energético compatível com diversas biomassas utilizadas em processos de conversão termoquímica. O PCS representa a quantidade máxima de energia liberada durante a combustão completa da biomassa e constitui um dos principais parâmetros para avaliar sua viabilidade como matéria-prima para a produção de biocombustíveis sólidos e materiais ricos em carbono.

4. Considerações finais

Os resultados obtidos demonstram que o bagaço de laranja apresenta características físico-energéticas compatíveis com sua utilização como matéria-prima para a produção de biochar e briquetes energéticos, desde que submetido à pré-secagem adequada.

Os principais indicadores de qualidade favoráveis ao aproveitamento energético e agrícola do resíduo, são o carbono fixo equivalente ao eucalipto e o baixo teor de cinzas. A elevada umidade e a baixa densidade a granel são situações superáveis por processos mecânicos e térmicos convencionais, o que não impede o uso de tecnológicas para o desenvolvimento do produto.

Diante do volume de resíduos gerados pelo processamento industrial de citros no Brasil, com estimativa entre 50% e 60% da massa da fruta, a valorização do bagaço de laranja por vias termoquímicas, representa não apenas alternativa energética renovável, mas estratégia de gestão de resíduos alinhada aos princípios da bioeconomia circular.

Por fim, as análises demonstram que há um grande potencial no bagaço da laranja, podendo ser empregado em diversas etapas produtivas na bioeconomia. Os resultados mostram inclinação para produção biochar e/ou briquete, uma vez que possuem aplicações agrícolas e ambientais, como condicionador de solo, retenção de nutrientes, sequestro de carbono e adsorção de contaminantes. Essas alternativas contribuem para o aproveitamento dos resíduos da cadeia citrícola, promovendo a geração de produtos de maior valor agregado e reduzindo os impactos ambientais associados ao seu descarte.

5. Referências bibliográficas

Brand, M. A. (2010). *Energia de biomassa florestal*. Editora Interciência.

Brito, J. O. (1993). Expressão da produção florestal em unidades energéticas. In *1º Congresso Florestal Panamericano / 7º Congresso Florestal Brasileiro: Floresta para o desenvolvimento — política, ambiente, tecnologia e mercado* (pp. 280–282). SBS/SBEF.

Dantas, A. P., Santos, R. R., & Souza, S. C. (2012). *O briquete como combustível alternativo para a produção de energia*. III Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental, Goiânia, GO. IBEAS.

Demirbas, A. (2001). Biomass resource facilities and biomass conversion processing for fuels and chemicals. *Energy Conversion and Management*, *42*(11), 1357–1378. https://doi.org/10.1016/S0196-8904(00)00137-0

Eloy, E., Da Silva, D. A., Schmidt, D., Trevisan, R., Caron, B. O., & Elli, E. F. (2016). Effect of planting age and spacing on energy properties of *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden. *Revista Árvore*, *40*(4), 749–758. https://doi.org/10.1590/0100-67622016000400019

Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2023). *The State of Food and Agriculture 2023*. FAO. https://www.fao.org

Gabetto, F. P., Tenelli, S., Netto-Ferreira, J. B., Martins Junior, J., Almeida, O. A. C., Cosenza, M. L., Strauss, M., & Carvalho, J. L. N. (2025). Biochar from crop residues mitigates N2O emissions and increases carbon content in tropical soils. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, *13*(1), 1–12. https://doi.org/10.1002/bbb.2734

International Organization for Standardization. (2015). *Solid biofuels — Determination of bulk density* (ISO 17828:2015). https://www.iso.org/standard/60687.html

International Organization for Standardization. (2022). *Solid biofuels — Determination of ash content* (ISO 18122:2022, 2nd ed.). https://www.iso.org/standard/83190.html

International Organization for Standardization. (2023). *Solid biofuels — Determination of volatile matter* (ISO 18123:2023, 2nd ed.). https://www.iso.org/standard/83192.html

International Organization for Standardization. (2017). *Solid biofuels — Determination of calorific value* (ISO 18125:2017). https://www.iso.org/standard/61517.html

International Organization for Standardization. (2022). *Solid biofuels — Determination of moisture content — Part 1: Reference method* (ISO 18134-1:2022). https://www.iso.org/standard/83191.html

International Organization for Standardization. (2021). *Solid biofuels — Fuel specifications and classes — Part 3: Graded wood briquettes* (ISO 17225-3:2021, 2nd ed.). https://www.iso.org/standard/76089.html

Lehmann, J., & Joseph, S. (2015). *Biochar for environmental management: Science, technology and implementation* (2nd ed.). Routledge.

Silva, M. F., Fortes, M. M., & Sette Junior, C. R. (2018). Characteristics of wood and charcoal from *Eucalyptus* clones. *Floresta e Ambiente*, *25*(3), e20160350. https://doi.org/10.1590/2179-8087.035016

Van Loo, S., & Koppejan, J. (2002). *Handbook of biomass combustion and co-firing*. Twente University Press.

Yaashikaa, P. R., Senthil Kumar, P., & Varjani, S. (2022). Valorization of agro-industrial wastes for biorefinery process and circular bioeconomy: A critical review. *Bioresource Technology*, *343*, 126126. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.126126

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Biochars de Resíduos Agroflorestais: Biomassa de Origem, Parâmetros de Pirólise e Combustibilidade

Dandara Paula da Silva Guimarães[1]; Angélica de Cássia Oliveira Carneiro[1]; Fillipe Tamiozzo Pereira Torres[1]; Kazuy Christine Meireles Martins[1]; Gabrielle Fialho Abranches[1]; Paula Gabriella Surdi[1]; Thiago de Paula Protásio[2]

[1] Universidade Federal de Viçosa
[2] Universidade Federal de Lavras

Resumo: Este trabalho avaliou a influência da biomassa e da temperatura de pirólise sobre as propriedades e a combustibilidade de biochars de resíduos de eucalipto, de coco verde e da palha de café. Os biochars foram produzidos por pirólise lenta a 450, 550 e 650 °C. A combustibilidade foi avaliada por perfis temporais, parâmetros globais e análise de componentes principais. A biomassa exerceu maior influência que a temperatura. Os biochars de resíduos de eucalipto apresentaram combustão mais rápida e intensa, com temperatura máxima média de 271,36 °C, taxa média de perda de massa de 1,62 g·min^{-1} e maior índice de combustibilidade. Os biochars de palha de café e de resíduos de coco verde tiveram combustão gradual e prolongada. O teor de cinzas associou-se negativamente à combustibilidade, enquanto o tamanho das partículas contribuiu para os padrões observados. Assim, a biomassa precursora constituiu critério estratégico para direcionar a produção, a aplicação e as condições de manuseio, transporte e armazenamento dos biochars, considerando o seu comportamento térmico.

Palavras-chave: Combustão; Teor de cinzas; Granulometria.

Biochars from Agroforestry Residues: Feedstock Type, Pyrolysis Parameters, and Combustibility

Abstract: This study evaluated the influence of feedstock type and pyrolysis temperature on the properties and combustibility of biochars produced from eucalyptus residues, green coconut residues, and coffee husks. The biochars were produced by slow pyrolysis at 450, 550, and 650 °C. Combustibility was assessed using temporal profiles, global combustion parameters, and principal component analysis. Feedstock type exerted a greater influence than pyrolysis temperature. Eucalyptus-residue biochars exhibited faster and more intense combustion, with a mean maximum temperature of 271.36 °C, an average mass-loss rate of 1.62 g·min^{-1}, and the highest combustibility index. Coffee-husk and green-coconut-residue biochars showed more gradual and prolonged combustion. Ash content was negatively associated with combustibility, whereas particle size contributed to the observed combustion patterns. Therefore, feedstock type represents a strategic criterion for guiding biochar production, application, handling, transportation, and storage conditions.

Keywords: Combustion; Ash content; Particle size distribution.

1. Introdução

Resíduos agroflorestais são biomassas disponíveis e de baixo custo, cujo aproveitamento favorece a valorização de subprodutos, a redução do descarte inadequado e a economia circular (Mahmood et al., 2025). Entre as rotas de conversão termoquímica, a pirólise lenta promove a degradação da biomassa sob baixa disponibilidade de oxigênio, formando um produto sólido e rico em carbono denominado biochar, com aplicações agrícolas, ambientais e energéticas (Wu et al., 2024).

As propriedades dos biochars variam conforme a biomassa e as condições de pirólise, especialmente a temperatura, influenciando sua qualidade, estabilidade e adequação às diferentes aplicações (Babu et al., 2024). Entre elas, a combustibilidade, relacionada à capacidade de entrar em ignição e sustentar a combustão, ainda é pouco estudada, embora seja relevante para o manuseio, transporte, armazenamento e uso final. Sua avaliação permite compreender o comportamento térmico dos materiais, identificar riscos de ignição, incêndios e danos à saúde e à segurança operacional, além de auxiliar no direcionamento de aplicações mais adequadas para cada biochar (Phounglamcheik et al., 2022; Matsobane et al., 2024).

Embora o controle do processo produtivo e as boas práticas possam reduzir os riscos relacionados à combustão do biochar, o comportamento térmico não é uniforme entre os materiais, tornando necessária a investigação de propriedades como tamanho das partículas, poder calorífico, composição química imediata e elementar, que podem afetar a transferência de calor, a disponibilidade de oxigênio e a reatividade em situação de combustão (Matsobane et al., 2024). Assim, objetivou-se avaliar a influência da biomassa de origem e da temperatura de pirólise sobre as propriedades físicas e químicas de biochars produzidos a partir de resíduos agroflorestais e investigar como essas características interferem na sua dinâmica de combustão.

2. Material e métodos

Foram utilizados resíduos florestais de híbridos espontâneos de *Eucalyptus urophylla* (clone I 144), constituídos por ponteiras, galhadas e cascas, e resíduos agrícolas de café (*Coffea arabica* L.) e coco verde (*Cocos nucifera* L.). A palha de café era composta por casca, película prateada, pergaminho, polpa e mucilagem, enquanto os resíduos de coco verde correspondiam às cascas interna e externa. Os resíduos de eucalipto foram processados em picador laboratorial, obtendo-se partículas com tamanho médio de 18,51 mm. Os resíduos de coco verde foram triturados em moinho de facas, removendo-se a fração inferior a 0,85 mm para favorecer a permeabilidade dos gases durante a pirólise, resultando em tamanho médio de 4,83 mm. A palha de café foi utilizada sem processamento adicional, com tamanho médio de 3,83 mm.

As biomassas foram secas em estufa a 103 ± 2 °C até massa constante e colocadas em contêiner metálico (0,280 m x 0,145 m x 0,145 m), preenchido até 80% de seu volume. Os biochars foram produzidos em mufla, por pirólise lenta sob disponibilidade limitada de oxigênio, nas temperaturas de 450, 550 e 650 °C. O rendimento gravimétrico foi calculado pela relação entre a massa de biochar e a massa seca da biomassa (Oliveira et al., 2023). A granulometria foi determinada com base na ISO 17827-1 (ISO, 2024) e adaptação da série de peneiras, utilizando-se aberturas de 32, 16, 8, 4, 2 e 1 mm e fundo coletor para a fração inferior a 1 mm.

Para obter as propriedades das biomassas e dos biochars, os materiais foram moídos e classificados, utilizando-se a fração 40–60 mesh. Para a composição química estrutural, realizada apenas para as biomassas *in natura*, os extrativos foram quantificados conforme a TAPPI T 204 cm-17 (TAPPI, 2017), substituindo-se etanol/benzeno por etanol/tolueno. A lignina insolúvel foi determinada pelo método Klason, segundo a TAPPI T 222 om-21 (TAPPI, 2021) e a lignina solúvel conforme a TAPPI UM 250 (TAPPI, 2000). A lignina total correspondeu à soma das frações insolúvel e solúvel e a holocelulose foi estimada por diferença, subtraindo-se de 100 a soma dos teores de extrativos, lignina total e cinzas.

A composição imediata foi determinada conforme a ASTM D1762-84 (ASTM, 2021), obtendo-se materiais voláteis, cinzas e carbono fixo. A composição elementar foi analisada em equipamento TruSpec Micro, da LECO, segundo as normas EN16948 (DIN, 2015) para carbono, hidrogênio e nitrogênio e EN16994 (DIN, 2016) para enxofre, utilizando-se o módulo TruSpec S. O oxigênio foi estimado por diferença, subtraindo-se de 100 a soma de carbono, hidrogênio, nitrogênio, enxofre e cinzas. O poder calorífico superior (PCS) foi determinado conforme a EN14918 (DIN, 2010). Os poderes caloríficos inferior (PCI) e útil (PCU) foram calculados segundo metodologia proposta por Brito (1993). As razões atômicas H/C e O/C dos biochars foram calculadas conforme a *Puro Standard: Biochar Methodology – Version 2* (Puro.earth, 2025).

A combustibilidade dos biochars foi realizada conforme metodologia adaptada de Quirino e Brito (1991), utilizando-se 50 ± 0,5 g de material em recipiente metálico com base de malha de 0,6 mm e 15 g de etanol como fonte de ignição. A massa foi registrada em balança digital semi-analítica e a temperatura monitorada, em posição padronizada no leito, por termopar tipo K, em intervalos de um minuto. Foram obtidos os perfis temporais de massa residual, temperatura de combustão, taxa de perda de massa e taxa de liberação de energia. A taxa de perda de massa foi calculada pela diferença entre medições consecutivas, e a liberação

de energia, pelo produto dessa taxa pelo poder calorífico útil do biochar. Como parâmetros globais, determinaram-se o tempo de combustão, o tempo para atingir 150 °C, a temperatura máxima, a perda de massa, a taxa média de perda de massa e o índice de combustibilidade (ICOM). O ICOM foi calculado em função da proporção do tempo com temperatura superior a 150 °C, da temperatura máxima relativa a esse valor e da massa consumida nessa faixa térmica.

Adotou-se delineamento inteiramente casualizado, em esquema fatorial 3 x 3, com três repetições, totalizando 27 unidades amostrais. A normalidade dos resíduos e a homogeneidade das variâncias foram verificadas pelos testes de Shapiro–Wilk e Bartlett, respectivamente. Procedeu-se com a análise de variância e, constatado efeito significativo, as médias foram comparadas pelo teste de Tukey a 5% de significância. Aplicou-se Análise de Componentes Principais para avaliar as relações entre as propriedades dos biochars e a combustibilidade. As análises foram realizadas nos programas R 4.5.0 (R Core Team, 2025) e OriginPro 2026.

3. Resultados e discussão

A biomassa de origem influenciou a combustão mais intensamente que a temperatura de pirólise, determinando a intensidade, a duração e a dinâmica do processo. Independentemente da temperatura, os biochars de resíduos de eucalipto apresentaram combustão mais rápida e intensa, os de resíduos de coco verde, mais lenta e prolongada, e os de palha de café, comportamento intermediário (Figura 1).

As curvas de massa remanescente (Figura 1a–c) mostraram perda média de massa de 97,24% para os biochars de resíduos de eucalipto, associada ao baixo teor de cinzas (1,43%), ao elevado carbono fixo (80,62%), aos teores de carbono entre 77,05 e 91,11% e ao maior poder calorífico superior médio (7.839,6 kcal kg^{-1}). Maiores concentrações de carbono e menores teores de oxigênio favorecem o potencial energético, enquanto as cinzas, por constituírem uma fração mineral não combustível, reduzem o conteúdo energético e dificultam a transferência de calor e a oxidação da matriz carbonosa (Antal & Grønli, 2003; Vassilev et al., 2013).

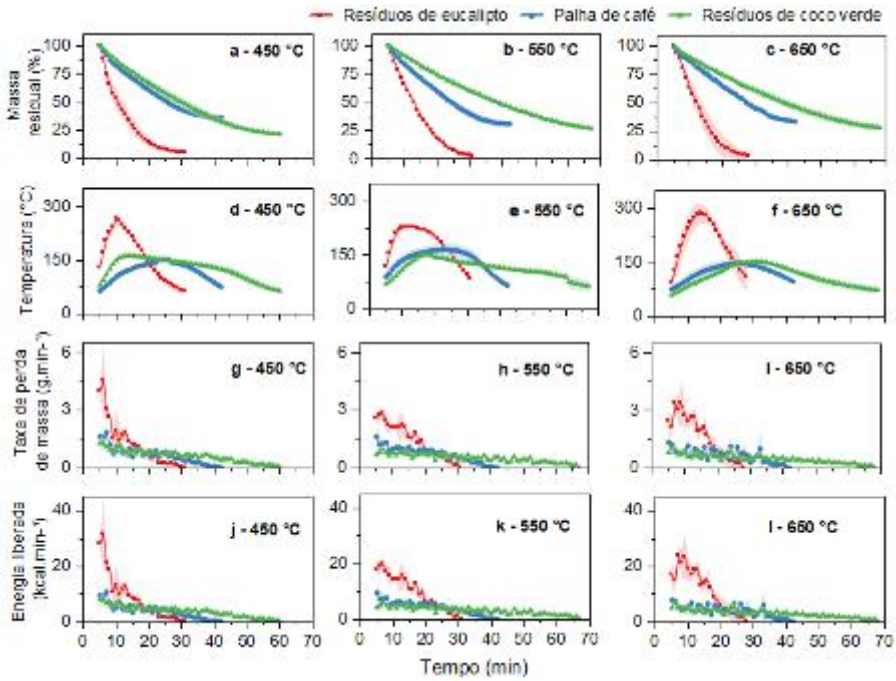


Figura 1 – Massa residual (a–c), temperatura do leito (d–f), taxa de perda de massa (g–i) e taxa estimada de liberação de energia (j–l) dos biochars de resíduos de eucalipto, palha de café e coco verde produzidos a 450, 550 e 650 °C em função do tempo.

Em contraste, os biochars de palha de café e de resíduos de coco verde mantiveram, respectivamente, 26,83% e 23,57% de massa ao final da combustão. Esse comportamento foi relacionado aos maiores teores de cinzas dos materiais, de 16,48 e 10,62%, que reduzem a fração combustível e influenciam a reatividade do carbono (Puri et al., 2024). As biomassas precursoras também tiveram menores teores de holocelulose, de 42,10 e 39,88%, e maiores concentrações de extrativos, de 25,87 e 24,76% e de cinzas, de 5,76 e 5,09%, para a palha de café e resíduos de coco verde, respectivamente. O maior teor de lignina dos resíduos de coco verde (30,27%) também pode ter contribuído para a formação de biochars com combustão mais gradual e prolongada.

As curvas de temperatura e taxa de perda de massa confirmaram esses padrões (Figura 1d–i). Os biochars de resíduos de eucalipto atingiram temperatura máxima média de 271,36 °C, enquanto os de palha de café e de resíduos de coco verde apresentaram curvas mais prolongadas e temperaturas máximas próximas de 159 °C. As taxas médias de perda de massa foram de 1,62, 0,88 e 0,60 $g \cdot min^{-1}$ para os biochars de resíduos de eucalipto, palha de café e resíduos de coco verde, respectivamente. Consequentemente, a liberação de energia dos biochars de resíduos eucalipto concentrou-se no início da combustão (Figura 1j–l), indicando rápida conversão da massa em energia (Ram et al., 2024). Sua combustão ocorreu aproximadamente duas vezes mais rápido em relação aos biochars de palha de café e três vezes mais rapidamente que os biochars

de resíduos de coco verde. Assim, distinguiram-se dois padrões de combustão, uma combustão rápida e intensa para os biochars de resíduos de eucalipto e combustão prolongada, com liberação gradual de energia, para os biochars de resíduos de coco verde e de palha de café.

Além da composição química, a granulometria pode ter influenciado esses padrões. Os menores tamanhos médios das partículas dos biochars de palha de café (2,98 mm) e de resíduos de coco verde (1,75 mm) podem ter favorecido leitos mais compactos e menos permeáveis, restringindo a circulação do ar e tornando o consumo de massa mais gradual. Em contrapartida, as partículas dos biochars de eucalipto, com média de 7,59 mm, podem ter formado leitos mais permeáveis, favorecendo o acesso do oxigênio e aumentando a velocidade da combustão (Perera & Narayana, 2019).

Os biochars de resíduos de coco verde apresentaram os maiores tempos de combustão (61–68 min), seguidos pelos de palha de café, com aproximadamente 42 min, e pelos de resíduos de eucalipto, entre 28 e 30 min (Figura 2I), sem efeito significativo da temperatura de pirólise dentro de cada biomassa..

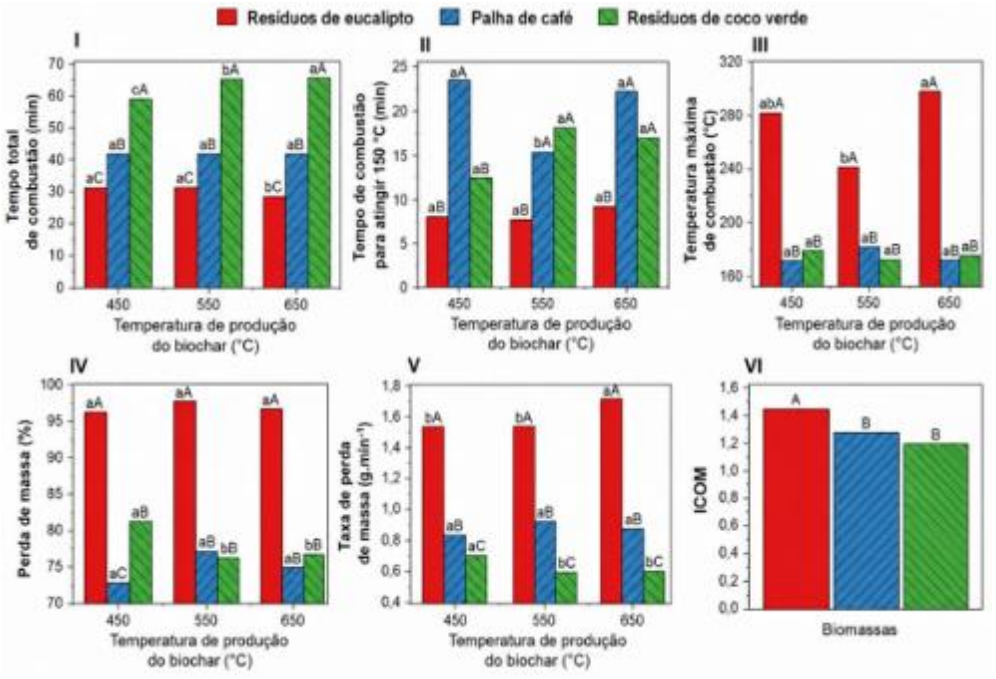


Figura 2 – Parâmetros globais de combustibilidade dos biochars: tempo total de combustão (I), tempo para atingir 150 °C (II), temperatura máxima de combustão (III), perda de massa (IV), taxa de perda de massa (V) e índice de combustibilidade – ICOM (VI).
Letras distintas indicam diferenças pelo teste de Tukey ($p < 0,05$): minúsculas comparam biomassas e maiúsculas, temperaturas.

Os biochars de resíduos de eucalipto também atingiram 150 °C mais rapidamente, em 6–7 min, enquanto os de resíduos de coco verde demandaram 12–18 min e os de palha de café, 15–

23 min (Figura 2II), confirmando a maior reatividade inicial do eucalipto. De modo semelhante, Ram et al. (2024) relacionaram maiores teores de cinzas à maior resistência dos biochars à oxidação.

Embora os biochars de resíduos de coco verde tenham permanecido em combustão por mais tempo, apresentaram menores temperaturas e taxas de liberação de energia, demonstrando que a maior duração esteve associada à distribuição gradual da energia, e não à maior intensidade. O ICOM foi significativamente superior para os biochars de resíduos de eucalipto, enquanto os biochars de palha de café e de resíduos de coco verde não diferiram entre si. A ausência de efeito significativo da temperatura sobre o índice reforçou o predomínio da biomassa de origem na combustibilidade (Figura 2VI).

Esses padrões podem orientar o uso dos biochars. Materiais com combustão rápida e elevada liberação de energia podem atender processos que exigem aquecimento rápido e maior potência térmica, enquanto aqueles com combustão prolongada e liberação gradual de energia podem favorecer sistemas contínuos que exigem mais estabilidade (Zhu et al., 2024). Por outro lado, durante o manuseio, transporte e armazenamento, maior reatividade térmica exige maior atenção à exposição a fontes externas de calor e às condições que favoreçam o autoaquecimento.

A análise de componentes principais explicou 81,2% da variabilidade total dos dados, distribuída entre PC1 (60,6%) e PC2 (20,6%) (Figura 3). O agrupamento por biomassa promoveu nítida separação entre os biochars de resíduos de eucalipto e aqueles produzidos com palha de café e resíduos de coco verde, demonstrando que a composição da matéria-prima exerceu forte influência sobre as propriedades físico-químicas e a combustibilidade dos materiais (Figura 3a).

Figura 3 – Análise de componentes principais (PCA) dos biochars em função de suas propriedades físico-químicas e de combustibilidade, evidenciando o agrupamento em função da biomassa de origem (a) e da temperatura de pirólise (b).

Os biochars de resíduos de eucalipto associaram-se aos maiores teores de carbono elementar e fixo, poder calorífico superior, temperatura máxima, taxa e perda de massa e ICOM, indicando maior enriquecimento em carbono, qualidade energética e intensidade de combustão. Em oposição, os biochars de palha de café e de resíduos de coco verde relacionaram-se aos maiores teores de oxigênio, nitrogênio e cinzas, relação O/C, tempo para atingir 150 °C e tempo total de combustão, caracterizando menor potencial energético, menor grau de carbonização e combustão mais prolongada. A sobreposição parcial das elipses das biomassas agrícolas indicou

diferenças menores entre elas do que em relação à biomassa florestal. A posição oposta das cinzas em relação ao ICOM, à temperatura máxima e à taxa e perda de massa reforçou sua associação com menor intensidade e maior duração da combustão.

Na PCA em função da temperatura (Figura 3b), os biochars produzidos a 450 °C associaram-se aos maiores teores de materiais voláteis, hidrogênio e oxigênio e às relações H/C e O/C, enquanto os produzidos a 650 °C se relacionaram aos maiores teores de carbono elementar e fixo. Os materiais obtidos a 550 °C ocuparam posição intermediária, refletindo a eliminação progressiva de compostos oxigenados e hidrogenados e a formação de estruturas mais aromáticas e estáveis com o aumento da temperatura (Babu et al., 2024). Embora a temperatura tenha alterado a composição dos biochars, a sobreposição das elipses confirmou o predomínio da biomassa de origem na diferenciação da combustibilidade.

Assim, embora o aumento da temperatura de pirólise tenha promovido maior carbonização e enriquecimento em carbono fixo, essas alterações não se traduziram em mudanças proporcionais nos parâmetros globais de combustibilidade. No intervalo de 450–650 °C, a temperatura atuou, portanto, como fator secundário em relação à biomassa de origem, indicando que o ajuste da temperatura pode ser empregado para modificar a composição e a estabilidade do biochar sem necessariamente alterar de forma dominante seu perfil de combustão.

4. Conclusões

A biomassa de origem foi o principal fator determinante das propriedades físico-químicas e da dinâmica de combustão dos biochars, seguida pela temperatura de pirólise, condicionando sua qualidade e aplicação. Foram identificados dois perfis de combustão, os biochars de resíduos de eucalipto apresentaram maior reatividade e potencial energético, com combustão rápida e intensa liberação inicial de energia, enquanto os de palha de café e de resíduos de coco verde tiveram aquecimento mais lento, menor intensidade e combustão prolongada. O teor de cinzas foi a propriedade química mais negativamente associada à combustibilidade e o tamanho médio das partículas, a propriedade física mais relacionada às diferenças observadas. Assim, a biomassa precursora constitui um critério estratégico para direcionar a produção, o uso e as condições de manuseio, transporte e armazenamento dos biochars, considerando o desempenho e a segurança logística.

5. Agradecimentos

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais – FAPEMIG (Processos APQ-05311-24 e APQ-04599-25); ao Conselho Nacional de Desenvolvimento

Científico e Tecnológico – CNPq (Processos nº 444395/2024-5 e nº 301142/2026-2); e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil – CAPES (Código de Financiamento 001).

6. Referências bibliográficas

Antal, M. J., Jr., & Grønli, M. (2003). The art, science, and technology of charcoal production. *Industrial & Engineering Chemistry Research, 42*(8), 1619–1640. https://doi.org/10.1021/ie0207919

ASTM International. (2021). *ASTM D1762-84(2021): Standard test method for chemical analysis of wood charcoal*. https://doi.org/10.1520/D1762-84R21

Babu, K., Nataraj, M., Tayappa, M., Vyas, Y., Mishra, R., & Acharya, B. (2024). Production of biochar from waste biomass using slow pyrolysis: Studies of the effect of pyrolysis temperature and holding time on biochar yield and properties. *Materials Science for Energy Technologies, 7*, 318–334. https://doi.org/10.1016/j.mset.2024.05.002

Brito, J. O. (1993). Expressão da produção florestal em unidades energéticas. In *Anais do 1º Congresso Florestal Pan-Americano e 7º Congresso Florestal Brasileiro* (pp. 280–282). Sociedade Brasileira de Silvicultura/Sociedade Brasileira de Engenheiros Florestais.

Deutsches Institut für Normung. (2010). *DIN EN 14918:2010-04: Solid biofuels—Determination of calorific value*.

Deutsches Institut für Normung. (2015). *DIN EN ISO 16948:2015-09: Solid biofuels—Determination of total content of carbon, hydrogen and nitrogen*. https://doi.org/10.31030/2244183

Deutsches Institut für Normung. (2016). *DIN EN ISO 16994:2016-12: Solid biofuels—Determination of total content of sulfur and chlorine*. https://doi.org/10.31030/2558210

International Organization for Standardization. (2024). *ISO 17827-1:2024: Solid biofuels—Determination of particle size distribution for uncompressed fuels—Part 1: Oscillating screen method using sieves with apertures of 3.15 mm and above*. https://www.iso.org/standard/85081.html

Mahmood, F., Ali, M., Khan, M., Mbeugang, C. F. M., Isa, Y. M., Kozlov, A., Penzik, M., Xie, X., Yang, H., Zhang, S., & Li, B. (2025). A review of biochar production and its employment in synthesizing carbon-based materials for supercapacitors. *Industrial Crops and Products, 227*, 120830. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2025.120830

Matsobane, E. T., Onifade, M., Genc, B., & Bada, S. (2024). Comparative investigation of spontaneous combustion of biomass, hydrochar, coal and their blends using Wits-Ehac and thermogravimetric analysis. *International Journal of Coal Preparation and Utilization, 44*(12), 2155–2179. https://doi.org/10.1080/19392699.2024.2312174

Oliveira, L. P. de, Carneiro, A. de C. O., Peres, L. C., Demuner, I. F., Ferreira, S. O., Fernandes, S. A., & Jorge, F. de J. (2023). Wood and charcoal quality in the selection of *Eucalyptus* spp. clones and *Corymbia torelliana* × *Corymbia citriodora* for steel industry. *Revista Árvore, 47*, e4722. https://doi.org/10.1590/1806-908820230000022

Perera, K. U. C., & Narayana, M. (2019). Modelling of particle size effect on equivalence ratio requirement for wood combustion in fixed beds. *Biomass Conversion and Biorefinery, 9*(1), 183–199. https://doi.org/10.1007/s13399-018-0348-0

Phounglamcheik, A., Johnson, N., Kienzl, N., Strasser, C., & Umeki, K. (2022). Self-heating of biochar during postproduction storage by O_2 chemisorption at low temperatures. *Energies*, *15*(1), 380. https://doi.org/10.3390/en15010380

Puri, L., Hu, Y., & Naterer, G. (2024). Critical review of the role of ash content and composition in biomass pyrolysis. *Frontiers in Fuels*, *2*, 1378361. https://doi.org/10.3389/ffuel.2024.1378361

Puro.earth. (2025). *Puro standard: Biochar methodology—Edition 2025* (Version 2).

Quirino, W. F., & Brito, J. O. (1991). *Características e índice de combustão de briquetes de carvão vegetal* (Série Técnica LPF No. 13). Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis, Laboratório de Produtos Florestais. https://mundoflorestal.com.br/arquivos/indice.pdf

Ram, S., Vasudev, V., & Ku, X. (2024). Characterization and kinetic analysis of lignocellulosic and algal biochar combustion. *International Journal of Fluid Engineering*, *1*(2), 024302. https://doi.org/10.1063/5.0194358

R Core Team. (2025). *R: A language and environment for statistical computing* (Version 4.5.0) [Computer software]. R Foundation for Statistical Computing. https://www.R-project.org/

TAPPI. (2000). *UM 250: Acid-soluble lignin in wood and pulp*.

TAPPI. (2017). *T 204 cm-17: Solvent extractives of wood and pulp*. TAPPI Press.

TAPPI. (2021). *T 222 om-21: Acid-insoluble lignin in wood and pulp*. TAPPI Press.

Vassilev, S. V., Baxter, D., Andersen, L. K., & Vassileva, C. G. (2013). An overview of the composition and application of biomass ash. *Fuel*, *105*, 19–39. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2012.10.001

Wu, P., Fu, Y., Vancov, T., Wang, H., Wang, Y., & Chen, W. (2024). Analyzing the trends and hotspots of biochar's applications in agriculture, environment, and energy: A bibliometrics study for 2022 and 2023. *Biochar*, *6*(1), 78. https://doi.org/10.1007/s42773-024-00370-x

Zhu, G., Wen, C., Liu, T., Xu, M., Ling, P., Wen, W., & Li, R. (2024). Combustion and co-combustion of biochar: Combustion performance and pollutant emissions. *Applied Energy*, *376*, 124292. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2024.124292

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Biomassa lenhosa e potencial energético de espécies da Caatinga em áreas sob regeneração florestal

Francisco José de Oliveira Souza[1]; Rosimeire Cavalcante dos Santos[1]; Fabíola Martins Delatorre[2]; Sabrina Soares da Silva[2]; Renato Vinicius Oliveira Castro[3]; Frans Germain Corneel Pareyn[4]; Ananias Francisco Dias Júnior[2]

[1] Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Centro de Ciências Florestais e Agronômicas (UFRN)
[2] Departamento de Florestas e Ciências da Madeira, Universidade Federal do Espírito Santo (UFES)
[3] Universidade Federal de São João del-Rei (UFSJ)
[4] Associação de Plantas do Nordeste

Resumo: As florestas tropicais sazonalmente secas são importantes ecossistemas das regiões tropicais e subtropicais, sendo a Caatinga a maior formação desse tipo no domínio Neotropical. A regeneração natural desempenha papel fundamental na recuperação da vegetação e na sustentabilidade do manejo florestal. Este estudo teve como objetivo avaliar a influência da idade de regeneração sobre a composição florística, estrutura da vegetação, produção de biomassa e potencial energético em áreas manejadas da Caatinga, no município de Cruzeta (RN). Foram analisados talhões com diferentes idades de regeneração por meio de inventário florestal, mensuração de variáveis dendrométricas e cálculo do Índice de Valor de Importância (IVI). Os resultados indicaram predominância de *Croton blanchetianus*, seguida de *Piptadenia stipulacea* e *Cenostigma nordestinum*, espécies com elevada importância ecológica. Os talhões mais antigos apresentaram os maiores estoques de biomassa lenhosa, com médias variando de 17,98 a 22,65 ton ha^{-1}, enquanto os talhões jovens exibiram 11,38 a 15,72 ton ha^{-1}. O volume médio variou de 17,29 a 33,61 m^3 ha^{-1}, sem diferença significativa entre as idades. O incremento periódico anual apresentou comportamento inverso, sendo maior nos talhões jovens (2,26 ton ha^{-1}) e reduzido nos mais antigos (0,82 ton ha^{-1}). O poder calorifico superior (PCS) das espécies dominantes manteve-se relativamente estável, com valores médios de 4.534 a 4.797 kWh ha^{-1}. Conclui-se que o manejo florestal sustentável favorece a recuperação da vegetação, o acúmulo de biomassa e o aproveitamento energético da Caatinga, contribuindo para sua conservação e uso sustentável.

Palavras-chave: Regeneração natural; Manejo florestal sustentável; Semiárido brasileiro.

Woody biomass and energy potential of caatinga species in areas under forest regeneration

Abstract: Seasonally dry tropical forests are important ecosystems in tropical and subtropical regions, with the Caatinga being the largest formation of this type in the Neotropical realm. Natural regeneration plays a fundamental role in vegetation recovery and the sustainability of forest management. This study aimed to evaluate the influence of regeneration age on floristic composition, vegetation structure, biomass production, and energy potential in managed areas of the Caatinga in the municipality of Cruzeta (RN). Plots with different regeneration ages were analyzed using forest inventory methods, dendrometric measurements, and the calculation of the Importance Value Index (IVI). The results indicated a predominance of *Croton blanchetianus*, followed by *Piptadenia stipulacea* and *Cenostigma nordestinum* species of high ecological importance. The older plots showed the highest woody biomass stocks, with

averages ranging from 17.98 to 22.65 t.ha^{-1}, whereas the young plots exhibited 11.38 to 15.72 t ha^{-1}. Mean volume ranged from 17.29 to 33.61 m^3 ha^{-1}, with no significant difference between age groups. Periodic annual increment showed an inverse trend, being higher in young plots (2.26 t ha^{-1}) and lower in older ones (0.82 t ha^{-1}). The energy potential of the dominant species remained relatively stable, with mean values ranging from 4,534 to 4,797 kWh ha^{-1}. It is concluded that sustainable forest management fosters vegetation recovery, biomass accumulation, and energy utilization in the Caatinga, contributing to its conservation and sustainable use.

Keywords: Natural regeneration; Sustainable forest management; Brazilian semi-arid.

1. Introdução

As florestas tropicais secas constituem um dos principais ecossistemas das regiões tropicais e subtropicais, ocupando cerca de 42% da cobertura florestal dessas áreas (Pereira Dos Santos et al., 2025). No domínio Neotropical, essas formações apresentam ampla distribuição, sendo influenciadas por clima, relevo e características edáficas, resultando em elevada heterogeneidade estrutural e florística (Banda-R et al., 2016; Ocón et al., 2021; Pereira Dos Santos et al., 2025). Entre essas formações, destaca-se a Caatinga, considerada a maior floresta tropical sazonalmente seca da região Neotropical. A Caatinga, restrita ao semiárido brasileiro, ocupa aproximadamente 826.411 km^2 e integra a denominada "diagonal seca" da América do Sul (Banda-R et al., 2016; Neves et al., 2015; Silva et al., 2017). Apesar das diferentes denominações empregadas na literatura, essas formações compartilham a forte sazonalidade climática e os longos períodos de escassez hídrica que condicionam a estrutura e o funcionamento da vegetação (Pereira Dos Santos et al., 2025).

A produtividade dessas florestas está diretamente relacionada ao estágio de regeneração, uma vez que o tempo de recuperação após a exploração influencia o crescimento e o acúmulo de biomassa lenhosa (De Carvalho et al., 2020; Epifanio de Lima et al., 2024; Piao et al., 2019). Na Caatinga, a regeneração natural constitui o principal mecanismo de recomposição da vegetação e de sustentação do manejo florestal. Durante a sucessão ecológica, ocorrem mudanças na composição, estrutura e produtividade, cuja velocidade depende da intensidade de exploração, das condições ambientais e das características das espécies (Epifanio de Lima et al., 2024; Santos et al., 2023). Assim, compreender a dinâmica estrutural e produtiva de povoamentos em diferentes idades de regeneração é essencial para estratégias de manejo sustentável.

O avanço da regeneração aumenta a complexidade estrutural, os estoques de biomassa e o potencial energético, enquanto áreas iniciais tendem a ser dominadas por espécies pioneiras e acumular menos biomassa. Este estudo buscou avaliar a influência da idade de regeneração

sobre a composição florística, a estrutura, a produção de biomassa e o potencial energético da Caatinga, além de identificar espécies de maior importância ecológica e sua contribuição para o estoque lenhoso.

2. Material e métodos

2.1. Área de estudo

O estudo foi realizado em 2024 nas fazendas Estrela do Norte e Quimporó, em Cruzeta, Rio Grande do Norte, ambas sob manejo florestal sustentável. A área está localizada na microrregião do Seridó Oriental, de clima semiárido. A amostragem foi conduzida em parcelas permanentes de 20 × 20 m, distribuídas aleatoriamente em sete talhões, conforme o protocolo da Rede de Manejo Florestal da Caatinga.

2.2. Inventário florestal, índice de valor de importância e medição da biomassa

O inventário florestal foi realizado em todas as parcelas permanentes, seguindo os procedimentos da Rede de Manejo Florestal da Caatinga (Comitê Técnico-Científico da Rede de Manejo Florestal da Caatinga, 2005). Foram amostrados indivíduos arbóreo-arbustivos, com identificação botânica inicialmente por nomenclatura popular e posteriormente confirmada em literatura especializada. Foram registrados o diâmetro na base (DB, a 0,30 m), o diâmetro à altura do peito (DAP, a 1,30 m) e a altura total (H), obtidos com fita métrica e régua topográfica (Santos et al., 2023).

A estrutura horizontal da vegetação foi caracterizada pelo Índice de Valor de Importância (IVI), utilizado para identificar as espécies mais representativas da comunidade florestal. O índice foi calculado pela média da densidade relativa, dominância relativa e frequência relativa, conforme a Equação 1 e a metodologia adotada por Carvalho et al., 2020; Lima & Barbosa, 2018; Santos et al., 2016; Travassos De Queiroz et al., e (Santos et al., 2016)

$$IVI = \frac{DR + DoR + Fr}{3} \quad (1)$$

Em que: *IVI* = Índice de Valor de Importância; *DR* = corresponde à densidade relativa; *DoR*= dominância relativa; e *Fr* = frequência relativa.

O volume lenhoso individual foi estimado por meio da Equação 2, utilizando-se o diâmetro à altura do peito (DAP), a altura total das árvores e fator de forma igual a 0,91, valor recomendado para formações florestais da Caatinga (De Carvalho et al., 2020; Epifanio de Lima et al., 2024).

$$V_r = \frac{\pi \, x \, DAP^2 \, x \, H_t \, x \, ff}{40000} \quad (2)$$

Em que: V_r= corresponde ao volume lenhoso estimado por indivíduo (m^3); *DAP*= diâmetro à altura de 1,30 m do solo (cm), obtido a partir da relação da circunferência à altura do peito *(CAP)*, pela relação *CAP/π;* H_t = altura total da árvore (m); e *ff*= fator de forma adotado.

2.3. Potencial energético

As propriedades energéticas e físicas da madeira foram avaliadas por meio da determinação da densidade básica e do poder calorífico superior. A densidade básica foi obtida conforme os procedimentos estabelecidos na norma ASTM D2395-17 (ASTM, 2017), enquanto o poder calorífico superior foi determinado segundo a norma DIN 51900-1 (DIN EN, 2000), empregando um calorímetro IKA C200.

2.4. Análise estatística

O inventário florestal foi conduzido por meio deamostragem estratificada aleatória, com subdivisão da área em estratos homogêneos e distribuição aleatória das unidades amostrais (Viana et al., 2022). A avaliação experimental seguiu delineamento inteiramente casualizado (DIC), considerando as diferentes idades de regeneração dos talhões (7, 8, 9, 11, 12, 13 e 14 anos) como tratamentos. Os dados foram submetidos aos testes de Shapiro-Wilk e Bartlett para verificar normalidade e homogeneidade das variâncias, respectivamente. Em seguida, realizou-se análise de variância (ANOVA) e, quando necessário, teste de Tukey para comparação das médias. As relações entre variáveis foram avaliadas por regressões lineares e não lineares. Todas as análises foram realizadas no software R (R Core Team, 2024), adotando-se nível de significância de 5%.

3. Resultados e discussão

As dez espécies com maiores valores de IVI representaram 95,63% da população amostrada (Figura 1). *Croton blanchetianus* apresentou maior IVI (56,61%), seguida por *Piptadenia stipulacea* (16,95%) e *Cenostigma nordestinum* (8,80%). As demais espécies apresentaram IVI inferior a 5%, destacando-se *Mimosa tenuiflora* (4,22%) e *Bauhinia cheilantha* (2,46%).

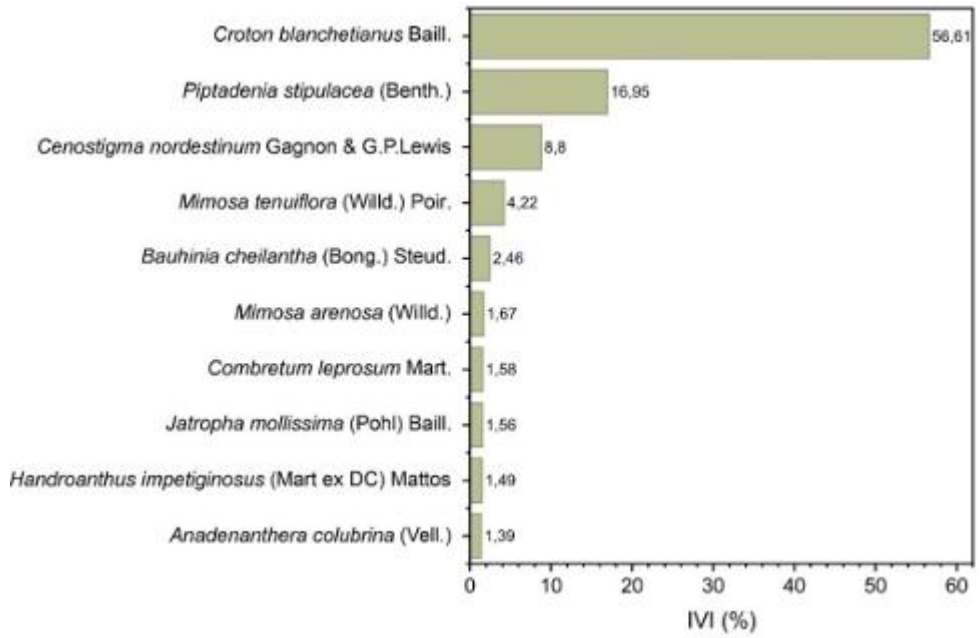


Figura 1 – Índice de Valor de Importância (IVI) das dez espécies mais representativas em áreas de Caatinga submetidas ao manejo florestal sustentável.

A predominância de *Croton blanchetianus* evidencia sua elevada capacidade de estabelecimento e adaptação às condições do semiárido, sendo característica de áreas em regeneração na Caatinga sob regeneração natural e submetidas a diferentes intensidades de manejo florestal (Santos et al., 2023). Elevada representatividade de *Piptadenia stipulacea*, *Cenostigma nordestinum* e *Mimosa tenuiflora* reforça a importância dessas espécies na estrutura da comunidade e nos processos de recuperação da vegetação após o manejo. A concentração dos maiores valores de IVI em poucas espécies é característica de áreas em sucessão secundária, nas quais espécies mais adaptadas às condições locais apresentam maior vantagem competitiva (Santos et al., 2016).

A comparação com os inventários pré-manejo indica alterações na composição florística, porém com manutenção da riqueza de espécies. Antes do manejo, foram registradas 18 espécies na Fazenda Quimporó e 20 na Fazenda Estrela do Norte (Lopes, 2009, 2010), enquanto após a intervenção o número de espécies permaneceu semelhante. Esse padrão corrobora os resultados de (Santos et al., 2023), que observaram manutenção da riqueza florística cinco anos após o manejo em áreas de Caatinga. Além dos efeitos sobre a composição e a manutenção da diversidade, a regeneração pós-manejo também influenciou os atributos produtivos da vegetação. A produção de biomassa e o índice de produção anual no último ano apresentaram diferenças significativas entre as idades de regeneração pós-corte. Para o volume,

observou-se tendência de aumento com a idade de regeneração, porém sem diferenças estatísticas significativas entre os talhões avaliados (Figura 2).

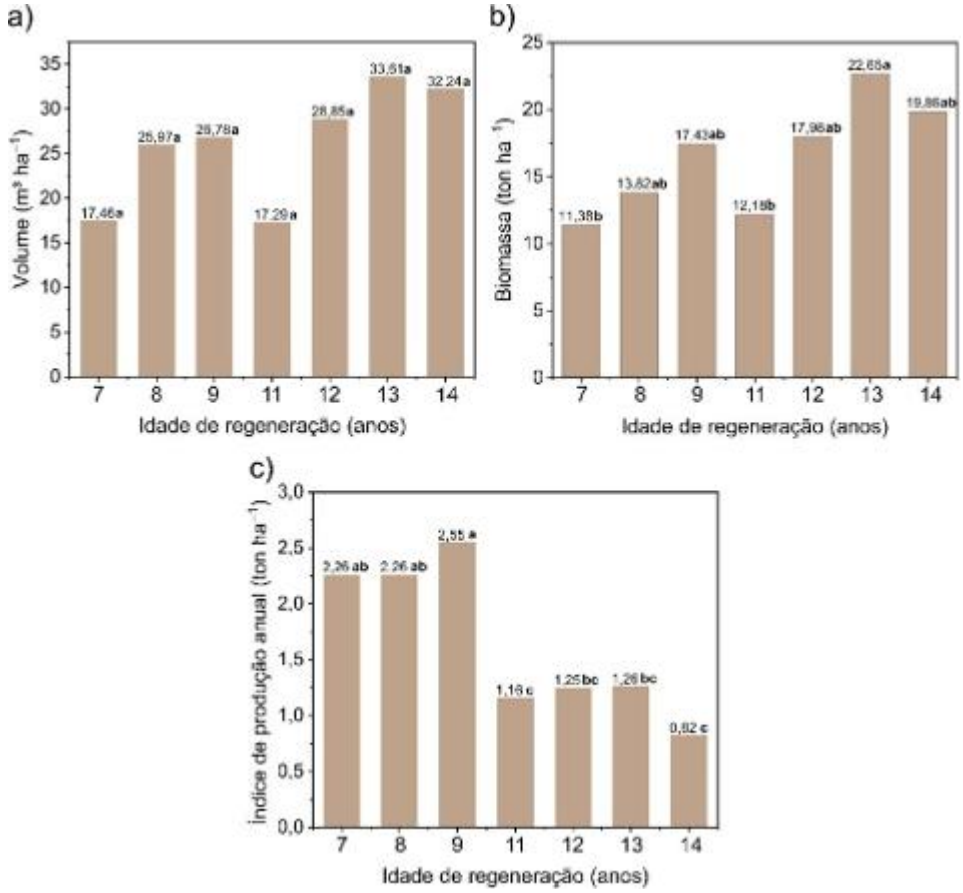


Figura 2 – (A) Volume, (B) Biomassa e (C) Índice de produção anual em áreas de Caatinga submetidas ao manejo florestal sustentável com diferentes idades de regeneração pós-corte. *Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey (p > 0,05).*

O volume médio variou de 17,29 a 33,61 m^3 ha^{-1}, com maiores valores nos talhões de 13 e 14 anos e menores aos 7 e 11 anos (Figura 2A). Apesar da tendência de aumento, não houve diferenças significativas entre idades. Para biomassa, os maiores valores foram registrados nos talhões com maior idade de regeneração, alcançando 22,65 ton ha^{-1} aos 13 anos, seguidos por 19,86 e 17,98 ton ha^{-1} aos 14 e 12 anos, respectivamente (Figura 2B). Os menores foram registrados aos 7 e 11 anos, com 11,38 e 12,18 ton ha^{-1}. O incremento periódico anual apresentou padrão distinto, com maiores valores entre 7 e 9 anos, variando de 2,26 a 2,55 ton ha^{-1} ano^{-1}, e redução progressiva nos talhões mais antigos, atingindo 0,82 ton ha^{-1} ano^{-1} aos 14 anos (Figura 2C).

O aumento da biomassa e do volume nos talhões mais antigos indica que a regeneração natural favorece o acúmulo de material lenhoso, padrão observado em áreas manejadas da Caatinga (Lucena et al., 2026). Entretanto, a ausência de diferenças significativas no volume sugere que fatores ambientais, como características do solo, disponibilidade hídrica e composição florística, também podem influenciar o desenvolvimento da vegetação (Lucena et al., 2026; Noutcheu et al., 2024). Dessa forma, o manejo aliado a períodos adequados de pousio contribui para a recuperação da produtividade e dos estoques da Caatinga (Lucena et al., 2026).

Com base no IVI, foram selecionadas as 10 espécies mais representativas, correspondendo a 95,63% da população florestal (Figura 3).

	Densidade básica (kg m^{-3})	PCS (kWh ha^{-1})
Croton blanchetianus Baill.	587.0	4600.0
Piptadenia stipulacea (Benth.) Ducke	751.1	4797.0
Mimosa tenuiflora (Willd.) Poir.	843.3	4720.0
Bauhinia cheilantha (Bong.) Steud.	864.0	4616.0
Commiphora leptophloeos	420.0	4534.0
Jatropha mollissima (Pohl) Baill.	186.0	4616.0
Anadenanthera colubrina (Vell.)	672.0	4511.0
Aspidosperma pyrifolium Mart. & Zucc.	669.0	4725.0
Sideroxylon obtusifolium (Roem. & Schult.) TD Penn.	761.8	4666.0
Pseudobombax marginatum (A.St.-Hil.)	173.0	4699.0

Figura 3 – Densidade básica da madeira (kg.m^{-3}) e poder calorífico superior (PCS) das principais espécies arbóreas e arbustivas registradas em áreas de Caatinga submetidas ao manejo florestal sustentável.

A densidade básica da madeira variou de 173 kg m^{-3} em *Pseudobombax marginatum* e 864 kg m^{-3} em *Bauhinia cheilantha*. Já o poder calorífico superior apresentou menor variação, entre 4.534 e 4.797 kWh ha^{-1} entre *Commiphora leptophloeos* e *Piptadenia stipulacea*, respectivamente. Apesar da ampla variação na densidade básica, os valores de PCS apresentaram menor amplitude entre as espécies avaliadas, indicando desempenho semelhante entre as principais espécies da Caatinga (Montoya et al., 2023). Esse resultado reforça que o manejo florestal sustentável, ao favorecer a regeneração e a manutenção da diversidade florística, também garante estoques de biomassa com elevado valor energético (Andrade et al., 2025). As espécies de maior importância ecológica, identificadas pelo IVI, contribuem simultaneamente para a estrutura da vegetação e para o potencial de aproveitamento energético,

evidenciando que a conservação e o manejo adequado da Caatinga podem conciliar produtividade florestal e sustentabilidade.

4. Conclusões

O manejo florestal sustentável na Caatinga favoreceu a recuperação da vegetação arbórea, com manutenção da riqueza florística e incremento dos estoques de biomassa e volume lenhoso ao longo da regeneração. As espécies de maior importância ecológica contribuíram para a estrutura e funcionalidade dos talhões, enquanto o potencial energético da biomassa reforça a viabilidade do uso sustentável desses recursos. Estudos futuros podem aprofundar a avaliação das propriedades energéticas da biomassa e ampliar o conhecimento sobre seu potencial de aproveitamento biotecnológico.

5. Agradecimentos

Os autores agradecem à Universidade Federal do Espírito Santo (UFES) pelo suporte institucional e infraestrutura disponibilizados. Reconhecem também o apoio financeiro da CAPES, CNPq e FAPES, além da colaboração técnica e científica das instituições parceiras, fundamentais para o desenvolvimento deste trabalho.

6. Referências bibliográficas

Andrade, F., Guirardi, B., Lima, N., Santos, R., Plata-Rueda, A., Zanuncio, A., Santana, N., & Santos, S. (2025). Energy potential of Prosopis juliflora wood in Brazilian Caatinga biome. *JOURNAL OF TROPICAL FOREST SCIENCE*, *37*(1), 1–10. https://doi.org/10.26525/jtfs2025.37.1.1

Banda-R, K., Delgado-Salinas, A., Dexter, K. G., Linares-Palomino, R., Oliveira-Filho, A., Prado, D., Pullan, M., Quintana, C., Riina, R., Rodríguez M., G. M., Weintritt, J., Acevedo-Rodríguez, P., Adarve, J., Álvarez, E., Aranguren B., A., Arteaga, J. C., Aymard, G., Castaño, A., Ceballos-Mago, N., Pennington, R. T. (2016). Plant diversity patterns in neotropical dry forests and their conservation implications. *Science*, *353*(6306), 1383–1387. https://doi.org/10.1126/science.aaf5080

Comitê Técnico-Científico da Rede de Manejo Florestal da Caatinga. (2005). *Protocolo de medições de parcelas permanentes*.

De Carvalho, A. C., Dos Santos, R. C., Castro, R. V. O., De Sousa Santos, C. P., De Lima Costa, S. E., De Carvalho, A. J. E., Pareyn, F. G. C., Vidaurre, G. B., Junior, A. F. D., & De Almeida, M. N. F. (2020). Caatinga wood energy production coupled with sustainable

forest management. *Scientia Forestalis/Forest Sciences*, *48*(126). https://doi.org/10.18671/scifor.v48n126.08

DIN 51900-1:2000-04, Prüfung fester und flüssiger Brennstoffe_- Bestimmung des Brennwertes mit dem Bomben-Kalorimeter und Berechnung des Heizwertes_- Teil_1: Allgemeine Angaben, Grundgeräte, Grundverfahren. (2000). Beuth Verlag GmbH. https://doi.org/10.31030/8511091

Epifanio de Lima, J. L. P., Santos, R. C. dos, Oliveira Castro, R. V., Corneel Pareyn, F. G., Damião Mendes, M. C., Ferreira Gomes, I. R., Delatorre, F. M., Dias Júnior, A. F., & Saloni, D. (2024). Volumetric and energy production assessment of wood in managed forest in the Brazilian arid biome. *BioResources*, *19*(4), 7195–7215. https://doi.org/10.15376/biores.19.4.7195-7215

Lima, E. G. de, & Barbosa, V. S. (2018). Fitossociologia do estrato arbustivo-arbóreo em regeneração em área de Caatinga, Baixio-CE. *Revista Ecologia e Nutrição Florestal - ENFLO*, *6*(3), 79. https://doi.org/10.5902/2316980x33272

Lopes, E. W. F. (2009). *Plano de manejo florestal sustentável – Fazenda Quimporó*.

Lopes, E. W. F. (2010). *Plano de manejo florestal sustentável – Fazenda Estrela do Norte*.

Lucena, M. S. de, Zakia, M. J. B., & Silva, V. F. da. (2026). Do environmental and anthropogenic factors condition woody biomass recovery after forest harvesting in the Caatinga? *Revista Caatinga*, *39*. https://doi.org/10.1590/1983-21252026v3912988rc

Montoya, J. D. M., Silva, J. A. A., Braz, R. L., Lana, M. D., Lazo, D. A. Á., Gallo, R., Cespedes, G. H. G., & Ferreira, R. L. C. (2023). Chemical composition and energy potential of woody species in dry forest: subsidies for sustainable forest management. *Revista Brasileira de Ciências Agrárias - Brazilian Journal of Agricultural Sciences*, *18*(1), 1–15. https://doi.org/10.5039/agraria.v18i1a2868

Neves, D. M., Dexter, K. G., Pennington, R. T., Bueno, M. L., & Oliveira Filho, A. T. (2015). Environmental and historical controls of floristic composition across the South American Dry Diagonal. *Journal of Biogeography*, *42*(8), 1566–1576. https://doi.org/10.1111/jbi.12529

Noutcheu, R., Oliveira, F. M. P., Wirth, R., Tabarelli, M., & Leal, I. R. (2024). Chronic human disturbance and environmental forces drive the regeneration mechanisms of a Caatinga dry tropical forest. *Perspectives in Ecology and Conservation*, *22*(1), 79–92. https://doi.org/10.1016/j.pecon.2024.01.002

Ocón, J. P., Ibanez, T., Franklin, J., Pau, S., Keppel, G., Rivas-Torres, G., Shin, M. E., & Gillespie, T. W. (2021). Global tropical dry forest extent and cover: A comparative study of bioclimatic definitions using two climatic data sets. *PLOS ONE*, *16*(5), e0252063. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0252063

Pereira Dos Santos, M. M., Morellato, L. P. C., Freire da Silva, T. G., Jardim, A. M. da R. F., de Souza, C. A. A., Dos Santos, W. R., & Bastos de Souza, L. S. (2025). Integrating approaches and methodologies into phenological research in Neotropical dry forests: a

systematic review. Em *Environmental Research Letters* (Vol. 20, Número 8). Institute of Physics. https://doi.org/10.1088/1748-9326/ade9e2

Santos, R. C. dos, Castro, R. V. O., Carneiro, A. D. C. O., Castro, A. F. N. M., Pimenta, A. S., Pinto, E. M., & Marinho, I. V. (2016). Estoques de volume, biomassa e carbono na madeira de espécies da Caatinga em Caicó, RN. *Pesquisa Florestal Brasileira*, *36*(85), 1. https://doi.org/10.4336/2016.pfb.36.85.772

Santos, R. C., Pareyn, F. G. C., Santos, C. P. S., Minini, D., Rocha, S. M. G., Souza, F. J. O., Cezario, L. F. C., Dias Júnior, A. F., & Castro, R. V. O. (2023). Quantification of Wood Biomass in an Area of Sustainable Annual Production in the Brazilian Semiarid Region Aiming at Generating Renewable Energy. *Bioenergy Research*, *16*(2), 817–825. https://doi.org/10.1007/s12155-022-10495-1

Silva, J. M. C., Barbosa, L. C. F., Leal, I. R., & Tabarelli, M. (2017). *Caatinga* (J. M. C. da Silva, I. R. Leal, & M. Tabarelli, Orgs.). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-68339-3

Test Methods for Density and Specific Gravity (Relative Density) of Wood and Wood-Based Materials. (2017). ASTM International. https://doi.org/10.1520/D2395-17

Travassos De Queiroz, W., Silva, M. L., Cristovam, F., Jardim, S., Vale, R., Diego, M., Valente, R., & Pinheiro, J. ([s.d.]). Índice de valor de importância de espécies arbóreas da floresta nacional do tapajós via análises de componentes principais e de fatores importance value index of tree species of tapajós national forest by analysis of principal components and factors. *Ciência Florestal*, *27*(1), 47–59.

Viana, A. B. T., Torres, C. M. M. E., Do Amaral, C. H., Filho, E. I. F., Soares, C. P. B., Santana, F. C., Timo, L. B., & Da Rocha, S. J. S. S. (2022). Timber volume estimation by using terrestrial laser scanning: method in hyperdiverse secondary forests. *Revista Arvore*, *46*. https://doi.org/10.1590/1806-908820220000021

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Biomassa Residual de Serrarias da Amazônia para Uso em Sistemas de Combustão Direta

Mariane Silva[1]; Maria Cecíllia Ramos Araujo Veloso[2]; Adriano Reis Prazeres Mascarenhas[3]; Niro Higuchi[4]; Thiago Cardoso Silva[3]; Fábio Henrique Della Justina do Carmo[3]; Erleide Paula Santos Veríssimo[3]; Thiago de Paula Protásio[1]

[1] Universidade Federal de Lavras - UFLA
[2] Universidade Federal de São Carlos - UFSCAR
[3] Universidade Federal de Rondônia, campus Rolim de Moura - UNIR
[4] Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia - INPA

Resumo: A Amazônia possui serrarias que geram grandes quantidades de resíduos madeiros, representando passivos ambientais. Ao mesmo passo, a região abriga 160 locais pertencentes aos sistemas energéticos isolados que dependem de combustíveis fósseis. Nesse contexto, objetivou-se caracterizar resíduos madeireiros de duas espécies amplamente exploradas na Amazônia, Faveira-Ferro (*Dinizia excelsa*) e Roxinho (*Peltogyne paniculata*), para avaliar seu potencial energético na produção de briquetes. Foi analisado densidade à granel, aparente e energética, umidade e poder calorífico (superior e líquido). As biomassas estudadas ao comparar-se com os dados para Eucalipto visto em literatura o superam em PCS (+10%), PCL (+15%) e DE (+40%), com umidade após secagem entre 4,43% (faveira-ferro) e 5,00% (roxinho). A densidade à granel/aparente foi de 310,43/601,39 kg/m³ (faveira-ferro) e 342,66/551,14 kg/m³ (roxinho). As biomassas estudadas possuem boas características físicas e energéticas para a briquetagem, constituindo alternativa viável para atender demandas energéticas de residências e pequenas indústrias em sistemas isolados, reduzindo a dependência de fósseis e valorizando a biodiversidade local.

Palavras-chave: Briquetes; Sistemas isolados; Aproveitamento de resíduos.

Sawmill Residual Biomass from Amazon for Use in Direct Combustion Systems

Abstract: The Amazon region hosts sawmills that generate large quantities of wood residues, representing environmental liabilities. At the same time, the region comprises 160 locations belonging to isolated energy systems that depend on fossil fuels. In this context, this study aimed to characterize wood residues from two widely exploited Amazonian species, Faveira-Ferro (*Dinizia excelsa*) and Roxinho (*Peltogyne paniculata*), to assess their energy potential for briquette production. Bulk density, apparent density, energy density, moisture content, and calorific value (gross and net) were analyzed. When compared to literature data for Eucalyptus, the studied biomasses outperformed the reference by +10% (HCV), +15% (NCV) and +40% (ED), with moisture content after drying ranging from 4.43% (Faveira-Ferro) to 5.00% (Roxinho). Bulk/apparent density values were 310.43/601.39 kg/m³ (Faveira-Ferro) and 342.66/551.14 kg/m³ (Roxinho). The studied biomasses exhibit favorable physical and energetic characteristics for briquetting, constituting a viable alternative to meet energy demands of households and small industries in isolated systems, reducing fossil fuel dependence while adding value to local biodiversity.

Keywords: Briquettes; Isolated systems; Waste utilization.

1. Introdução

Atualmente 160 localidades do Brasil não estão interligadas ao Sistema Interligado Nacional (SIN) e situam-se principalmente na região norte do país, compreendendo os estados do Acre, Amapá, Amazonas, Pará, Rondônia e Roraima (EPE, 2025). Por outro lado, a região norte tem a participação de cerca de 30% na capacidade hidroelétrica, enquanto o nordeste tem 10%, sul e sudeste 23% e centro-oeste 13% (EPE, 2023). De forma controversa, para essas comunidades terem acesso à eletricidade, são necessários altos custos, financeiros ou ambientais, já que a energia elétrica recebida pelos sistemas isolados utiliza majoritariamente combustíveis fósseis para gerar energia nas usinas.

Paralelamente, nestas regiões existem indústrias madeireiras que geram resíduos em função do baixo rendimento no processo de desdobro, que está abaixo de 50% do volume processado em toras. A Resolução CONAMA 474/2016 estabelece um coeficiente de rendimento volumétrico máximo de 35%, devido principalmente ao nível tecnológico das serrarias e à qualidade das toras. Assim os resíduos de madeira são subutilizados e transformados em pilhas de resíduos que podem gerar problemas ambientais quando abandonados.

No encontro dessas duas problemáticas, objetivou-se caracterizar resíduos madeireiros provenientes de serrarias da região amazônica, avaliando seu potencial energético para a produção de briquetes de qualidade, capazes de atender às demandas energéticas dos sistemas isolados da Amazônia.

2. Material e métodos

As espécies contempladas nessa pesquisa foram Faveira-Ferro (*Dinizia excelsa*) e Roxinho (*Peltogyne paniculata*), escolhidas devido à alta exploração de ambas, em que o roxinho teve aproximadamente 1657,92 m^3 explorados em 2025 e a faveira-ferro 3029,51 m^3.

O material foi coletado na forma de serragem residual no momento do desdobro primário e secundário da madeira durante o mês de março de 2026 na empresa MADEFLONA Indústria Madeireira LTDA, situada no município Itapuã do Oeste – Rondônia (Figura 1). Esse material tem origem em uma área de concessão florestal na Floresta Nacional do Jamari.



Figura 1 – Coleta do material residual (serragem), em Rondônia.

As caracterizações da biomassa incluíram densidade à granel (adaptação da ISO 17828:2015), densidade aparente (Kollman e Côté, 1968) e umidade, em condição industrial e após secagem em estufa (ASTM D4442-20). As análises energéticas foram feitas com base na densidade energética (DE) e poder calorífico superior (PCS) (ABNT NBR 8633) e líquido (PCL) (Brand, 2010). Dados do eucalipto obtidos em literatura foram usados como comparativo para os respectivos resultados desta pesquisa.

3. Resultados e discussão

Para a análise de densidade à granel notou-se que o maior resultado foi observado para a madeira de roxinho, sendo 10,38% superior a faveira-ferro, para qual foram registrados menores valores. No entanto, para a densidade aparente, observou-se uma inversão, em que a madeira de faveira-ferro superou o roxinho em 8,36% (Figura 2).

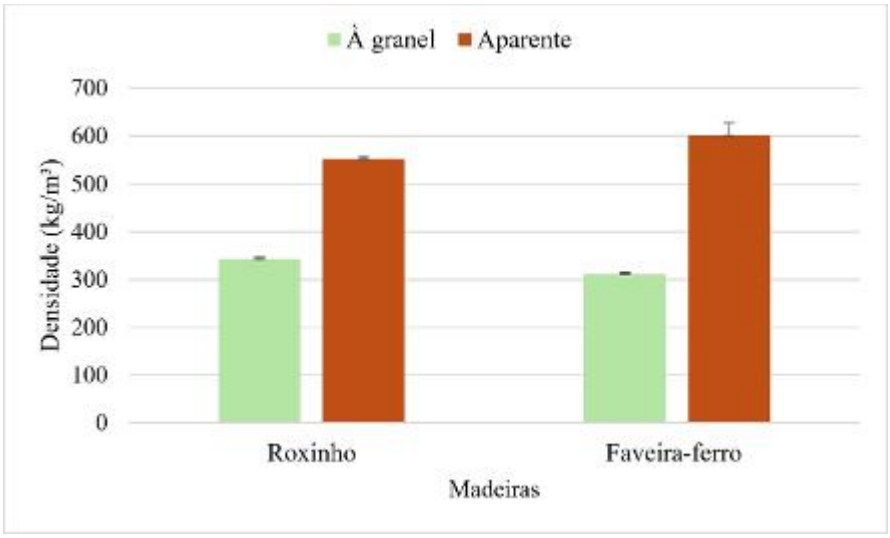


Figura 2 – Densidade à granel e aparente dos resíduos espécies florestais avaliadas.

Os valores aqui obtidos mostram-se satisfatórios, uma vez que Lunguleasa e Spirchez (2025) obtiveram valor de densidade a semelhante (450 kg/m³) para a biomassa analisada, em soma um poder calorífico superior de 18,20 MJ/kg, concluindo que essas características tornam o material particularmente promissor para a compactação em briquetes com bom desempenho energético. Em acréscimo, para Ibitoye et al. (2021) além de melhorar a eficiência energética dos produtos e sua durabilidade também reduz os custos de transporte, tornando-se desejável no processo de produção.

Em relação à umidade dos resíduos florestais, observou-se que a serragem de faveira-ferro se encontra em condição industrial com maior teor quando comparado ao roxinho, do mesmo modo, sua redução foi mais expressiva após ocorrida a secagem em estufa (Figura 3).

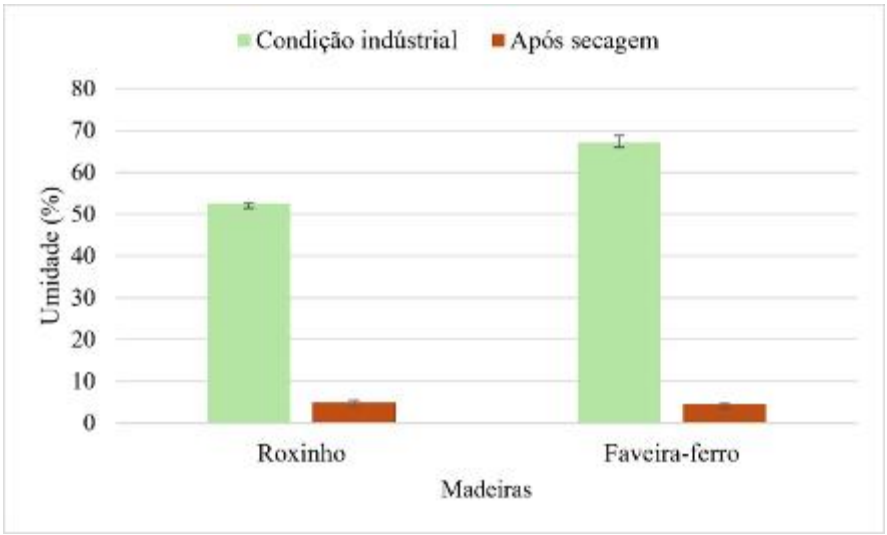


Figura 3 – Umidade a base seca em condição industrial e após secagem dos resíduos das espécies florestais avaliadas.

A umidade adequada para a briquetagem varia conforme o tipo de matéria-prima e o processo utilizado, em que teores muito elevados podem causar explosões pela formação de vapor, enquanto matérias-primas excessivamente secas prejudicam a ligação entre as partículas (Dias *et al*., 2012). Ademais, materiais lignocelulósicos com umidade em base superior a 15% ou inferior a 9% tendem a apresentar estouros, trincas e rachaduras no briquete recém produzido (Petricoski, 2017). Outrossim, Fenerick et al. (2019) indicam que o teor de água ideal para a produção de briquetes geralmente se encontra entre 5% e 10%.

Deste modo, após a secagem das biomassas em estufa, a madeira de roxinho apresenta umidade dentro da faixa considerada adequada para a briquetagem, com exatos 5% de umidade. Em contrapartida, a madeira de faveira-ferro, após secagem em estufa, apresenta umidade abaixo da faixa considerada ótima ao apresentar 4,43% de umidade, demandando atenção e ajustes prévios antes da etapa de compactação.

Em relação à avaliação energética dos resíduos, nota-se que o poder calorífico superior, bem como o líquido, apresentou melhores resultados para a madeira de faveira-ferro, com aproximadamente 3% de vantagem para ambas as variáveis (Figura 4).

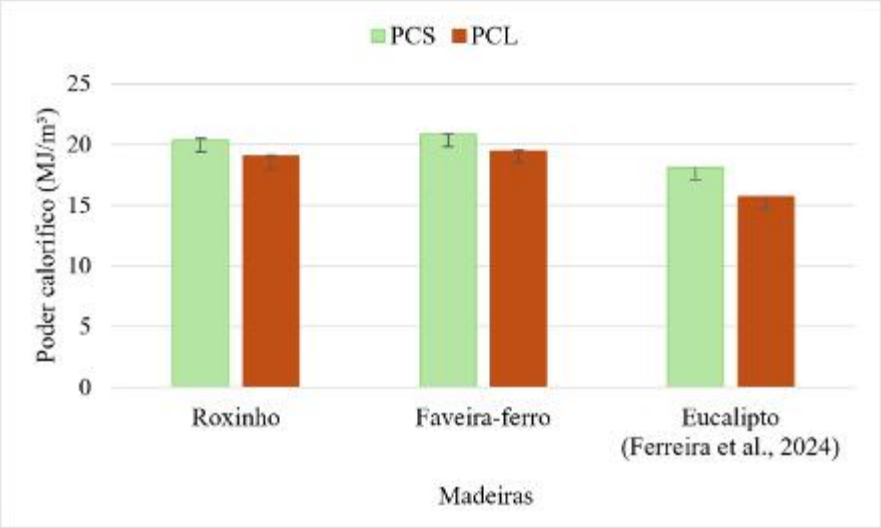


Figura 4 – Poder calorífico superior e líquido das espécies florestais avaliadas e espécie citada em literatura.

O valor inferior do PCL observado nas espécies, quando comparado ao PCS, é explicado pelas perdas de energia mais significativa ao considerar a energia gasta para evaporar a água formada durante a combustão e a energia gasta para secar o material.

Para melhor entendimento da capacidade energéticas das biomassas estudadas, compara-se os resultados obtidos com os resultados médios para o *Eucalyptus* spp., espécie amplamente utilizada na finalidade energética do Brasil (Ferreira *et* al., 2024).

A madeira de roxinho se destacou nos resultados de densidade energética, estando demasiadamente acima da faveira-ferro (Figura 5). Entretanto, ambas as espécies mostraram-se consideravelmente superior ao Eucalipto, o que pode ser explicado pela baixa densidade presente nas espécies referências (326 kg/m^3), pois a densidade energética é estimada em função do produto da densidade e poder calorífico líquido.

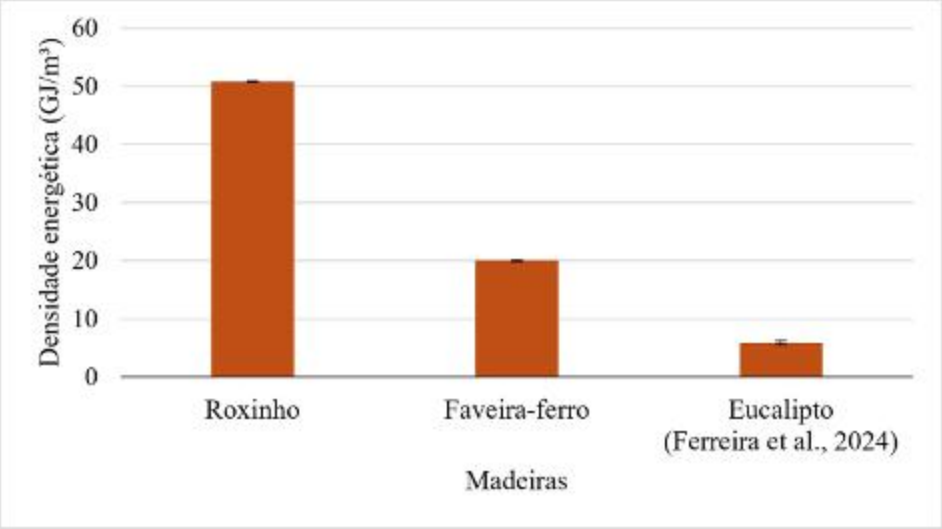


Figura 5 – Densidade energética das espécies florestais avaliadas e espécie citada em literatura.

Por se tratar da quantidade de energia contida por unidade de volume de um combustível, a densidade energética é um dos principais parâmetros para avaliação do potencial energético da biomassa, influenciando em sua qualidade e correlacionando-se à sua composição (Ferreira *et al*., 2024).

A análise comparativa dos resultados obtidos com os da madeira de referência revela competitividade promissora das espécies amazônicas avaliadas. No que tange ao PCS, o roxinho, bem como a faveira-ferro, superou o eucalipto em 10 e 12%, respectivamente. Igualmente para o PCL os resultados obtidos nessa pesquisam se destacam acima do Eucalipto,

com 17 e 19% para o roxinho e faveira-ferro, nesta ordem. E novamente para DE, o roxinho e a faveira-ferro saem na frente do eucalipto, com 88 e 70%, respectivamente.

Esses resultados indicam que ambas as biomassas amazônicas avaliadas possuem potencial energético equivalente ou superior ao de espécies tradicionalmente cultivadas, o que fortalece seu protagonismo em matrizes energéticas alternativas, além de reduzir impactos ambientais associados ao descarte inadequado da biomassa residual.

4. Conclusões

A madeira de Roxinho (*Peltogyne paniculata*) e Faveira-Ferro (*Dinizia excelsa*) demonstraram bons resultados de densidade, umidade, poder calorífico superior e líquido, além de densidade energética. Ambas as espécies apresentaram resultados superiores a espécies comumente utilizada para finalidade energética no país, segundo dados destas na literatura.

A superioridade da madeira de Faveira-ferro acima do Eucalipto em relação ao PCS, PCL e DE é de 12%, 19% e 70%. Na mesma ordem das variáveis para a madeira de roxinho, a vantagem se dá por 10%, 17% e 88%.

As espécies amazônicas investigadas possuem características físico-químicas e energéticas satisfatórias para fins energéticos, com resultados promissores para a produção de briquetes como alternativa tecnológica e ambientalmente viável para o aproveitamento dos volumosos resíduos gerados por serrarias na região. Ademais, essa prática pode atender à demanda energética de residências e pequenas indústrias em sistemas isolados da Amazônia, contribuindo com a redução da dependência de combustíveis fósseis e para a valorização da biodiversidade local como recurso estratégico e sustentável.

5. Agradecimentos

Os autores agradecem à Universidade Federal de Lavras (UFLA) e ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia da Madeira pela infraestrutura e suporte técnico concedidos. À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão de bolsas de estudo. Agradecemos ainda ao INCT Madeiras da Amazônia, projeto financiado pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) (Processo 406053/2022-7), ao INPA e à empresa MADEFLONA Ltda. pela disponibilidade das biomassas estudadas nesta pesquisa. Por fim, expressamos nossos agradecimentos à Forest Ark pelo apoio.

À Pró-Reitoria de Pesquisa da Universidade Federal de Rondônia (UNIR) pela concessão de recursos financeiros por meio dos Editais nº 001/2023/DPESQ/PROPESQ/UNIR e nº 003/2023/DPESQ/PROPESQ/UNIR. Agradecemos, ainda, à Fundação Rondônia de Amparo ao Desenvolvimento das Ações Científicas e Tecnológicas e à Pesquisa do Estado de Rondônia (FAPERO) pela concessão de recursos financeiros por meio da Chamada Pública nº 005/2023 – FAPERO/DITT, conforme os Termos de Outorga nº 163/2024 e nº 190/2024.

6. Referências bibliográficas

Antwi-Boasiako, C., & Acheampong, B. B. (2016). Strength properties and calorific values of sawdust-briquettes as wood-residue energy generation source from tropical hardwoods of different densities. Biomass and Bioenergy, 85, 144-152.

Dias J. M. C. S., Souza D. T., Braga M., Onoyama M. M., Miranda C. H. B., Barbosa P. F. D., & Rocha, J. D. (2012). Produção de briquetes e peletes a partir de resíduos agrícolas, agroindustriais e florestais. Embrapa Agroenergia.

Empresa de Pesquisa Energética. (2023). Balanço energético nacional 2023: Ano Base 2022. Rio de Janeiro: EPE.

Empresa de Pesquisa Energética. (2025). Planejamento do atendimento aos sistemas isolados horizonte: Ciclo 2025. Rio de Janeiro: EPE.

Fenerick, D. C., Silva, J. C., Sacomano, L. C. P., Soares, L. R., & Pandolfi, M. A. C. (2019). Cadeia produtiva de briquetes: competitividade no mercado, processo de produção e projeção em longo prazo. Revista Interface Tecnológica, 16(1), 437-448.

Ferreira, S. D. O. P. M., Ferreira, J. A. M., & Braz, R. L. (2024). Caracterização energética de biomassas agrícolas e florestais no estado de Pernambuco. Ciência Florestal, 34(3), e73324.

Ibitoye, S. E., Jen, T. C., Mahamood, R. M., & Akinlabi, E. T. (2021). Densification of agro-residues for sustainable energy generation: an overview. Bioresources and bioprocessing, 8(1), 75.

Lunguleasa, A., & Spirchez, C. (2025). Briquettes Obtained from Lignocellulosic Hemp (*Cannabis sativa* spp.) Waste, Comparative to Oak (*Quercus robur* L.) Ones. Applied Sciences, 15(20), 11284.

Petricoski, S. M. (2017). Briquetes produzidos com mistura de podas urbanas, glicerina e resíduos de processamento de mandioca. (Dissertação de mestrado). Universidade Estadual do Oeste do Paraná.

Vale, A. D., Brasil, M. A. M., Carvalho, C. D., & Veiga, R. D. A. (2000). Produção de energia do fuste de *Eucalyptus grandis* Hill Ex-Maiden e *Acacia mangium* Willd em diferentes níveis de adubação. Cerne, 6(1), 83-88.

Caracterização das propriedades físicas, químicas e energéticas da madeira de Jatobá (*Hymenaea parvifolia* Huber*)*

Beatriz Aparecida Nunes Simão[1]; Thiago Cardoso Silva[1]; Maria Jhulia Cordeiro Santos[1]; Erleide Paula Santos Verissimo[1]; Amanda dos Santos Ferreira[1]; Maira Reis de Assis[3]; Fábio Henrique Della Justina do Carmo[1]; Adriano Reis Prazeres Mascarenhas[1]

[1] Universidade Federal de Rondônia, *Campus* Rolim de Moura - RO
[2] Instituto Nacional de Pesquisa da Amazônia - INPA

Resumo: A caracterização física e energética da madeira de Jatobá (*Hymenaea parvifolia* Huber) é uma ferramenta essencial para avaliar sua viabilidade como biomassa energética. Diante disso, o objetivo foi caracterizar as propriedades físicas, químicas e energéticas de resíduos da madeira de Jatobá. Para isso, determinou-se a umidade em base seca e úmida, densidade básica e a granel, composição química imediata, composição elementar, poderes caloríficos superior, inferior e líquido e densidade energética, conforme metodologias normatizadas. A madeira apresentou densidade básica de 679,54 ± 0,04 kg m^{-3}, teor de cinzas de 1,46 ± 0,11%, carbono fixo de 22,78 ± 0,25%, teor de carbono de 48,97 ± 0,25%, poder calorífico superior de 19,85 ± 0,03 MJ kg^{-1} e densidade energética de 13.498,8 ± 24,15 MJ m^{-3}. Os resultados demonstram que a madeira de Jatobá apresenta características favoráveis ao aproveitamento bioenergético, evidenciando o potencial dos resíduos provenientes do processamento industrial para geração de energia e valorização sustentável da biomassa florestal.

Palavras-chave: Resíduos florestais; Biomassa energética; Espécie amazônica.

Characterization of the Physical, Chemical and Energy Properties of Jatobá (*Hymenaea parvifolia* Huber) Wood

Abstract: The physical and energy characterization of *Hymenaea parvifolia* Huber wood is an important tool for evaluating its potential as an energy biomass. Given this, the objective was to characterize the physical, chemical, and energy properties of Jatobá wood waste. To this end, the following were determined: moisture content on a dry and wet basis, basic density, bulk density, proximate analysis, ultimate analysis, higher heating value (HHV), lower heating value (LHV), net heating value (NHV), and energy density, following standardized methodologies. The wood exhibited a basic density of 679.54 ± 0,04 kg m^{-3}, an ash content of 1.46 ± 0,11%, fixed carbon content of 22.78%, carbon content of 48.97%, a higher heating value of 19.85 ± 0,03 MJ kg^{-1}, and an energy density of 13,498.8 ± 24,15 MJ m^{-3}. The results demonstrate that Jatobá wood presents favorable characteristics for bioenergy applications, highlighting the potential of residues generated from industrial processing for energy production and the sustainable valorization of forest biomass.

Keywords: Forest residues; Energetic Biomass; Amazonia Species.

1. Introdução

A biomassa florestal destaca-se como uma das principais fontes renováveis para produção de energia, contribuindo para a redução da dependência de combustíveis fósseis e para o aproveitamento sustentável de resíduos florestais. Nesse contexto, os resíduos gerados pela indústria madeireira apresentam elevado potencial energético e podem agregar valor à cadeia produtiva, favorecendo práticas alinhadas aos princípios da economia circular (Garcia et al., 2022; Bianchini et al., 2025).

A qualidade energética da biomassa está diretamente relacionada às suas propriedades físicas e químicas. Parâmetros como teor de umidade, densidade da madeira, composição química imediata e poder calorífico influenciam os processos de combustão, armazenamento e transporte, sendo fundamentais para avaliar a viabilidade de utilização da biomassa como fonte de energia (Protásio et al., 2021; Bianchini et al., 2025).

Entre as espécies nativas da Amazônia, o jatobá/jutaí-do-campo/jutaí-mirim (*Hymenaea parvifolia* Huber.) apresenta alta qualidade tecnológica e ampla utilização pelo setor madeireiro, resultando na geração de resíduos passíveis de aproveitamento energético. Apesar desse potencial, ainda são escassas as informações sobre as propriedades físicas e energéticas desses resíduos, especialmente aqueles provenientes do processamento industrial, o que evidencia a necessidade de estudos que subsidiem seu aproveitamento sustentável (Arruda et al., 2023).

Os resíduos do processamento industrial da madeira de espécies tropicais costumam apresentar elevada densidade energética, alto poder calorífico e composição química favorável, conferindo elevado potencial para aplicações bioenergéticas. Nesse contexto, o objetivo deste trabalho foi caracterizar as propriedades físicas, químicas e energéticas de resíduos da madeira de *Hymenaea parvifolia* Huber., a fim de avaliar seu potencial para aplicações bioenergéticas.

2. Material e métodos

2.1 Coleta e preparo do material

Os resíduos de madeira de *Hymenaea parvifoli* Huber. foram coletados na empresa Madeflona Industrial Madeireira LTDA, localizada no município de Itapuã do Oeste, no Estado de Rondônia. O material foi obtido diretamente do processamento industrial das toras, sendo

coletados aleatoriamente resíduos na forma de refilos e destopos, buscando garantir maior representatividade do material.

Após a coleta, as amostras foram acondicionadas em recipientes devidamente identificados e encaminhadas ao laboratório para realização das análises físicas, químicas e energéticas. Posteriormente, os resíduos foram seccionados em corpos de prova com dimensões aproximadas de 3 cm x 3 cm x 3 cm (espessura × largura × comprimento). O material foi homogeneizado e separado conforme a metodologia de cada ensaio.

2.2 Determinação da umidade

A determinação da umidade foi realizada em base úmida (Ubu) e base seca (Ubs), de acordo com os procedimentos descritos pela norma ASTM E871-82. Foram utilizadas seis repetições para cada análise.

Aproximadamente 2 g das amostras foram inicialmente pesadas para obtenção da massa úmida e posteriormente submetidas à secagem em estufa de circulação forçada de ar a 103 ± 5 °C até massa constante. Após a secagem, realizou-se nova pesagem para determinação da massa seca e cálculo dos teores de umidade.

2.3 Determinação da densidade básica e densidade a granel

A densidade básica (Db) foi determinada conforme os procedimentos descritos na ASTM D2395-17. As amostras foram previamente saturadas em água para determinação do volume saturado e, posteriormente, secas em estufa a 103 ± 5 °C até massa constante. A densidade básica foi obtida pela relação entre a massa seca e o volume saturado.

A densidade a granel (Dg) foi determinada utilizando material particulado acondicionado em recipiente de volume conhecido, sendo calculada pela razão entre a massa do material e o volume ocupado pela biomassa.

2.4 Análise química imediata

Para determinação da composição química imediata, as amostras foram inicialmente secas em estufa de circulação forçada de ar a 103 ± 5 °C até massa constante. Posteriormente, o material foi moído e classificado em peneira de 60 mesh.

A análise imediata foi realizada para estimar os teores de materiais voláteis (MV), cinzas (CZ) e, por diferença, carbono fixo (CF), de acordo com o procedimento estabelecido na norma ASTM D1762-84 (ASTM, 2007).

O teor de cinzas (CZ) foi determinado segundo a norma TAPPI T211 om-93 (TAPPI, 1985). Aproximadamente 1 g de amostra seca foi acondicionado em cadinhos de porcelana e submetido à mufla a 525 °C por 3 horas.

2.5 Estimativas do poder calorífico

O poder calorífico superior (PCS) foi estimado por meio da equação proposta por Parikh et al. (2005), utilizando os resultados da análise química imediata (Equação 1). Os valores de poder calorífico inferior (PCI) (Equação 2) e poder calorífico líquido (PCL) (Equação 3) foram calculados conforme as equações propostas por Brand (2010), considerando as perdas energéticas associadas à vaporização da água durante a combustão da biomassa.

$$PCS = 0{,}3536 * CF + 0{,}1559 * MV - 0{,}0078 * CZ \quad \text{(Equação 1)}$$

$$PCI = PCS - 600 * 9\,H/100 \quad \text{(Equação 2)}$$

$$PCL = PCI\, x \left[\frac{100 - W}{100}\right] - (6 * W) \quad \text{(Equação 3)}$$

Em que: PCS = poder calorífico superior (em MJ kg^{-1}); CF = teor de carbono fixo (em %); MV = teor de materiais voláteis (em %); CZ = teor de cinzas (em %); PCI = poder calorífico superior (em MJ kg^{-1}); H = teor de hidrogênio (%); PCL = poder calorífico líquido (em MJ kg^{-1}); W = umidade da amostra, correspondente à Ubu (%).

2.6 Análises estatísticas

Os resultados obtidos foram submetidos à estatística descritiva, sendo calculados os valores médios e os respectivos desvios-padrão para todas as variáveis avaliadas.

3. Resultados e discussão

A biomassa avaliada neste estudo apresentou umidade próxima à faixa relacionada ao ponto de saturação das fibras de madeiras de ~30% (Figura 1). O teor de umidade é um dos principais parâmetros relacionados à qualidade energética da biomassa, pois elevados conteúdos de água reduzem o rendimento da combustão em razão do consumo de energia para evaporação da umidade presente no combustível (Bianchini et al., 2025). Nesse sentido, a secagem da biomassa seria uma etapa importante para aumentar a eficiência energética desses resíduos e reduzir perdas durante os processos termoquímicos.

Figura 1 - Propriedades físicas da madeira de *H. parvifolia*: umidade em base seca (Ubs) e umidade em base úmida (Ubu).

A densidade básica enquadra a espécie como madeira de média densidade (Figura 2), estando próxima dos valores observados para diversas espécies amazônicas de uso comercial. Em estudo com resíduos de espécies florestais da Amazônia, Lima et al. (2021) verificaram densidades variando entre aproximadamente 550 e 800 kg m^{-3}. Espécies amazônicas com maior densidade apresentam maior potencial para produção de bioenergia, porque em um mesmo volume de material contém mais quantidade de biomassa para gerar energia.

Figura 2 - Propriedades físicas da madeira de *H. parvifolia*: densidade básica (Db) e densidade a granel (Dg).

Apesar de apresentar valor inferior à densidade básica, a densidade a granel é um parâmetro importante para o aproveitamento bioenergético de resíduos, pois influencia diretamente o armazenamento, transporte e alimentação de sistemas de combustão. Biomassas com maior densidade a granel apresentam maior concentração de massa por unidade de volume, reduzindo custos logísticos e aumentando a eficiência operacional (Bianchini et al., 2025; Garcia et al., 2022).

Observou-se predominância de materiais voláteis, seguida pelo carbono fixo, enquanto o teor de cinzas foi reduzido (Figura 3). Essa composição indica facilidade de ignição e rápida liberação inicial de energia, além da manutenção da combustão após a volatilização dos compostos orgânicos. O baixo teor de cinzas também é favorável ao uso energético, por reduzir a formação de resíduos minerais e possíveis problemas operacionais durante a combustão (Protásio et al., 2013).

Figura 3 - Composição química imediata da madeira de *H. parvifolia*: materiais voláteis (MV), teor de cinzas (TC) e carbono fixo (CF).

O teor de cinzas observado foi inferior a 2%, valor considerado adequado para biomassa energética. Baixos teores de cinzas reduzem problemas operacionais relacionados à incrustação, corrosão e formação de escórias em equipamentos de combustão, aumentando a eficiência dos sistemas de conversão energética (Lunguleasa et al., 2020). De acordo com Okoro et al. (2022), espécies tropicais destinadas à produção de energia apresentam melhor desempenho quando associam baixos teores de cinzas e elevados conteúdos de carbono fixo, características também verificadas para a madeira de jatobá neste estudo. O teor de carbono fixo observado nesta

biomassa pode ser considerado acima do esperado para madeiras, que seria aproximadamente 18% (Brand, 2010).

Quanto análise elementar, houve predominância de carbono e oxigênio, seguidos pelo hidrogênio (Figura 4). Essa composição contribui para o desempenho energético do material, pois o carbono e o hidrogênio participam diretamente da liberação de energia durante a combustão (Okoro et al., 2022). Em contrapartida, a elevada proporção de oxigênio reduz a energia disponível por unidade de massa, embora seja uma característica comum às biomassas lignocelulósicas (Bianchini et al., 2025).

Figura 4 - Composição elementar da madeira de *H. parvifolia*: carbono (C), hidrogênio (H) e oxigênio (O).

Segundo Raji et al. (2025), madeiras tropicais utilizadas para bioenergia apresentam composição elementar semelhante à observada neste estudo, predominando carbono entre aproximadamente 48 e 52% e hidrogênio próximo de 6%, indicando elevada aptidão para conversão termoquímica. Além disso, Lima et al. (2020) observaram comportamento semelhante em espécies amazônicas 20 comerciais, reforçando que a composição química do jatobá é compatível com biomassas de elevado potencial energético.

Os valores de poder calorífico obtidos para a madeira de *H. parvifolia* evidenciam potencial energético (Tabela 1). A espécie apresentou valores compatíveis com os registrados para espécies amazônicas. Apesar disso, os resultados são superiores aos observados por Santos et al. (2023), que encontraram PCS de 18,85 MJ kg^{-1}, PCI de 17,49 MJ kg^{-1} e PCL de 9,45 MJ kg^{-1} para resíduos de madeira utilizados em secadores de grãos no estado de Rondônia. Os autores atribuíram a redução do PCL ao elevado teor de umidade do material, que aumenta a energia consumida na evaporação da água durante a combustão.

Tabela 1 – Propriedades energéticas da madeira de *Hymenaea parvifolia*: poder calorífico superior (PCS), poder calorífico inferior (PCI), poder calorífico líquido (PCL) e densidade energética (DE)

Parâmetros	Média	Desvio padrão
PCS (MJ kg^{-1})	19,85	0,03
PCI (MJ kg^{-1})	18,49	0,03
PCL (MJ kg^{-1})	13,33	0,02
DE (MJ m^{-3})	13.498,8	24,1

Esse desempenho pode estar relacionado aos teores de lignina e extrativos, componentes positivamente associados ao poder calorífico da madeira (Demirbaş, 2001; Telmo e Lousada, 2011). Entretanto, a redução do PCI para o PCL evidencia perdas energéticas decorrentes da umidade, reforçando a importância da secagem da biomassa antes da combustão. Os baixos desvios-padrão indicam boa uniformidade entre as amostras analisadas.

A densidade energética obtida evidencia elevada concentração de energia por unidade de volume, resultado diretamente associado à densidade da madeira. Biomassas com maior densidade energética apresentam vantagens relacionadas ao armazenamento, transporte e rendimento durante processos de combustão, gaseificação e produção de biocombustíveis sólidos (Okoro et al., 2022; Sette Júnior et al., 2020). Esses resultados corroboram os encontrados por Lima et al. (2021) para espécies amazônicas de maior densidade, demonstrando que o jatobá reúne características físicas, químicas e energéticas compatíveis com madeiras de elevado potencial bioenergético.

50. Conclusão

Os resíduos de madeira de *Hymenaea parvifolia* apresentam elevado potencial bioenergético, em função dos baixos teores de umidade e cinzas, associados aos elevados valores de poder calorífico e densidade energética. Assim, os resíduos gerados pelo processamento da espécie mostram-se promissores para geração de energia, contribuindo para o aproveitamento sustentável da biomassa florestal.

5. Agradecimentos

À Universidade Federal de Rondônia (UNIR), *Campus* Rolim de Moura, pela infraestrutura e apoio ao desenvolvimento deste trabalho. Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pelo fomento à pesquisa. Aos professores e colaboradores que contribuíram para a execução deste estudo e a todos que, direta ou indiretamente, colaboraram para sua realização.

6. Referências bibliográficas

Arruda, N. L. F. V., Oliveira, P. B., Maldonado, L. C., Spadim, E. R., Eufrade Junior, H. J., & Guerra, S. P. S. (2023). Análises físicas, químicas e energéticas de cavacos da biomassa residual de *Tectona grandis* e *Calophyllum brasiliense* Cambess. Série Técnica IPEF, 26(48), 8–12. https://doi.org/10.18671/sertec.v26n48.001

American Society for Testing and Materials. (2007). ASTM D1762-84: Standard Test Method for Chemical Analysis of Wood Charcoal. ASTM International, Conshohocken, PA.

American Society for Testing and Materials. (2007). Standard test methods for specific gravity of wood and wood-based materials. ASTM International.

Bianchini, L., Colantoni, A., Venanzi, R., Cozzolino, L., & Picchio, R. (2025). Physicochemical properties of forest wood biomass for bioenergy applications: A review. Forests, 16(4), 702. https://doi.org/10.3390/f16040702

Brand, M. A. (2010). Energia de biomassa florestal. Rio de Janeiro: Interciência, 131 p.

Demirbaş, A. (2001). Relationships between lignin contents and heating values of biomass. Energy Conversion and Management, 42, 183–188. https://doi.org/10.1016/S0196-8904(00)00050-9

Garcia, D. P., Caraschi, J. C., Protásio, T. P., Viana, R. S., & Scatolino, M. V. (2022). Produção brasileira de pellets de biomassa agroflorestal. Energia na Agricultura, 37(1), 30–38. https://doi.org/10.17224/EnergAgric.2022v37n1p30-38

Lima, M. D. R., Patrício, E. P. S., Barros Junior, U. O., et al. (2021). Colorimetry as a criterion for segregation of logging wastes from sustainable forest management in the Brazilian Amazon for bioenergy. Renewable Energy, 163, 792–806. https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.08.078

Lunguleasa, A., Spirchez, C., & Câmpean, M. (2020). Evaluation of the calorific values of wastes from some tropical wood species. Maderas. Ciencia y Tecnología, 22(3), 269–282. https://doi.org/10.4067/S0718-221X2020000300269

Okoro, N. M., Ikegwu, U. M., Harding, K. G., & Daramola, M. O. (2022). Fuel quality assessment of invasive exotic plants and tropical hardwoods as potential feedstocks for pyrogasification. Waste and Biomass Valorization, 13(3), 1293–1310. https://doi.org/10.1007/s12649-021-01572-1

Parikh, J., Channiwala, S. A., & Ghosal, G. K. (2005). A correlation for calculating HHV from proximate analysis of solid fuels. Fuel, 84(5), 487-494. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2004.10.010

Protásio, T. P., Bufalino, L., Tonoli, G. H. D., Guimarães Júnior, M., & Trugilho, P. F. (2013). Compactação e propriedades de biocombustíveis sólidos. Pesquisa Florestal Brasileira, 33(73), 63–72. https://doi.org/10.4336/2013.pfb.33.73.448

Raji, A. M., Manescau, B., Chetehouna, K., Courty, L., Ango, S. E., & Bernard, S. (2025). Thermal properties of selected African tropical woods and their potential in bioenergy utilization. Biomass Conversion and Biorefinery, 15, 17103–17119. https://doi.org/10.1007/s13399-025-06723-1

Santos, M. J. C., Oliveira, S., Barros, A. H. R. O., Araujo, E. C. G., & Mascarenhas, A. R. P. (2023). Caracterização energética de biomassa lignocelulósica utilizada em secador de grãos em Rolim de Moura, Rondônia. Revista Conexão na Amazônia, 4(2), 41–55.

Sette Júnior, C. R., Cunha, T. Q. G., Coneglian, A., Hansted, A. L. S., Silva, D. A., Lima, P. A. F., Silva, M. F., & Yamaji, F. M. (2020). Does bark presence in wood from fast-growing forest species significantly alter the energy potential? BioEnergy Research, 13(1), 222–228. https://doi.org/10.1007/s12155-020-10115-w

Tappi Standard (1985). T 211. Om-93. Ash in wood.

Telmo, C., & Lousada, J. (2011). The explained variation by lignin and extractive contents on higher heating value of wood. Biomass and Bioenergy, 35, 1663–1667. https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2010.12.038

Caracterização de resíduos do processamento do café para conversão termoquímica

Rayla da Silva de Resende[1]; Paulo Renato Souza de Oliveira[1]; Juliana Terezinha Santos da Cruz[1]; Merlindo Jacinto Manjate[1]; Ananias Francisco Dias Júnior[1]

Universidade Federal do Espírito Santo (Ufes), Departamento de Ciências Florestais e da Madeira. CEP 29550-000, Jerônimo Monteiro, ES, Brasil.

Resumo: A crescente geração de resíduos do café demanda alternativas sustentáveis de gestão e valorização. Nesse contexto, este trabalho teve como objetivo caracterizar físico-quimicamente a biomassa proveniente da palha de café de dois municípios do Espírito Santo para fins de aplicação em processos termoquímicos. A primeira amostra foi obtida em Pedra Azul (Domingos Martins) e se destacou com menor umidade (5,82%), maior teor de voláteis (80,71%), menor teor de cinzas (1,70%), e maior poder calorífico superior (20,01 $MJ.kg^{-1}$), indicando aptidão para processos termoquímicos. Em contraste, a amostra do município de Venda Nova do Imigrante, apresentou maior teor de cinzas (3,87%), impactando negativamente seu desempenho térmico. Os resultados demonstram a importância da caracterização para a seleção de matérias-primas, confirmando o promissor potencial energético da palha de café para valorização de resíduos agroindustriais e desenvolvimento de alternativas energéticas sustentáveis.

Palavras-chave: Biomassa; Caracterização físico-química; Potencial energético.

Characterization of coffee processing waste for thermochemical conversion

Abstract: The growing generation of coffee waste demands sustainable management and valorization alternatives. In this context, this work aimed to physically and chemically characterize the biomass from coffee husk from two municipalities in Espírito Santo for application in thermochemical processes. The first sample was obtained in Pedra Azul (Domingos Martins) and stood out with lower moisture (5.82%), higher volatile matter content (80.71%), and lower ash content (1,87%), and superior higher heating value (20.01 $MJ\ kg^{-1}$), indicating suitability for thermochemical processes. In contrast, the sample from the municipality of Venda Nova showed a higher ash content (3.87%), negatively impacting its thermal performance. The results demonstrate the importance of characterization for raw

material selection, confirming the promising energy potential of coffee straw for the valorization of agro-industrial waste and the development of sustainable energy alternatives.
Keywords: Biomass; Physicochemical characterization; Energy potential.

1. Introdução

A crescente preocupação global com a sustentabilidade e a transição energética tem impulsionado a busca por fontes de energia renováveis e a valorização de resíduos. Nesse cenário, a biomassa lignocelulósica, particularmente os resíduos agroindustriais, emerge como uma matéria-prima promissora para a produção de bioenergia e bioprodutos de alto valor agregado (Foong et al., 2024; Bisht et al., 2026).

A utilização desses resíduos não apenas contribui para a redução da dependência de combustíveis fósseis, mas também oferece uma solução para o descarte ambientalmente adequado de subprodutos de atividades agrícolas, mitigando impactos negativos e promovendo a economia circular.

A cafeicultura, uma das principais atividades agrícolas em diversas regiões do mundo, incluindo o estado do Espírito Santo. Ela gera anualmente um volume substancial de resíduos, como a palha de café. Estima-se que para cada quilograma de café beneficiado, aproximadamente um quilograma de resíduo é produzido (Oliveira & Franca, 2015).

O manejo inadequado desses resíduos pode levar à poluição do solo e da água, além de emissões de gases de efeito estufa. Diante disso, o aproveitamento da palha de café para fins energéticos representa uma estratégia eficaz para agregar valor a essa cadeia produtiva, transformando um passivo ambiental em um recurso energético valioso.

Para que a palha de café seja eficientemente convertida em energia ou outros produtos por meio de processos termoquímicos (como pirólise, gaseificação ou combustão),imprescindível a realização de uma caracterização físico-química detalhada. As propriedades vinculadas à biomassa, como teor de umidade, densidade a granel, análise imediata (materiais voláteis, cinzas e carbono fixo) e poder calorífico, são determinantes para a seleção da tecnologia de conversão mais adequada e para a otimização das condições operacionais (Esteves et al., 2023; Bisht et al., 2026). Sendo possível maximizar o rendimento dos produtos desejados e garantir a viabilidade técnica e econômica do processo, em geral (Esteves et al., 2023; Wang et al., 2022).

Nesse contexto, este trabalho teve como objetivo caracterizar físico-quimicamente a palha de café proveniente de diferentes municípios do estado do Espírito Santo, visando avaliar

seu potencial para aplicação em processos de conversão termoquímica. Por meio disto, espera-se fornecer subsídios para o desenvolvimento de alternativas sustentáveis de geração de energia a partir de resíduos agroindustriais.

2. Material e métodos

Neste estudo, foram analisadas amostras de palha de café provenientes de dois locais: Pedra Azul (Domingos Martins – ES) (CPA) e Venda Nova do Imigrante – ES, (CVN). A escolha da palha de café proveniente do estado do Espírito Santo como matéria-prima para o desenvolvimento deste estudo está relacionada à expressiva importância da cafeicultura no estado e à consequente geração de resíduos provenientes do processamento do café. Além da localidade considerou também as diferenças de métodos de processamento do café, uma vez que essas condições podem influenciar diretamente as características físico-químicas da palha e, consequentemente, seu potencial de aplicação em processos de conversão termoquímica. Primeiramente, os materiais foram reduzidos em moinho de facas para homogeneização e classificação granulométrica. Posteriormente, o material foi submetido a peneiramento em série para classificação, utilizando peneiras padronizadas conforme a norma ASTM E11-24 (ASTM, 2024). As frações granulométricas obtidas são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 – Frações Granulométricas

Fração (% retido)	Café Pedra Azul (CPA)	Café Venda Nova (CVN)
22 mm	0,89	1,28
19 mm	56,16	42,92
850 mm	31,57	48,96

Adicionalmente, as palhas de café foram caracterizadas quanto à umidade, densidade a granel, análise imediata e poder calorífico. O teor de umidade foi determinado por secagem em estufa a 105 °C até massa constante, seguindo a norma ASTM D3173 (ASTM, 2025). A densidade a granel foi calculada preenchendo um recipiente de 1.100 cm^3 e aferindo a massa correspondente em balança de precisão (0,001g). A análise imediata determinou os teores de materiais voláteis, cinzas e carbono fixo (por diferença), conforme a norma ASTM E870-24 (ASTM 2024). O

poder calorífico superior (PCS) foi de terminado de acordo com a norma ASTM D5865M-19 (ASTM 2019). O poder calorífico inferior (PCI) e o poder calorífico líquido (PCL) foram obtidos a partir dos valores experimentais médios, de acordo com Channiwala e Parikh (2002).enquanto o poder calorífico inferior (PCI) e útil (PCU) foram estimados a partir.

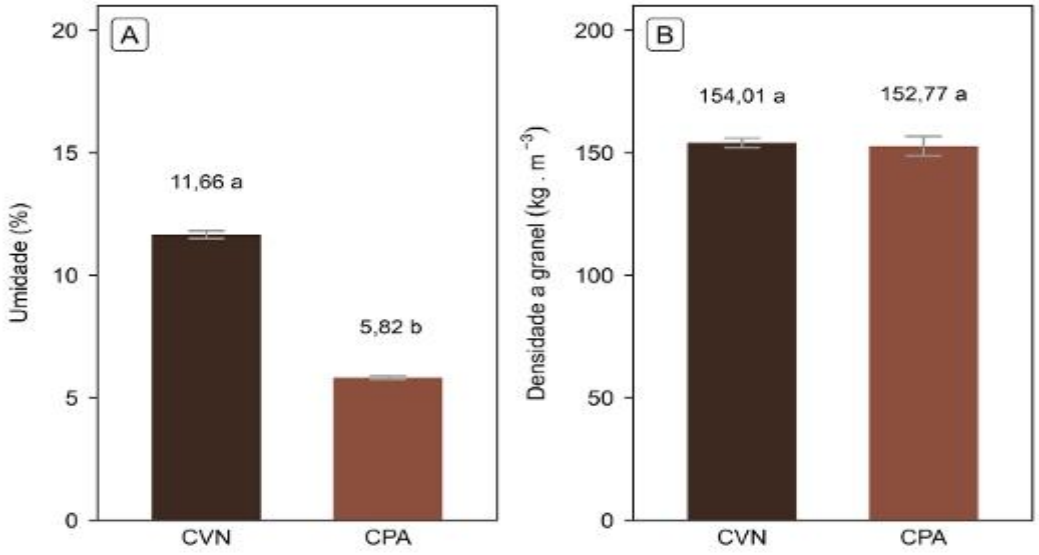
Os dados obtidos na caracterização físico-química das amostras de palha de café foram submetidos a uma análise comparativa para identificar diferenças significativas entre as biomassas café Pedra Azul (CPA) e café Venda Nova (CVN). Foram Utilizados dois tratamentos, com seis repetições para cada tratamento, totalizando 12 unidades experimentais .A interpretação dos resultados visou correlacionar as propriedades físico-químicas com o potencial de aplicação em processos de conversão termoquímica, avaliando a aptidão de cada material para tais rotas energéticas. Não foram utilizados métodos estatísticos complexos, focando na apresentação direta dos valores e suas implicações para o comportamento da biomassa.

3. Resultados e discussão

A caracterização físico-química das biomassas Café Pedra Azul (CPA) e café Venda Nova (CVN) evidenciou diferenças relevantes para o desempenho termoquímico. A Figura 1 apresenta os resultados de umidade e densidade a granel. A biomassa CPA apresentou menor teor de umidade, condição que reduz a energia necessária para evaporação da água e aumenta a eficiência térmica. A biomassa café Venda Nova (CVN) apresentou maior valor de umidade 11,66% , possivelmente associada à higroscopicidade e às condições pós-processamento do resíduo. Estudos mostram que teores elevados de umidade reduzem o rendimento de bio-óleo e aumentam a fração aquosa condensada (Agrawal et al., 2026).

A densidade a granel apresentou valores de 154,01cm^{-3} para a biomassa café Venda nova (CVN) e 152,77cm^{-3} para o café Pedra Azul (CPA), indicando comportamento semelhante entre CPA e café Venda Nova CVN, sugerindo comportamento típico de biomassas fibrosas e porosas. É interessante notar que a classificação granulométrica distinta entre as biomassas não interferiu nesta característica. A umidade e tamanho de partícula similares entre os materiais estudados auxiliam nos resultados próximos, conforme destacado em literatura (Christianson et al., 2023)

Figura 1 – Comparação da Umidade (A) e da Densidade a Granel (B) entre as Biomassas.



A Figura 2 apresenta os teores de cinzas,voláteis e carbono fixo. A amostra Café Pedra Azul (CPA) exibiu maior teor de voláteis, indicando maior reatividade térmica e tendência à formação de compostos condensáveis, o que beneficia a produção de bio-óleo. Estudos recentes sugerem que elevadas frações voláteis favorecem o craqueamento primário e a geração de vapores ricos em compostos orgânicos (Lv et al., 2024). Já a biomassa Café Venda Nova (CVN) apresentou teores de cinzas superiores. A presença de minerais pode catalisar reações secundárias indesejadas, diminuindo o rendimento de bio-óleo e elevando a produção de gases e biochar (Wang et al., 2022; Hakeem et al., 2024).

Figura 2 – Comparação da Análise Imediata entre as Biomassas.

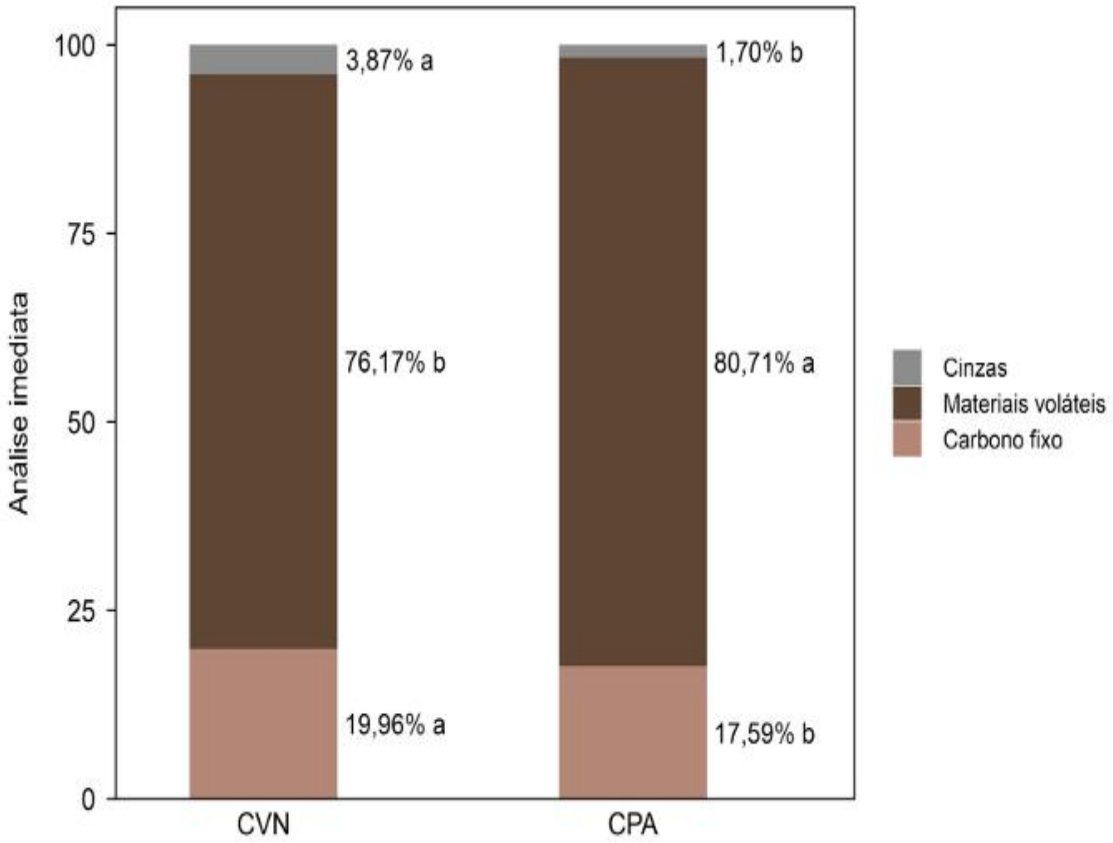
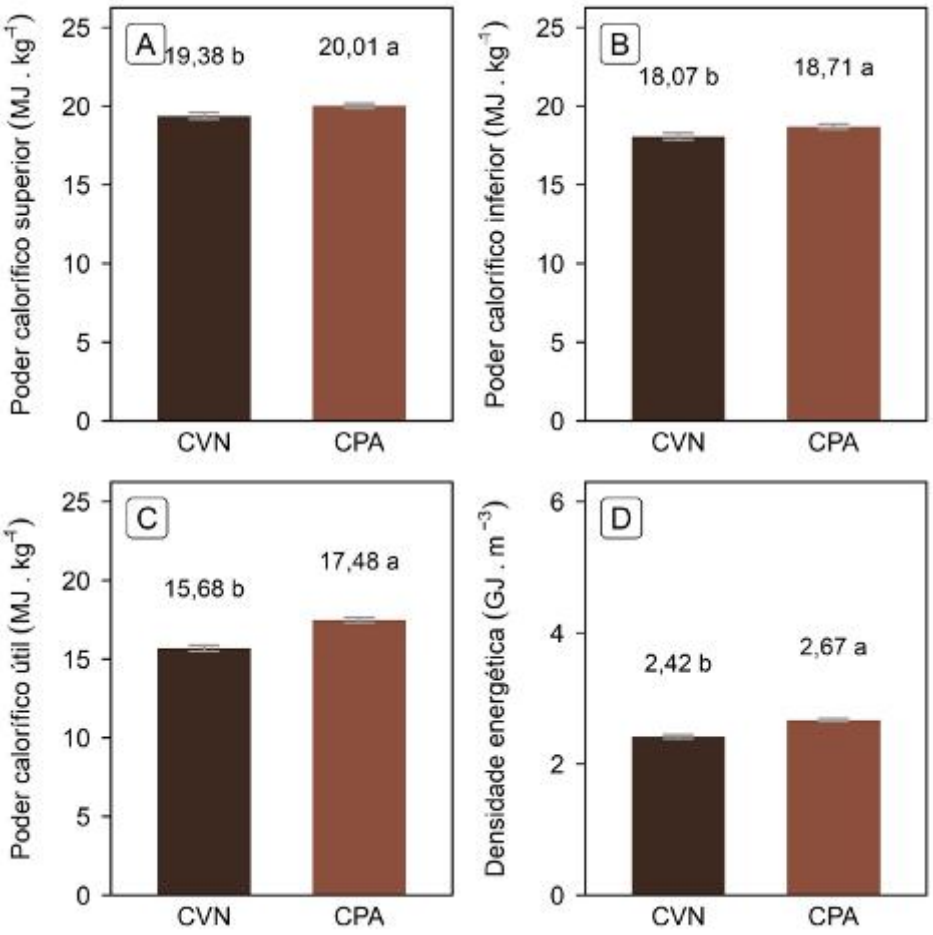


Figura 3 mostra os valores de poder calorífico superior (PCS), poder calorífico inferior (PCI) e poder calorífico útil (PCU). A biomassa café Pedra Azul (CPA) apresentou maior poder calorífico, consistente com seu menor teor de cinzas e maior proporção de voláteis. O poder calorífico está diretamente relacionado à composição química da biomassa, sobretudo aos teores de carbono e hidrogênio, que elevam o conteúdo energético, enquanto a presença de componentes minerais reduz a energia disponível dos materiais combustíveis (Esteves; Sen; Pereira, 2023). A biomassa café Pedra Azul (CPA) também apresentou maior densidade energética, indicando maior capacidade de liberação de energia por unidade de volume.

No conjunto, os resultados indicam que a biomassa café Pedra Azul (CPA) apresenta comportamento mais adequado para produção de bio-óleo, enquanto café Venda Nova (CVN) tende à maior geração de biochar devido ao teor de cinzas e carbono fixo. Em processos assistidos por micro-ondas, por exemplo, tais diferenças influenciam diretamente a absorção de energia eletromagnética e o desempenho do processo (Bisht et al., 2026).

Por fim, a densidade energética manteve-se estatisticamente distinta e variou de 2,42 a 2,67 GJ.m-3, corroborando para a aptidão do café Pedra Azul (CPA) para conversões termoquímicas.

Figura 3 – Caracterização Energética entre as Biomassas: Poder Calorífico Superior, Inferior, Útil e Densidade Energética.



4. Conclusões

A caracterização físico-química e energética das amostras de palha de café provenientes de distintas localidades evidenciou diferenças significativas entre as biomassas avaliadas. A biomassa de Domingos Martins (CPA) apresentou maior potencial para aplicação em processos de conversão termoquímica, em função do menor teor de umidade, maior conteúdo de materiais voláteis e maior poder calorífico. Em contrapartida, a biomassa de Venda Nova do Imigrante (CVN) apresentou maior teor de cinzas, característica que pode limitar seu desempenho nesses processos. As propriedades energéticas são distintas estatisticamente. Por fim, a densidade energética é um parâmetro físico-térmico de grande relevância, que corroboram com o desempenho superior da biomassa CPA para fins bioenergéticos.

5. Agradecimentos

Os autores agradecem à Universidade Federal do Espírito Santo (UFES) pelo suporte institucional e pela infraestrutura disponibilizada para a realização deste trabalho. Agradecem, também, ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio financeiro por meio da concessão de bolsa de iniciação científica, bem como ao Laboratório de Energia da Biomassa (LEB) pelo apoio técnico e científico durante o desenvolvimento da pesquisa.

6. Referências bibliográficas

Agrawal, M., Yadav, S., & Mohanty, P. (2026). Phase separation with corresponding compositional changes in bio-oil from co-pyrolysis of extractive-rich waste biomass. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 107491 *194*. https://doi.org/10.1016/j.jaap.2025.107491

American Society for Testing and Materials - ASTM. (2019). *ASTM D5865/D5865M−19: Standard Test Method for Gross Calorific Value of Coal and Coke*. https://doi.org/10.1520/D5865_D5865M-19

American Society for Testing and Materials - ASTM. (2024). *ASTM E11-24: Specification for Woven Wire Test Sieve Cloth and Test Sieves.* Disponível em: https://doi.org/10.1520/E0011-24

American Society for Testing and Materials - ASTM. (2024). *ASTM E870-24: Standard Test Methods for Analysis of Wood Fuels*. https://doi.org/10.1520/E0870-82R19

American Society for Testing and Materials - ASTM. (2025). *ASTM D3173: Test Meth od for Moisture in the Analysis Sample of Coal and Coke*. https://doi.org/10.1520/D3173_D3173M-25

American Society for Testing and Materials – ASTM, 2019. ASTM D5865M-19: Standard Test Method for Gross Calorific Value of Coal and Coke. https://doi.org/10.1520/D5865_D5865M-19

Bisht, P., Budman, H., Anand, V., Singh, A., Tiwari, H., Shobana, S., Kumar, G.,Kumar, S., Pant, K. K., & Prajapati, S. K. (2026). Microwave-assisted pyrolysis of biomass for bioenergy production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 226, 116344. https://doi.org/10.1016/j.rser.2025.116344

Companhia Nacional De Abastecimento - Conab. (2024). Acompanhamento da Safra Brasileira de café – safra brasília.

Channiwala, S.A., Parikh, P.P., 2002. A unified correlation for estimating HHV of solid, liquid and gaseous fuels. Fuel 81, 1051–1063. https://doi.org/10.1016/S0016-2361(01)00131-4

Christianson, L. E., Christianson, R.,Díaz-García, C., Johnson, G., Maxwell, B., Cooke, R. A., Wickramarathne, N. M., & Gentry, L. (2023). Denitrifying Bioreactor In Situ Woodchip Bulk Density. *Journal of the ASABE, 66*(3), 723–734, https://doi.org/10.13031/ja.15364

Esteves, B., Sen, U., & Pereira, H. (2023). Influence of chemical composition on heating value of biomass: a review and bibliometric analysis. *Energies, 16*(10), 4226. https://doi.org/10.3390/en16104226

Foong, S. Y., Chan, Y. H., Yek, P. N. Y., Lock, S. S. M., Chin, B. L. F., Yiin, C. L., LAN, J. C. W., & Lam, S.(2024). Microwave-assisted pyrolysis in biomass and waste valorisation: insights into LCA and TEA. *Chemical Engineering Journal, 491*, 151942. https://doi.org/10.1016/j.cej.2024.151942

Hakeem, I. G., Rathnayake, N., Surapaneni, A., & Shah, K. (2024). Effects of mild acid pre-treatment on the co-pyrolysis behaviour of biosolids and wheat straw. *Process Safety and Environmental Protection, 185*, 375–391. https://doi.org/10.1016/j.psep.2024.03.022

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE (2023). Produção Agrícola Municipal – Café. Rio de Janeiro.

Lv, S., Xu, H., Yang, J., Gao, A., Huang, Y., Zhu, N., Yang, S., Sun, H., & Zhang, S. (2024). Volatile-char interactions during biomass pyrolysis: effects of functionalized graphitized carbon nanotubes on volatile distribution of cellulose and its model compounds. *Fuel, 378*, 132881.https://doi.org/10.1016/j.fuel.2024.132881

Mahfud, M., Qadariyah, L., Haqqyana, H., & Aswie, V. (2024). Optimization of bio-oil production from *Chlorella* sp. through microwave-assisted pyrolysis using response surface methodology. *Green Energy and Resources, 2*(1), 100057. https://doi.org/10.1016/j.gerr.2024.100057

Oliveira, L. S., & Franca, A. S. (2015). *A*n overview of the quality and sustainability aspects of coffee by-products. *Food Research International, 73*, 72–78. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409517-5.00031-0

Sánchez-Borrego, F. J., Hoyos-limón, T. J. B, García-Martín, J. F., & Álvarez-Mateos, P. (2021). Production of bio-oils and biochars from olive stones: application of biochars to the esterification of oleic acid. *Plants*, *11*(1), 70. https://doi.org/10.3390/plants11010070

Santana, A. L. M., Pacheco, E. A., Rangel, M. C., Lima, S. B., & Pires, C. A. M. (2025). Selective recovery and pre-fractionation of high-viscosity bio-oil via fixed-bed condensation during fast pyrolysis of biomass (sisal) residue. *Journal of the Energy Institute, 122*, 102242. https://doi.org/10.1016/j.joei.2025.102242

Stelmach, S., Ignasiak, K., Czardybon, A., & Bigda, J. (2023). Evaluation of bio-oils in terms of fuel properties. *Processes*, *11*(12), 3317. https://doi.org/10.3390/pr11123317

Wang, W., Lemaire, R., Bensakhria, A., & Luart, D. (2022). Review on the catalytic effects of alkali and alkaline earth metals (AAEMs) including sodium, potassium, calcium and magnesium on the pyrolysis of lignocellulosic biomass and on the co-pyrolysis of coal with biomass. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 163*, 105479. https://doi.org/10.1016/j.jaap.2022.105479

Zaichenko, V., Costa, M., & Silva, P. (2021). Pyrolysis of Coffee Husks and Parchment. *Solid Fuel Chemistry, 55*, 62-67. https://doi.org/10.3103/S0361521921010110

Caracterização energética da madeira de *Zeyheria tuberculosa* e *Genipa americana* visando ao aproveitamento de resíduos

Evanderson Luis Capelete Evangelista[1]; Dandara Paula da Silva Guimarães[1]; Edna Lopes Mendes Rosado[1]; Fernanda de Jesus Jorge[1]; Lawrence Pires de Oliveira[1]; Saulo Affonso Hygino[1]; Angélica de Cassia Oliveira Carneiro[1]; Vinicius Resende de Castro[1]

[1] Universidade Federal de Viçosa

Resumo: A ampliação de plantios comerciais de restauração com espécies nativas da Mata Atlântica associa a recuperação de áreas degradadas à produção sustentável de madeira, cujos resíduos do processamento industrial representam uma fonte complementar de biomassa para fins energéticos. Entretanto, a composição química e o potencial bioenergético das madeiras de ipê-felpudo (*Zeyheria tuberculosa*) e jenipapo (*Genipa americana*), visando ao aproveitamento energético desses resíduos, permanecem pouco investigados. Este estudo avaliou a composição química estrutural, a análise química imediata, o poder calorífico superior (PCS), a densidade básica e a densidade energética das madeiras de ambas as espécies, provenientes de plantios comerciais de restauração na Bahia. O ipê-felpudo apresentou maior teor de lignina (31,51%) e maior PCS (18,79 MJ kg^{-1}) em relação ao jenipapo (25,62% e 18,56 MJ kg^{-1}, respectivamente), enquanto o jenipapo destacou-se pelos maiores teores de extrativos (8,07%) e holoceluloses (65,85%), além de maior densidade básica (665,97 kg m^{-3}) e densidade energética (12.359,52 MJ m^{-3}). A análise de componentes principais explicou 80,8% da variabilidade total dos dados, separando claramente as espécies de acordo com seus perfis físico-químicos e energéticos. Os resultados evidenciam a complementaridade entre as espécies: o ipê-felpudo apresenta maior qualidade energética por unidade de massa, enquanto o jenipapo se destaca pela maior disponibilidade de energia por unidade de volume. Essas características demonstram o potencial das duas espécies para o aproveitamento energético dos resíduos gerados durante o processamento industrial da madeira, contribuindo para sua valorização no contexto da bioeconomia circular.
Palavras-chave: Bioenergia; Resíduos florestais; Densidade energética.

Energy Characterization of *Zeyheria tuberculosa* and *Genipa americana* Wood for Residue Valorization

Abstract: The expansion of commercial restoration plantations with native Atlantic Forest species combines the recovery of degraded areas with sustainable timber production, whose industrial processing residues represent a complementary source of biomass for energy purposes. However, the chemical composition and bioenergy potential of the wood of *Zeyheria tuberculosa* and *Genipa americana*, aiming at the energetic utilization of processing residues, remain poorly investigated. This study evaluated the structural chemical composition, proximate analysis, higher heating value (HHV), basic density, and energy density of the wood from both species grown in commercial restoration plantations in Bahia, Brazil. *Zeyheria tuberculosa* exhibited higher lignin content (31.51%) and HHV (18.79 MJ kg^{-1}) than *Genipa americana* (25.62% and 18.56 MJ kg^{-1}, respectively), whereas *G. americana* showed higher extractives (8.07%) and holocellulose (65.85%) contents, as well as significantly greater basic density (665.97 kg m^{-3}) and energy density (12,359.52 MJ m^{-3}). Principal component analysis

explained 80.8% of the total data variability, clearly separating the species according to their physicochemical and energy-related characteristics. The results demonstrate the complementary bioenergy potential of the two species, *Z. tuberculosa* exhibited superior energy quality on a mass basis, whereas *G. americana* provided greater energy availability per unit volume. These findings highlight the potential of both species for the energy recovery of residues generated during industrial wood processing, contributing to their valorization within a circular bioeconomy framework.
Keywords: Bioenergy; Forest residues; Energy density

1. Introdução

A transição de um modelo econômico linear e dependente de combustíveis fósseis para um sistema sustentável de produção e consumo é um desafio central para o desenvolvimento da bioeconomia baseada em recursos renováveis (Tursi, 2019; D'Amato *et al*., 2020). Nesse contexto, a biomassa florestal destaca-se por sua ampla disponibilidade e potencial de conversão em diferentes formas de bioenergia, consolidando-se como alternativa estratégica para a transição energética e o fomento à inovação industrial (Solarte-Toro *et al*., 2021).

Entre as fontes de biomassa florestal, os resíduos do processamento industrial da madeira apresentam elevado potencial de aproveitamento, cuja valorização aumenta a eficiência do uso da matéria-prima ao longo da cadeia produtiva. Sob a perspectiva da bioeconomia, essa utilização está associada ao conceito de uso em cascata da madeira, no qual produtos sólidos de maior valor agregado são priorizados, direcionando-se os resíduos para conversão energética preferencialmente nas etapas finais do ciclo de aproveitamento (Jarre *et al*., 2020).

Nesse cenário, os plantios comerciais de restauração com espécies nativas da Mata Atlântica assumem importância estratégica por aliarem a recuperação de áreas degradadas à produção sustentável de madeira (Rezende *et al*., 2018; Krainovic *et al*., 2025), contribuindo ainda para a provisão de serviços ecossistêmicos essenciais à manutenção do capital natural (Strassburg *et al*., 2020). O processamento industrial dessas madeiras gera, consequentemente, resíduos que representam fonte complementar de biomassa para fins energéticos, em conformidade com o princípio de utilização prioritária da madeira para fins nobres.

A qualidade energética desses resíduos está diretamente associada às suas características químicas e físicas, como a composição química estrutural que se relaciona ao poder calorífico e ao potencial energético da biomassa (Börcsök & Pásztory, 2021), enquanto a análise química imediata, a densidade básica e a densidade energética são fundamentais para caracterizar a eficiência de sua utilização como fonte de energia (Solarte-Toro *et al*., 2021).

Embora espécies nativas apresentem potencial para integração em modelos de bioeconomia circular, a carência de conhecimentos silviculturais específicos e de pesquisas empíricas sobre seu manejo limita a consolidação desses modelos no setor florestal (D'Amato *et al*., 2020; Krainovic *et al*., 2025), sendo ainda mais escassas as informações sobre a composição química e o potencial energético do ipê-felpudo (*Zeyheria tuberculosa*) e do jenipapo (*Genipa americana*). Assim, o presente estudo teve como objetivo avaliar a composição química estrutural, a análise química imediata, o poder calorífico superior, a densidade básica e a densidade energética da madeira dessas espécies, provenientes de plantios comerciais de restauração da Mata Atlântica.

2. Material e métodos

2.1 Material e preparação das amostras

Foram utilizadas madeiras de *Z. tuberculosa* e *G. americana* provenientes de plantios comerciais de restauração da Mata Atlântica pertencentes à empresa Symbiosis Investimentos, localizada no município de Porto Seguro, Bahia, Brasil. Foram selecionadas dez árvores por espécie, totalizando 20 indivíduos amostrados. As árvores foram abatidas e, de cada uma, foram coletados discos nas posições correspondentes a 0, 25, 50 e 75% da altura comercial do fuste.

Para as análises químicas e energéticas, foi retirada uma fração correspondente a 1/4 da seção transversal de cada disco. As frações provenientes das quatro posições longitudinais foram homogeneizadas por árvore, constituindo uma amostra composta representativa de cada indivíduo. Posteriormente, o material foi processado em moinho de facas e peneirado, sendo utilizada a fração retida entre as peneiras de 40 e 60 *mesh*. As frações destinadas às análises químicas e energéticas foram encaminhadas ao Laboratório de Painéis e Energia da Madeira (LAPEM/UFV).

Para a determinação da densidade básica, foram retiradas duas cunhas opostas de cada disco, considerando as diferentes posições longitudinais do fuste. As cunhas destinadas à determinação da densidade básica foram encaminhadas ao Laboratório de Propriedades da Madeira (LPM/UFV).

2.2 Caracterização química e energética

A caracterização química estrutural foi realizada pela determinação dos teores de extrativos totais, lignina insolúvel e lignina solúvel, conforme as normas TAPPI 264 cm-22, TAPPI T222 om-88 e TAPPI UM-250. O teor de lignina total foi obtido pela soma das frações

insolúvel e solúvel, enquanto o teor de holoceluloses foi estimado por diferença, considerando a subtração dos teores de extrativos totais, lignina total e cinzas em relação à composição total da biomassa. A análise química imediata (materiais voláteis, carbono fixo e cinzas) foi realizada conforme ASTM D1762-84 (ASTM, 2021). O poder calorífico superior foi determinado conforme DIN EN 14918 utilizando bomba calorimétrica. A densidade básica foi determinada conforme ABNT NBR 11941 e a densidade energética foi obtida por meio da multiplicação da densidade básica pelo poder calorífico superior.

2.3 Análise estatística

O experimento foi conduzido em delineamento inteiramente casualizado, considerando as espécies *Z. tuberculosa* e *G. americana* como tratamentos, com dez repetições, sendo cada árvore considerada uma unidade experimental. Os dados foram submetidos à análise de variância (ANOVA) e, quando constatadas diferenças significativas, as médias foram comparadas pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$). Adicionalmente, foram realizadas análises de correlação de Pearson e de componentes principais (PCA) no software R, utilizando as variáveis químicas e energéticas avaliadas.

3. Resultados e discussão

Os resultados da caracterização energética e da composição química estrutural e química imediata das madeiras de ipê-felpudo e jenipapo são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1. Valores médios das propriedades energéticas, físicas e da composição química estrutural e química imediata das madeiras de ipê-felpudo (*Z. tuberculosa*) e jenipapo (*G. americana*)

Variável	Ipê-felpudo (*Z. tuberculosa*)	Jenipapo (*G. americana*)
Materiais voláteis (%)	83,26 a	84,20 a
Cinzas (%)	0,325 b	0,452 a
Carbono fixo (%)	16,42 a	15,35 a
Poder calorífico superior (MJ kg^{-1})	18,79 a	18,56 b
Extrativos totais (%)	3,94 b	8,07 a
Lignina total (%)	31,51 a	25,62 b
Holoceluloses (%)	64,23 b	65,85 a
Densidade básica (kg m^{-3})	578,30 b	665,97 a

Densidade energética (MJ m^{-3})	10.867,89 b	12.359,52 a

Os teores de materiais voláteis não diferiram estatisticamente entre as espécies (Tabela 1). O teor de cinzas foi significativamente maior no jenipapo (0,452%), embora ambos os valores sejam reduzidos e ideais para fins energéticos. Teores elevados de cinzas são indesejáveis por representarem a fração inorgânica não combustível, associada à formação de escória, incrustações e corrosão em sistemas de combustão (Brand *et al*., 2021). Segundo a literatura, teores de cinzas acima de 4% tornam-se críticos por acelerar o desgaste abrasivo de grelhas e caldeiras (Petricoski *et al*., 2024).

O carbono fixo não diferiu significativamente entre as espécies, o que reflete a relação inversamente proporcional entre carbono fixo e materiais voláteis, uma vez que o teor de cinzas da madeira costuma ser pouco expressivo nesse balanço (Bianchini *et al*., 2025). Em geral, maiores teores de carbono fixo estão associados a uma combustão mais lenta e prolongada, enquanto maiores teores de materiais voláteis favorecem a ignição e a liberação mais rápida de energia. Assim, a importância dessas frações depende da aplicação energética da biomassa (Jia *et al*., 2021).

O ipê-felpudo apresentou PCS superior ao jenipapo (18,79 MJ kg^{-1}), o que é coerente com o seu maior teor de lignina (31,51%). A literatura atribui à lignina um papel central no incremento do poder calorífico por ser o componente estrutural com maior conteúdo energético (Lima *et al*., 2020; Gama *et al*., 2020). Já os extrativos têm contribuição variável, no jenipapo, o maior teor de extrativos (8,07%) não foi suficiente para superar o impacto da lignina no PCS do ipê-felpudo, embora em outras espécies nativas, como a jurema-branca, teores elevados de extrativos possam compensar menores teores de lignina para manter o potencial calorífico (Almeida *et al*., 2015). O padrão de compensação química entre lignina, holocelulose e extrativos é uma característica documentada da parede celular (Gama *et al*., 2020).

Diferentemente do PCS, o jenipapo superou o ipê-felpudo em densidade básica (665,97 kg m^{-3}) e densidade energética (12.359,52 MJ m^{-3}). Como a densidade energética resulta diretamente do produto entre densidade básica e poder calorífico, é esperado que as duas variáveis estejam fortemente associadas, padrão também relatado para clones de *Eucalyptus* (Lima *et al*., 2020). Esse resultado reforça que a densidade básica é a propriedade que mais influencia a quantidade de energia disponível por unidade de volume (MJ m^{-3}), sendo um critério fundamental para a avaliação do potencial energético (Carvalho *et al*., 2020; Lima *et al*., 2020).

O biplot da PCA (Figura 1) explicou 80,8% da variabilidade total dos dados, facilitando a interpretação do potencial bioenergético relativo entre espécies. Em conjunto, os resultados convergem para um diagnóstico de complementaridade: o ipê-felpudo destaca-se pela qualidade energética por unidade de massa (lignina e PCS), enquanto o jenipapo leva vantagem na logística e transporte devido à sua maior densidade energética (Lima *et al*., 2020; Carvalho *et al*., 2020).

A relação multivariada entre as propriedades avaliadas é apresentada na Figura 1, por meio da análise de componentes principais (PCA).

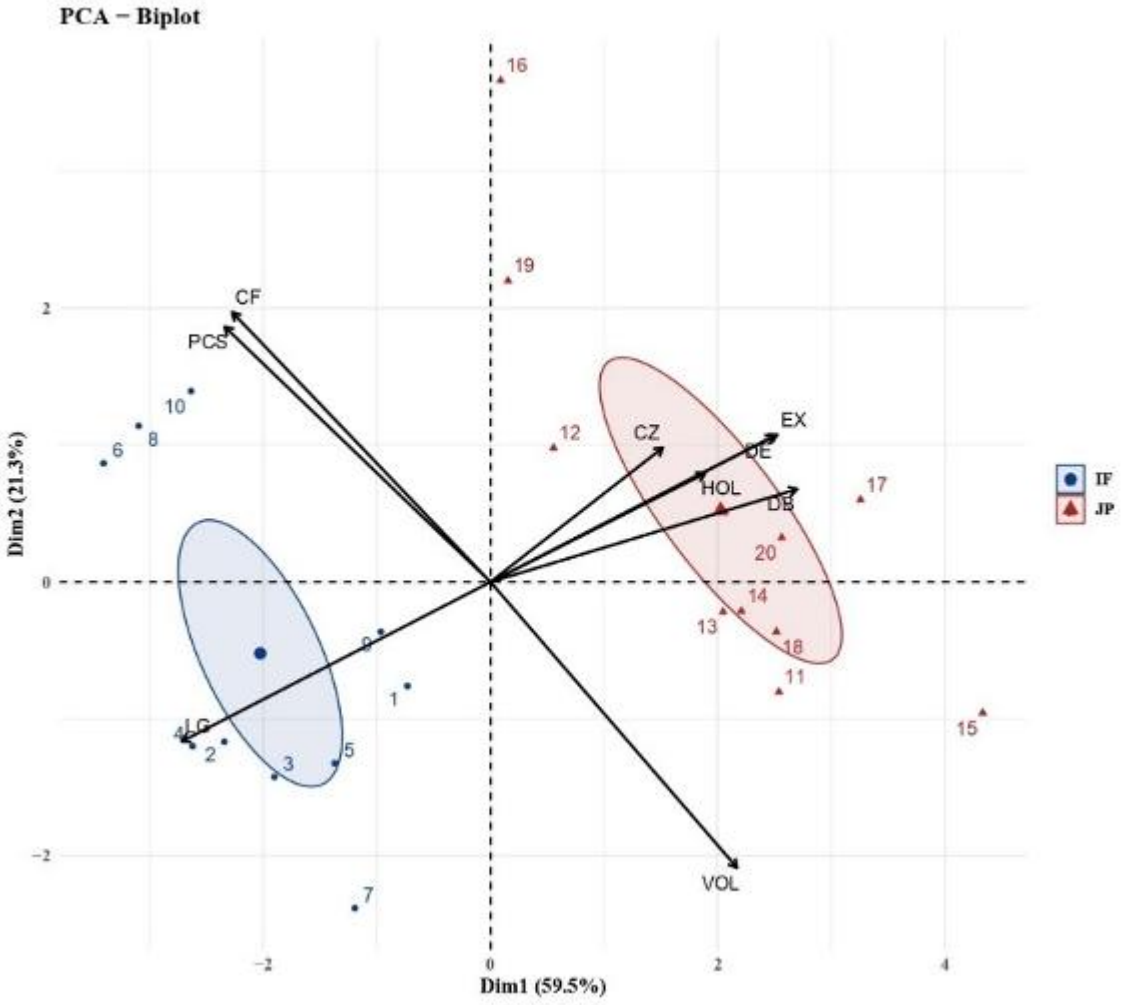


Figura 1. Biplot da análise de componentes principais (PCA) das propriedades energéticas, físicas e químicas estruturais das madeiras de ipê-felpudo (IF) e jenipapo (JP)

Observou-se uma clara separação entre os grupos IF e JP ao longo da Dim1: as amostras de ipê-felpudo associaram-se aos maiores teores de lignina, carbono fixo e PCS, enquanto o grupo do jenipapo vinculou-se a extrativos, cinzas, holocelulose e densidades básica e

energética. A proximidade entre os vetores de lignina e PCS reflete a influência da composição química sobre o potencial energético, enquanto a orientação oposta entre lignina e holocelulose sugere a relação inversa entre esses componentes estruturais (Gama *et al*., 2020; Almeida *et al*., 2015).

Em conjunto, os resultados convergem para um diagnóstico de complementaridade. O ipê-felpudo destaca-se pelo perfil químico associado à maior qualidade energética por unidade de massa (lignina e PCS), relevante para processos avaliados por quilograma (Lima *et al*., 2020; Gama *et al*., 2020). O jenipapo, por sua vez, leva vantagem em energia por unidade de volume devido à sua maior densidade energética, variável de maior relevância prática para logística de transporte e dimensionamento de sistemas de combustão (Lima *et al*., 2020; Carvalho *et al*., 2020).

Esses resultados reforçam a importância da avaliação conjunta das propriedades físicas e químicas da madeira para estimar seu potencial bioenergético. Sob a perspectiva da bioeconomia circular, essas informações fornecem subsídios para o aproveitamento energético dos resíduos gerados durante o processamento industrial dessas espécies, agregando valor ao material e contribuindo para o uso mais eficiente dos recursos florestais.

4. Conclusões

As madeiras de ipê-felpudo e jenipapo apresentaram elevado potencial bioenergético, porém com características distintas. O ipê-felpudo destacou-se pelo maior poder calorífico superior e teor de lignina, enquanto o jenipapo apresentou maior densidade energética em função da sua elevada densidade básica. Esses resultados evidenciam o potencial dessas espécies para o aproveitamento energético dos resíduos gerados durante seu processamento, contribuindo para a valorização de recursos florestais sob a perspectiva da bioeconomia circular.

5. Agradecimentos

À Universidade Federal de Viçosa (UFV), ao Departamento de Engenharia Florestal (DEF/UFV), ao Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal (PPGCF/UFV), à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), à empresa Symbiosis Investimentos e à EMBRAPII Unidade Fibras Florestais.

6. Referências bibliográficas

Almeida, A. M. C., Oliveira, E., Calegari, L., Medeiros Neto, P. N., & Pimenta, A. S. (2015). Avaliação físico-química e energética da madeira das espécies Piptadenia stipulacea (Benth.) Ducke e Amburana cearensis (Allemao) A. C. Smith de ocorrência no semiárido nordestino brasileiro. *Ciência Florestal, 25*(1), 165-173.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2003). *NBR 11941:2003: Madeira — Determinação da densidade básica*. ABNT.

ASTM International. (2021). *ASTM D1762–84: Standard test method for chemical analysis of wood charcoal*. ASTM International.

Bianchini, L., Colantoni, A., Venanzi, R., Cozzolino, L., & Picchio, R. (2025). Physicochemical properties of forest wood biomass for bioenergy application: A review. *Forests, 16*(4), 702. https://doi.org/10.3390/f16040702

Brand, M. A., Henne, R. A., Schein, V. A. S., & Pereira, E. R. (2021). Mapeamento dos problemas associados à geração e tratamento das cinzas na combustão da biomassa florestal em caldeira. *Ciência Florestal, 31*(3), 1167–1192. https://doi.org/10.5902/1980509835819

Börcsök, Z., & Pásztory, Z. (2021). The role of lignin in wood working processes using elevated temperatures: An abbreviated literature survey. European Journal of *Wood and Wood Products, 79*, 511–526. https://doi.org/10.1007/s00107-020-01637-3

Carvalho, A. C., Santos, R. C., Castro, R. V. O., Santos, C. P. S., Costa, S. E. L., Carvalho, A. J. E., Pareyn, F. G. C., Vidaurre, G. B., Dias Junior, A. F., & Almeida, M. N. F. (2020). Produção de energia da madeira de espécies da Caatinga aliada ao manejo florestal sustentável. *Scientia Forestalis, 48*(126), e3086. https://doi.org/10.18671/scifor.v48n126.08

D'Amato, D., Veijonaho, S., & Toppinen, A. (2020). Towards sustainability? Forest-based circular bioeconomy business models in Finnish SMEs. *Forest Policy and Economics, 110*, 101848. https://doi.org/10.1016/j.forpol.2019.01.003

Deutsches Institut für Normung. (2010). DIN EN 14918: *Solid biofuels—Determination of calorific value.* Deutsches Institut für Normung.

Gama, D. C., Nascimento Júnior, J. M., Takeshita, S., & Dias Júnior, A. F. (2020). Potencial energético da madeira de Copaifera arenicola endêmica do semiárido nordestino brasileiro. *BIOFIX Scientific Journal, 5*(1), 135–140. https://doi.org/10.5380/biofix.v5i1.69236

Jarre, M., Petit-Boix, A., Priefer, C., Meyer, R., & Leipold, S. (2020). Transforming the bio-based sector towards a circular economy: What can we learn from wood cascading? *Forest Policy and Economics, 110*, 101872. https://doi.org/10.1016/j.forpol.2019.01.017

Jia, Y., Li, Z., Wang, Y., Wang, X., Lou, C., Xiao, B., & Lim, M. (2021). Visualization of combustion phases of biomass particles: Effects of fuel properties. *ACS Omega, 6*(42), 27702–27710. https://doi.org/10.1021/acsomega.1c02783

Krainovic, P. M., Brandão, D. O., Resende, A. F., Schons, S. Z., Munhoz, L., Metzger, J. P., Nascimento, N. C., Rodrigues, R. R., Brancalion, P. H. S., Guillemot, J., & de-Miguel, S. (2025). Current constraints to reconcile tropical forest restoration and bioeconomy. *Sustainability Science, 20*, 219–229. https://doi.org/10.1007/s11625-024-01586-8

Lima, M. D. R., Barros Junior, U. O., Assis, M. R., Melo, I. C. N. A., Figueiredo, I. C. R., Protásio, T. P., & Trugilho, P. F. (2020). Variabilidade das densidades básica e energética e estoque de carbono na madeira no fuste de clones de Eucalyptus. *Scientia Forestalis, 48*(128), e3302. https://doi.org/10.18671/scifor.v48n128.04

Petricoski, S. M., Costa, M. S. S. M., & Oliveira, A. F. (2024). Análise dos parâmetros físicos, químicos e energéticos para produção de pellets a partir de biomassa residual. *Revista Cultivando o Saber, 17*, 82–97.

Rezende, C. L., Scarano, F. R., Assad, E. D., Joly, C. A., Metzger, J. P., Strassburg, B. B. N., Tabarelli, M., Fonseca, G. A., & Mittermeier, R. A. (2018). From hotspot to hopespot: An opportunity for the Brazilian Atlantic Forest. *Perspectives in Ecology and Conservation, 16*(4), 208–214. https://doi.org/10.1016/j.pecon.2018.10.002

Silva, A. P., Andrade, A. M., & Dias Júnior, A. F. (2020). Investigando o uso de resíduos do processamento da madeira de eucalipto para a produção de combustíveis sólidos compactados. *Matéria (Rio de Janeiro), 25*(2), e12625. https://doi.org/10.1590/S1517-707620200002.1025

Solarte-Toro, J. C., González-Aguirre, J. A., Poveda Giraldo, J. A., & Cardona Alzate, C. A. (2021). Thermochemical processing of woody biomass: A review focused on energy-driven applications and catalytic upgrading. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 136*, 110376. https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110376

Strassburg, B. B. N., Iribarrem, A., Beyer, H. L., Cordeiro, C. L., Crouzeilles, R., Jakovac, C. C., Junqueira, A. B., Lacerda, E., Latawiec, A. E., Balmford, A., Brooks, T. M., Butchart, S. H. M., Chazdon, R. L., Erb, K. H., Brancalion, P. H. S., Buchanan, G.,

Cooper, D., ... Visconti, P. (2020). Global priority areas for ecosystem restoration. *Nature, 586*, 724–729. https://doi.org/10.1038/s41586-020-2784-9

Technical Association of the Pulp and Paper Industry. (2022). Preparation of wood for chemical analysis (Test Method T 264 cm-22). TAPPI.

Technical Association of the Pulp and Paper Industry. (1996). Acid-insoluble lignin in wood and pulp (Test Method T 222 om-88). TAPPI.

Tursi, A. (2019). A review on biomass: Importance, chemistry, classification, and conversion. *Biofuel Research Journal, 6*(2), 962–979. https://doi.org/10.18331/BRJ2019.6.2.3

Caracterização físico-química comparativa revela propriedades complementares do caroço de açaí e da casca de castanha-do-brasil

Shara Dias de Amorim [1]; Vitória Laurinda de Souza[1]; Karen Tawany de Abreu Viana [1]; Erica Vitória de Almeida Silva[1]; Iris Izabel da Silva Cavalcante[1]; Iwlly Cristina Cavalcante Silva[1]; Patrícia Gomes Ribeiro[1]

[1]Universidade Federal do Acre

Resumo: A busca por fontes renováveis de energia tem estimulado o aproveitamento de resíduos agroindustriais como biomassa energética. Este trabalho avaliou o potencial energético do caroço de açaí (*Euterpe precatoria*) e da casca de castanha-do-brasil (*Bertholletia excelsa* Bonpl.) por meio da caracterização físico-química. O estudo foi realizado no Laboratório de Anatomia da Madeira da Universidade Federal do Acre (UFAC) e na Fundação de Tecnologia do Estado do Acre (FUNTAC). As biomassas foram secas, trituradas e classificadas granulometricamente, com determinação de densidade a granel, umidade, materiais voláteis, cinzas e carbono fixo conforme normas ABNT NBR 6923 e ABNT NBR 8112. O caroço de açaí apresentou maior teor de materiais voláteis (84,55%) e menor teor de cinzas (2,48%), enquanto a casca de castanha destacou-se pelo maior teor de carbono fixo (23,52%) e menor umidade (6,87%). Os resultados demonstraram diferentes comportamentos na combustão, indicando o potencial do caroço de açaí para rápida liberação de energia e da casca de castanha para combustão prolongada. Ambos os resíduos apresentam potencial energético, contribuindo para a valorização de subprodutos amazônicos.

Palavras-chave: Análise imediata; Biomassa lignocelulósica; Bioenergia.

Comparative Physicochemical Characterization Reveals Complementary Properties of Açaí Seed and Brazil Nut Shell

Abstract: The search for renewable energy sources has encouraged the use of agro-industrial residues as energy biomass. This study evaluated the energy potential of açaí seeds (*Euterpe precatoria*) and Brazil nut shells (*Bertholletia excelsa* Bonpl.) through physicochemical characterization. The study was conducted at the Wood Anatomy Laboratory of the Federal University of Acre (UFAC) and at the Technology Foundation of the State of Acre (FUNTAC). The biomasses were dried, ground, and granulometrically classified, with the determination of bulk density, moisture content, volatile matter, ash, and fixed carbon according to ABNT NBR 6923 and ABNT NBR 8112. standards. Açaí seeds showed higher volatile matter content (84,55%) and lower ash content (2,48%), while Brazil nut shells stood out for their higher fixed carbon content (23,52%) and lower moisture content (6,87%). The results demonstrated different combustion behaviors, indicating the potential of açaí seeds for rapid energy release and

Brazil nut shells for prolonged combustion. Both residues show energy potential, contributing to the valorization of Amazonian by-products.

Keywords: Proximate analysis; Lignocellulosic biomass; Bioenergy

1. Introdução

53.

A transição para matrizes energéticas mais sustentáveis tem intensificado a busca por fontes renováveis capazes de reduzir a dependência de combustíveis fósseis e mitigar os impactos ambientais associados às emissões de gases de efeito estufa. Nesse contexto, a biomassa lignocelulósica destaca-se como uma importante fonte energética devido à sua ampla disponibilidade e capacidade de conversão em diferentes formas de energia (Isikgor e Becer, 2015). O aproveitamento de resíduos agroindustriais também representa uma estratégia promissora, pois agrega valor a materiais descartados, reduz impactos ambientais e contribui para modelos produtivos baseados na economia circular (Yaashikaa *et al*., 2022).

A Amazônia abriga uma das maiores disponibilidades mundiais de biomassa proveniente de cadeias agroextrativistas, caracterizando-se pela elevada geração de resíduos lignocelulósicos ainda subutilizados. O processamento de produtos florestais não madeireiros, como o açaí (*Euterpe precatoria* Mart.) e a castanha-do-brasil (*Bertholletia excelsa* Bonpl.), produz grandes volumes de resíduos sólidos que frequentemente apresentam baixo aproveitamento econômico e destinação limitada. O aproveitamento energético desses materiais reduz passivos ambientais, agrega valor às cadeias produtivas e fortalece a bioeconomia regional (Nagaishi *et al*., 2020).

Entre os resíduos agroextrativistas amazônicos com potencial bioenergético destacam-se o caroço de açaí e a casca de castanha-do-brasil. O caroço de açaí representa aproximadamente 80% da massa do fruto processado, enquanto as cascas da castanha correspondem a cerca de 90% da massa do fruto, tornando ambos resíduos abundantes nas cadeias produtivas amazônicas (Reis *et al*., 2019). Além da elevada disponibilidade, essas biomassas apresentam composição lignocelulósica favorável ao aproveitamento energético. O caroço de açaí tem sido investigado para produção de energia térmica e biochar (Silva, 2021; Prado *et al*., 2025), enquanto a casca de castanha, em razão do elevado teor de lignina

(55,76%), apresenta características promissoras para processos de conversão termoquímica e produção de bioenergia (Leandro *et al*., 2019).

As propriedades físico-químicas de biomassas lignocelulósicas influenciam diretamente seu desempenho em processos de conversão termoquímica (Yang et al., 2024). Entretanto , ainda são escassos estudos comparativos sobre os resíduo do caroço de açaí *Euterpe precatoria* Mart.) e a casca de castanha-do-brasil (*Bertholletia excelsa* Bonpl.) conduzidos sob as mesmas condições experimentais. Assim, este estudo objetivou caracterizar essas biomassas por meio da determinação da densidade a granel e da análise imediata, visando subsidiar sua aplicação em diferentes rotas de conversão termoquímica.

2. Material e métodos

O trabalho foi desenvolvido no Laboratório de Anatomia da Madeira da Universidade Federal do Acre (UFAC) e na Fundação de Tecnologia do Estado do Acre (FUNTAC). A casca da castanha foi coletada em uma fábrica de beneficiamento, no município de Rio Branco, Acre, e o caroço de açaí no viveiro da UFAC.

Após a coleta, os resíduos foram secos em estufa a 105°± 2° C até massa constante, triturados e classificados em peneiras de 14, 28, 35 e 60 mesh. As amostras obtidas foram utilizadas para determinar os teores de umidade, materiais voláteis e cinzas, conforme as normas ABNT NBR 6923 e ABNT NBR 8112, originalmente destinadas à caracterização de carvão vegetal. A adaptação dos procedimentos foi realizada considerando as características específicas das amostras lignocelulósicas in natura e a finalidade de sua caracterização físico-química.



Figura 1: Resíduos lignocelulósicos de açaí e castanha após classificação granulométrica em peneiras de 14, 28, 35 e 60 mesh, incluindo a fração de fundo.

2.1 Determinação da densidade a granel

A determinação da densidade a granel foi realizada conforme a ABNT NBR 6923, utilizando um recipiente de volume conhecido (13,5 × 10 × 3 cm). A biomassa foi acondicionada sem compactação e a densidade foi calculada pela relação entre a massa da amostra e o volume ocupado, conforme a Equação 1.

$$\rho_b = m . V^{-1}$$

em que: ρ_b= densidade a granel, em kg.m^{-3}; m = massa da biomassa, em kg; V = volume ocupado pela biomassa, em m^3.

2.2 Determinação do teor de umidade

O teor de umidade foi determinado em duplicata, conforme a norma ABNT NBR 8112, a partir da secagem de amostras de 12,75 g de semente de açaí (*Euterpe precatoria* Mart.) e 30,42 g de casca de castanha-do-brasil (*Bertholletia excelsa* Bonpl.) submetidas à secagem em estufa a 105 ± 1 °C por 3 horas. Após resfriamento em dessecador e pesagem em balança analítica, o teor de umidade foi calculado conforme a Equação 2.

$$U\ (\%) = [(M_i - M_s) . M_i^{-1}] \times 100$$

em que: U = teor de umidade; M_i = massa inicial da amostra antes da secagem, em g; M_s = massa seca da amostra após secagem em estufa, em g.

2.3 Determinação do teor de materiais voláteis

54.

A determinação dos materiais voláteis foi realizada conforme a norma ABNT NBR 8112. Para o ensaio, aproximadamente 1,0 g da amostra previamente seca foi acondicionada em um cadinho com tampa. Inicialmente, os cadinhos permaneceram por 3 minutos na porta da mufla, permitindo a adaptação gradual da amostra à temperatura e evitando um aquecimento muito brusco. Posteriormente, foram inseridos no interior da mufla, mantida a 950 ± 5 °C, durante 7 minutos (Figura 2). Após esse período, os cadinhos foram retirados da mufla e mantidos em dessecador até o resfriamento, evitando a absorção de umidade do ambiente. Em seguida, as amostras foram pesadas para determinação da perda de massa durante o aquecimento. O teor de materiais voláteis foi obtido conforme a Equação 3.

$$MV\,(\%) = [(M_s - M_f)\,.\,M_s^{-1}] \times 100$$

em que: MV = teor de materiais voláteis; M_s = massa inicial da amostra seca em estufa, em g; M_f = massa final da amostra após mufla, em g.

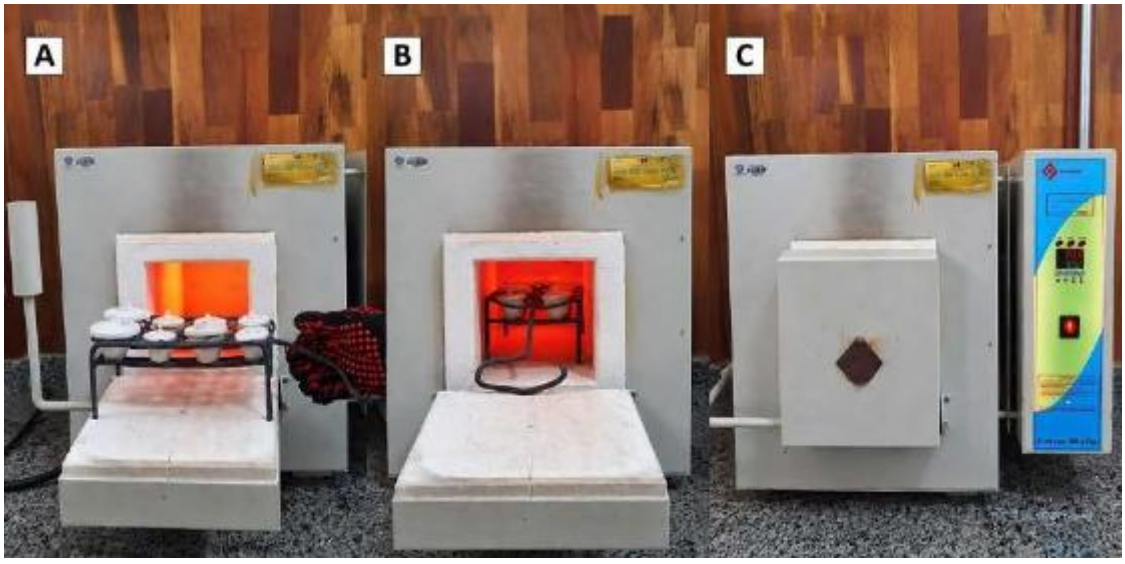


Figura 2: Etapas da determinação do teor de materiais voláteis em amostras de biomassa:

(A) Cadinhos contendo aproximadamente 1,0 g da amostra previamente seca posicionados na porta da mufla por 3 minutos; (B) cadinhos acondicionados no interior da mufla durante o ensaio; e (C) forno mufla utilizado no processo de carbonização.

2.4 Determinação do teor de cinzas

A determinação dos materiais voláteis foi realizada conforme a norma ABNT NBR 8112. Para o ensaio, aproximadamente 1,0 g da amostra previamente seca foi acondicionada em um cadinho com tampa. Inicialmente, os cadinhos permaneceram por 3 minutos na porta da mufla, permitindo a adaptação gradual da amostra à temperatura e, posteriormente, foram inseridos no interior da mufla a 950 ± 5 °C durante 7 minutos (Figura 2). Após o aquecimento, os cadinhos foram retirados e resfriados antes da pesagem final. O teor de materiais voláteis foi obtido pela perda de massa da amostra, conforme a Equação 3.

$$CZ\ (\%) = (M_r \,.\, M_s^{-1}) \times 100$$

em que: CZ = Teor de cinzas; M_s = Massa da amostra seca em estufa, em g; M_r = massa do resíduo mineral (cinzas), em g.

2.5 Determinação do teor de carbono fixo

O teor de carbono fixo foi obtido por cálculo indireto, seguindo a norma a ABNT NBR 8112:1986. Esse parâmetro foi determinado pela diferença entre os valores correspondentes aos materiais voláteis e ao teor de cinzas, conforme apresentado na Equação 5.

$$CF\ (\%) = 100 - (CZ + MV)$$

em que: CF = teor de carbono fixo; CZ = teor de cinzas no carvão vegetal (%); MV = teor de materiais voláteis (%).

2.6 Delineamento experimental e análise estatística

55.

As determinações de umidade, materiais voláteis e cinzas foram realizadas em duplicata técnica para cada biomassa. Os resultados foram expressos como média e desvio-padrão das duas determinações. Em razão do número reduzido de determinações e da ausência de repetições amostrais independentes, não foram aplicados testes estatísticos inferenciais, sendo as comparações conduzidas de forma descritivos.

56.3. Resultados e Discussão

A caracterização físico-química evidenciou diferenças entre o caroço de açaí (*Euterpe precatoria* Mart.) e a casca de castanha-do-brasil (*Bertholletia excelsa* Bonpl.), indicando perfis complementares para o aproveitamento energético (Tabela 1). O caroço de açaí destacou-se pelo maior teor de materiais voláteis e menor teor de cinzas, enquanto a casca de castanha-do-brasil apresentou maior densidade a granel, menor umidade e maior carbono fixo, características que sugerem potencial para diferentes rotas de conversão termoquímica.

Tabela 1 – Densidade a granel (kg m^{-3}) e composição imediata (teor de umidade, materiais voláteis, teor de cinzas e carbono fixo) do caroço de açaí e da casca da castanha. Os valores da composição imediata são expressos em média ± desvio padrão.

Parâmetros	Caroço de açaí	Casca de castanha
Densidade a granel (kg m^{-3})	666,67	740,74
Teor de umidade (%)	10,82 ± 0,65	6,87 ± 0,98
Materiais voláteis (%)	84,55 ± 0,63	74,14 ± 0,57
Teor de cinzas (%)	2,48 ± 0,74	4,45 ± 0,68
Carbono fixo (%)	12,97 ± 3,62	23,52 ± 1,79

A casca de castanha-do-brasil apresentou maior densidade a granel (740,74 kg m^{-3}) e menor teor de umidade (6,87 ± 0,98) em relação ao caroço de açaí (666,67 kg m^{-3} e 10,82 ± 0,65, respectivamente). A maior densidade a granel indica maior concentração de massa por unidade de volume, característica que pode favorecer o armazenamento, o transporte e o manuseio da biomassa. Além disso, o menor teor de umidade da casca de castanha-do-brasil representa uma característica favorável ao aproveitamento termoquímico, pois reduz a quantidade de energia necessária para a evaporação da água durante o aquecimento.

Entretanto, não é possível afirmar, com base apenas nos resultados obtidos, que a casca de castanha-do-brasil apresenta maior densidade energética volumétrica, uma vez que essa

propriedade depende não apenas da densidade a granel, mas também do conteúdo energético da biomassa, determinado pelo seu poder calorífico, parâmetro que não foi avaliado neste estudo. Assim, os resultados permitem indicar que a maior densidade a granel da casca de castanha-do-brasil pode contribuir para maior concentração de massa por unidade de volume e melhores condições logísticas, enquanto a avaliação da densidade energética volumétrica requer a determinação do poder calorífico das biomassas. Resultados semelhantes foram descritos para resíduos de açaí e castanha-do-brasil, embora diferenças sejam esperadas em função da espécie, procedência da biomassa, granulometria e condições de secagem (Bufalino et al., 2018; Souza e Silva, 2021).

O caroço de açaí apresentou maior teor de materiais voláteis (84,55 ± 0,63) e menor teor de cinzas (2,48 ± 0,74), indicando maior reatividade térmica e menor formação de resíduos minerais durante a combustão, comportamento semelhante ao observado por Silva *et al*. (2020) para essa biomassa. Em contrapartida, a casca de castanha-do-brasil apresentou maior carbono fixo (23,52 ± 1,79) e maior teor de cinzas (4,45 ± 0,68), características associadas à maior participação da fração sólida durante a combustão (Leandro *et al*., 2019). De forma geral, os valores obtidos foram compatíveis com aqueles reportados para biomassas amazônicas semelhantes, sendo as diferenças atribuídas principalmente à procedência da biomassa, ao preparo das amostras e à metodologia empregada (Brand, 2010; Bufalino *et al*., 2018; Santos *et al*., 2020).

Esses resultados indicam que o caroço de açaí e a casca de castanha-do-brasil não competem entre si quanto ao aproveitamento energético, mas apresentam características complementares que podem favorecer diferentes rotas de conversão termoquímica. Enquanto o caroço de açaí apresenta maior aptidão para processos que demandam elevada

reatividade térmica, a casca de castanha-do-brasil reúne atributos favoráveis à combustão prolongada e à produção de combustíveis sólidos.

4. Conclusões

A caracterização físico-química evidenciou que o caroço de açaí (*Euterpe precatoria* Mart.) e a casca de castanha-do-brasil (*Bertholletia excelsa* Bonpl.) apresentam propriedades complementares para o aproveitamento energético. Enquanto o caroço de açaí mostrou maior aptidão para processos que requerem elevada reatividade térmica, a casca de castanha-do-brasil destacou-se por atributos favoráveis à combustão prolongada e à

produção de combustíveis sólidos. Esses resultados ampliam o conhecimento sobre a valorização de resíduos agroextrativistas amazônicos e fornecem subsídios para sua aplicação em diferentes rotas de conversão termoquímica.

5. Agradecimentos

Os autores agradecem à Universidade Federal do Acre (UFAC), à Fundação de Tecnologia do Estado do Acre (FUNTAC), aos professores e à técnica de laboratório Suelen Borges pelo apoio institucional, científico e técnico prestado durante a realização desta pesquisa.

6. Referências bibliográficas

Brand, M. A. (2010). *Energia de biomassa florestal*. Interciência.

Bufalino, L., Guimarães, A. A., Silva e Silva, B. M. da, Souza, R. L. F. de, Melo, I. C. N. A. de, Oliveira, D. N. P. S. de, & Trugilho, P. F. (2018). Local variability of yield and physical properties of açaí waste and improvement of its energetic attributes by separation of lignocellulosic fibers and seeds. *Journal of Renewable and Sustainable Energy, 10*(5), 053102. https://doi.org/10.1063/1.5027232

Isikgor, F. H., & Becer, C. R. (2015). Lignocellulosic biomass: A sustainable platform for the production of bio-based chemicals and polymers. *Polymer Chemistry, 6*(25), 4497–4559. https://doi.org/10.1039/C5PY00263J

Leandro, R. I. M., da Costa Abreu, J. J., da Silva Martins, C., Santos, I. S., Bianchi, M. L., & Nobre, J. R. C. (2019). Elementary, chemical and energy characteristics of Brazil nuts waste (*Bertholletia excelsa*) in the state of Pará. *Floresta e Ambiente, 26*, e20180436. https://doi.org/10.1590/2179-8087.043618

Nagaishi, T. Y. R., Dionisio, L. F. S., Numazawa, S., Kato, O. R., Sena, E. D., Shimizu, M. K., Oliveira, P. R. S. de, & Bronze, A. B. da S. (2020). Potencial e características energéticas da biomassa de capoeira triturada na Amazônia Oriental. *Brazilian Journal of Development, 6*(9), 65509–65529. https://doi.org/10.34117/bjdv6n9-108

Prado, R. M. L., Surculento Villalobos, R., Lopez, L., & Kusar, H. (2025). Pyrolysis of açaí stems (*Euterpe oleracea*) and cocoa husks (*Theobroma cacao*) residues for the generation of added-value products in rural areas. *Biomass Conversion and Biorefinery, 15*(11), 16793–16804. https://doi.org/10.1007/s13399-024-06325-3

Reis, J. S., Araujo, R. O., Lima, V. M. R., Queiroz, L. S., da Costa, C. E. F., Pardauil, J. J. R., Chaar, J. S., Rocha Filho, G. N., & de Souza, L. K. C. (2019). Combustion properties of potential Amazon biomass waste for use as fuel. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 138*. https://doi.org/10.1007/s10973-019-08457-5

Santos, V. O., Queiroz, L. S., Araujo, R. O., Ribeiro, F. C. P., Guimarães, M. N., da Costa, C. E. F., Chaar, J. S., & de Souza, L. K. C. (2020). Pyrolysis of açaí seed biomass: Kinetics and thermodynamic parameters using thermogravimetric analysis. *Bioresource Technology Reports, 12*, 100553. https://doi.org/10.1016/j.biteb.2020.100553

Silva, A. R., et al. (2020). A utilização do caroço do açaí como fonte orgânica de energia. *Revista Ensino, Saúde e Biotecnologia da Amazônia, 2*(1), 44–52.
Silva, T. F. (2021). *Caroço de açaí: Uma alternativa bioenergética* (Dissertação de mestrado). Universidade de Brasília.

Souza, C. D. R., & Silva, K. C. (2021). Energy potential of waste from Brazil nut (*Bertholletia excelsa* H.B.K.) for production of activated carbon. *Research, Society and Development, 10*(2), e53310212698. https://doi.org/10.33448/rsd-v10i2.12698

Yaashikaa, P. R., Kumar, P. S., & Varjani, S. (2022). Valorization of agro-industrial wastes for biorefinery process and circular bioeconomy: A critical review. *Bioresource Technology, 343*, 126126. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.126126

Yang, X., et al. (2024). A review on renewable energy: Conversion and utilization of biomass. *Smart Molecules*. https://doi.org/10.1002/smo.20240019

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Caracterização química e potencial energético do resíduo de cacau (*Theobroma cacao* L.)

Pedro Henrique Elias da Silva[1]; Raquel Júlia Cipriano dos Santos[1]; Carlos Henrique Reis dos Santos Silva[1]; Eric Rodrigues de Araujo[1]; Lara Luisa Mendes Nascimento[1]; Lucas José de Oliveira Valente[1]; Maria Eduarda Grigolate Campos[1]; João Gilberto Meza Ucella-Filho[2]

[1] Departamento de Engenharia Florestal, Universidade Federal de Viçosa - UFV

Resumo: A demanda por fontes energéticas sustentáveis impulsiona o aproveitamento de biomassas agroindustriais para geração de bioenergia. Nesse contexto, este trabalho teve como objetivo avaliar o potencial energético da casca de cacau (*Theobroma cacao* L.) Os resíduos foram coletados no município de São Geraldo-MG e caracterizados quanto aos teores de materiais voláteis, cinzas, carbono fixo, composição elementar (CHONS) e relações atômicas H/C e O/C. A casca de cacau apresentou PCS de 17,36 MJ kg^{-1}, além de teores de materiais voláteis e carbono fixo compatíveis com biomassas destinadas à combustão direta e baixos teores de nitrogênio e enxofre, como o bagaço de cana e o eucalipto. Embora o teor de cinzas tenha sido relativamente elevado, esse resultado não comprometeu o potencial energético da biomassa. As relações H/C e O/C apresentaram valores característicos de biomassas lignocelulósicas. Conclui-se que a casca de cacau apresenta potencial para utilização como combustível sólido, constituindo uma alternativa promissora para a valorização energética desse resíduo agroindustrial.

Palavras-chave: Bioenergia; Caracterização físico-química; Biomassa.

Chemical Characterization and Energy Potential of Cocoa Pod Husk (*Theobroma cacao* L.)

Abstract: The growing demand for sustainable energy sources has increased the use of agro-industrial biomass for bioenergy production. This study evaluated the energy potential of cocoa husk (*Theobroma cacao* L.) through higher heating value (HHV), proximate analysis, and elemental composition. Biomass residues collected in São Geraldo, Minas Gerais, Brazil, were characterized for volatile matter, ash, fixed carbon, CHNS composition, and H/C and O/C atomic ratios. Cocoa husk showed an HHV of 17.36. MJ kg^{-1}, volatile matter and fixed carbon contents suitable for direct combustion, and low nitrogen and sulfur contents. Although the ash content was relatively high, it did not compromise the biomass energy potential. The H/C and O/C ratios were typical of lignocellulosic biomass. Overall, cocoa husk showed promising potential as a solid biofuel for the energy valorization of this agro-industrial residue.

Keywords: Bioenergy; Characterization; biomass.

1. Introdução

As mudanças climáticas e a necessidade de reduzir as emissões de gases de efeito estufa têm impulsionado a transição para matrizes energéticas mais sustentáveis. Nesse contexto, a Conferência das Partes (COP), realizada no Brasil em 2025, reforçou a importância da descarbonização da matriz energética e da ampliação do uso de fontes renováveis. Embora os avanços globais em tecnologias, a matriz energética mundial permanece dependente de recursos não renováveis e os combustíveis fósseis ainda sustentam a base global, correspondendo cerca de mais de 80% do suprimento global de energia (Krexner *et.al*., 2024). O acentuado uso dessas fontes energéticas não renováveis contribuem significativamente para as emissões de gases de efeito estufa (GEEs), como dióxidos de carbono (CO2) e monóxidos de carbono (CO) que são emitidos para a atmosfera, intensificando as mudanças climáticas (Salcedo-Porto *et.al*., 2025). Diante desse cenário, torna-se importante ampliar a participação de fontes energéticas sustentáveis, em consonância com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS).

A bioenergia, caracteriza-se como uma fonte renovável obtida a partir de biomassas diversas, capaz de ser convertida em calor, eletricidade ou combustíveis, se tornando atrativa nos dias atuais devido ao seu forte potencial de mitigar as mudanças climáticas (Calvin *et al*., 2021). Nesse contexto, a valorização de resíduos agroindustriais e florestais é uma alternativa importante para a descarbonização no setor, contribuindo para a redução das emissões de gases de efeito estufa e para a mitigação das mudanças climáticas (Murdiyati *et al*., 2026). Entre essas biomassas, destaca-se o cacau (*Theobroma cacao* L.), cultura de grande relevância econômica e social para regiões tropicais, o cacaueiro gera grandes volumes de resíduos durante o processamento dos frutos, principalmente a casca, biomassa com potencial de aproveitamento em diferentes aplicações, como a bioenergia.

O Brasil possui grande relevância na cadeia produtiva do cacau (*Theobroma cacao* L.), sendo o sexto maior produtor mundial, com produção estimada em 284 mil toneladas em 2024 (IBGE, 2024; ICCO, 2025). Entretanto, cerca de 80% da massa do fruto corresponde a resíduos, principalmente a casca (Meza-Sepúlveda *et al*., 2025), sendo geradas entre 8 e 10 toneladas desse material para cada tonelada de amêndoas secas produzidas (Campos-Vega, 2018). O descarte inadequado dessa biomassa pode causar impactos ambientais, como a contaminação do solo e de corpos hídricos (Hougni *et al*., 2021), além de favorecer a emissão de gases de efeito estufa, principalmente metano (CH_4) e dióxido de carbono (CO_2), durante a decomposição da matéria orgânica (Morgado-León *et al*., 2025).

Paralelo a isso, o aproveitamento energético da casca de cacau por combustão direta apresenta-se como uma alternativa para agregar valor à cadeia produtiva, transformando um

resíduo de baixa utilização em uma fonte renovável de energia com potencial de aplicação em propriedades rurais e indústrias de beneficiamento. Além de contribuir para a redução do passivo ambiental associado ao descarte desse material, essa estratégia pode diminuir a dependência de combustíveis fósseis e promover maior eficiência no uso dos recursos, em consonância com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável, especialmente ODS 7 (Energia Limpa e Acessível), ODS 9 (Indústria, Inovação e Infraestrutura), ODS 12 (Consumo e Produção Responsáveis) e ODS 13 (Ação Contra a Mudança Global do Clima).

Nesse contexto, este trabalho teve como objetivo investigar o potencial de aproveitamento da biomassa residual da casca de cacau como combustível sólido em sistemas de combustão direta, com base em sua caracterização.

2. Material e métodos

2.1 Obtenção e processamento da biomassa

O experimento foi conduzido no Laboratório de Painéis e Energia da Madeira (LAPEM) do Departamento de Engenharia Florestal da Universidade Federal de Viçosa (DEF/UFV). Os resíduos de *Theobroma cacao* L. foram coletados no município de São Geraldo, Minas Gerais, e transportados ao laboratório. Inicialmente, o material passou por pré-secagem natural ao ar livre por 3 dias, seguida de secagem complementar em estufa a 50 °C para a estabilização e posterior caracterização da biomassa.

2.2 Composição química imediata

A composição química imediata da biomassa, correspondente aos teores de materiais voláteis, cinzas e carbono fixo, foi determinada com base nas normas ASTM E872-82 (ASTM, 2019) e ASTM D1762-84 (ASTM, 2021), sendo o teor de carbono fixo calculado por diferença.

2.3 Determinação do poder calorífico

O poder calorífico superior foi obtido por meio de uma bomba calorimétrica do modelo IKA 300, em conformidade com os critérios técnicos definidos pela norma ASTM D5865-19 (ASTM, 2019).

2.4 Determinação da química elementar

A composição química elementar foi realizada utilizando o equipamento Vario Micro Cube CHNS, Elementar®. A partir da combustão ocorrida no interior do aparelho, sob temperaturas que atingem até 1.200°C, ocorrem reações químicas das quais resultam a formação dos gases que foram conduzidos aos tubos redutores presentes em um compartimento específico. Em seguida, os elementos químicos foram individualizados numa sequência induzida de acordo com a massa molecular de cada um deles e quantificados a partir de um *software*. Os teores de carbono, nitrogênio e hidrogênio elementar foram determinados conforme o método ISO 16948 (2015). O teor de enxofre a partir da norma ISO 16994 (2016). O teor de oxigênio foi obtido pela soma dos teores de carbono, nitrogênio, hidrogênio, enxofre e cinzas, subtraído de 100.

2.5 Análise de dados

Com base na composição elementar, foram calculadas as razões atômicas H/C e O/C, utilizadas como indicadores da qualidade energética da biomassa. O experimento foi conduzido em delineamento inteiramente casualizado, sendo realizadas repetições para cada análise, e os resultados foram organizados e analisados no Microsoft Excel®.

3. Resultados e discussão

Os resultados da caracterização energética da casca de cacau, compreendendo o poder calorífico superior (PCS) e a análise química imediata, estão apresentados na Tabela 1. Esses parâmetros são amplamente utilizados para avaliar o potencial de biomassas destinadas à geração de energia por combustão direta.

Tabela 1 – Poder calorífico superior (PCS) e análise química imediata da biomassa residual da casca de cacau (*Theobroma cacao* L.), expressos em média ± desvio padrão

Parâmetro	Valor (média ± DP)
Poder Calorífico Superior (MJ kg^{-1})	**17,36 ± 0,03**
Materiais voláteis (%)	**68,96 ± 0,85**
Cinzas (%)	**8,79 ± 0,25**
Carbono fixo (%)	**22,26 ± 0,68**

O poder calorífico superior, que expressa a quantidade de energia em forma de calor liberada durante a combustão da biomassa, foi de 17,36 MJ kg^{-1}, evidenciando seu potencial para aplicação em processos de combustão direta. Esse valor encontra-se dentro da faixa

normalmente reportada para biomassas lignocelulósicas e madeiras secas utilizadas para geração de energia, cujos valores variam, em geral, entre 17 e 21 MJ kg^{-1} (Esteves *et al*., 2023), demonstrando que a casca de cacau apresenta desempenho energético comparável ao de combustíveis sólidos amplamente empregados na produção de bioenergia. Além disso, o PCS é influenciado pela composição química da biomassa, sendo favorecido por maiores teores de carbono e hidrogênio, enquanto elevados teores de cinzas tendem a reduzir seu valor energético (Esteves *et al*., 2023). Considerando o teor de hidrogênio da biomassa e uma umidade de 3%, foram estimados valores de 16,19 MJ.kg^{-1} para o poder calorífico inferior (PCI) e de 15,63 MJ kg^{-1} para o poder calorífico útil (PCU). Esses resultados indicam que a casca de cacau mantém elevada disponibilidade energética mesmo quando consideradas as perdas associadas à vaporização da água formada durante a combustão e à umidade do combustível, reforçando seu potencial para aproveitamento energético.

Em relação aos materiais voláteis, a casca de cacau apresentou teor de 68,96%, parâmetro diretamente relacionado à facilidade de ignição e à rápida liberação de energia durante a combustão. Biomassas com elevados teores de materiais voláteis tendem a apresentar menor temperatura de ignição e maior velocidade de propagação da chama, favorecendo o início e a eficiência do processo de combustão. O valor obtido foi semelhante ao observado em outras culturas agrícolas, como o bagaço de cana. Já o teor de carbono fixo foi de 22,26%, valor superior ao registrado por Pérez *et al*., (2025). Esse parâmetro corresponde à fração sólida remanescente após a liberação dos materiais voláteis e está diretamente relacionado à manutenção da combustão, influenciando o tempo de residência do combustível na fornalha e a liberação gradual de calor. Dessa forma, a combinação entre elevado teor de materiais voláteis e adequado teor de carbono fixo favorece tanto a ignição quanto a sustentação da combustão, evidenciando o potencial da casca de cacau para geração de energia por combustão direta (Mendoza-Meneses, *et al*., 2021).

O teor de cinzas da casca de cacau foi de 8,79%, parâmetro importante na avaliação de combustíveis sólidos por representar a fração inorgânica remanescente após a combustão. Elevados teores de cinzas podem reduzir o poder calorífico da biomassa, além de favorecer a formação de incrustações, escórias e depósitos nos equipamentos, comprometendo a eficiência operacional e aumentando os custos de manutenção (Carvalho *et al*., 2021). Apesar dessa limitação, o valor obtido foi semelhante ao reportado para outras biomassas agrícolas, como a casca de café (Cangussu *et al*., 2021), indicando que a casca de cacau apresenta comportamento compatível com resíduos já empregados para fins energéticos. Além disso, estudos recentes têm

destacado o potencial da casca de cacau como matéria-prima para geração de bioenergia, em função de sua disponibilidade, composição lignocelulósica e possibilidade de aproveitamento nas próprias unidades de processamento, agregando valor à cadeia produtiva e reduzindo impactos ambientais associados ao descarte do resíduo (Mendoza-Meneses, *et al*., 2021).

A composição química elementar da casca de cacau, bem como as relações atômicas H/C e O/C, encontram-se apresentadas na Tabela 2. Esses parâmetros são amplamente utilizados para avaliar o comportamento termoquímico e o potencial energético de biomassas destinadas à geração de energia.

Tabela 2 – Composição química elementar (C, H, N, S e O) e relações atômicas (H/C e O/C) da biomassa residual da casca de cacau (*Theobroma cacao* L.), expressas em média ± desvio padrão

Elemento	Valor (média ± DP)
Carbono (%)	42,28 ± 0,06
Hidrogênio (%)	5,34 ± 0,28
Nitrogênio (%)	1,07 ± 0,04
Enxofre (%)	0,06 ± 0,01
Oxigênio (%)	42,48 ± 0,18
Relação H/C	1,50 ± 0,08
Relação O/C	0,75 ± 0,01

A análise elementar (CHONS) constitui uma importante ferramenta para a avaliação do potencial energético de biomassas, uma vez que sua composição química influencia diretamente o comportamento durante os processos termoquímicos. Segundo Esteves *et al*., 2023. No presente estudo, a casca de cacau apresentou teores de 42,28% de carbono e 5,34% de hidrogênio, elementos diretamente relacionados à liberação de energia durante a combustão e, consequentemente, ao aumento do poder calorífico da biomassa. Em contrapartida, elevados teores de oxigênio tendem a reduzir o conteúdo energético do combustível (Esteves *et al*., 2023). Os baixos teores de nitrogênio (1,07%) e enxofre (0,06%) também representam uma vantagem ambiental, pois reduzem o potencial de formação de óxidos de nitrogênio (NO_x) e enxofre (SO_x), gases associados à poluição atmosférica, à chuva ácida e à corrosão de equipamentos durante a combustão (United States Environmental Protection Agency – EPA, 2025).

As razões H/C e O/C são importantes indicadores da qualidade energética da biomassa. O resultado de H/C para a casca de cacau teve resultado de 1,50, indicando uma composição

química compatível com materiais destinados à conversão termoquímica. De modo geral, menores valores de H/C estão associados a maior grau de carbonização e maior estabilidade química do combustível. Por sua vez, os valores obtidos de O/C foi de 0,75, indicando a presença de oxigênio na estrutura da biomassa, que é uma característica que reduz a densidade energética quando comparada à combustíveis fósseis, uma vez que maiores teores de oxigênio tendem a reduzir o poder calorífico. Em conjunto, os resultados das razões discutidas, sugerem que a casca de cacau possui a composição elementar característica de biomassas lignocelulósicas, corroborando com seu potencial para aplicações energéticas em processos de combustão direta.

4. Conclusões

Os resultados da caracterização energética da casca de cacau demonstraram que essa biomassa apresenta propriedades favoráveis para o aproveitamento energético por combustão direta. O poder calorífico, associado aos teores de materiais voláteis, carbono fixo e à composição elementar, evidenciou características compatíveis com biomassas lignocelulósicas utilizadas como combustíveis sólidos. Embora o teor de cinzas represente uma limitação operacional, os resultados obtidos não comprometem seu potencial para geração de bioenergia. Dessa forma, conclui-se que a casca de cacau constitui uma alternativa promissora para a valorização energética de um resíduo agroindustrial, agregando valor à cadeia produtiva do cacau e contribuindo para o uso sustentável da biomassa como fonte renovável de energia.

5. Agradecimentos

Ao Departamento de Engenharia Florestal (DEF), ao Laboratório de Painéis e Energia da Madeira (LAPEM), ao Laboratório de Resíduos da Indústria Florestal (LABRIF), à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES), à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG – Projetos APQ-05311-24 e APQ-04599-25) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq – Processo nº 444395/2024-5).

6. Referências bibliográficas

American Society for Testing and Materials. (2019). *Standard test method for volatile matter in the analysis of particulate wood fuels* (ASTM E872-82). ASTM International.

American Society for Testing and Materials. (2021). *Standard test method for chemical analysis of wood charcoal* (ASTM D1762-84). ASTM International.

ASTM International. (2019). *Standard test method for gross calorific value of coal and coke* (ASTM D5865-19). https://doi.org/10.1520/D5865-19

Calvin, K., Cowie, A., Berndes, G., Arneth, A., Cherubini, F., Portugal-Pereira, J., Grassi, G., House, J., Johnson, F. X., Popp, A., Rounsevell, M., Slade, R., & Smith, P. (2021). Bioenergy for climate change mitigation: Scale and sustainability. *GCB Bioenergy*, *13*(9), 1346–1371. https://doi.org/10.1111/gcbb.12863

Campos-Vega, R., Nieto-Figueroa, K. H., & Oomah, B. D. (2018). Cocoa (Theobroma cacao L.) pod husk: Renewable source of bioactive compounds. *Trends in Food Science & Technology*, *81*, 172–184. https://doi.org/10.1016/j.tifs.2018.09.022

Cangussu, L. B., Melo, J. C., Franca, A. S., & Oliveira, L. S. (2021). Caracterização química de cascas de café, um subproduto da produção de Coffea arabica. *Foods*, *10*(12), Artigo 3125. https://doi.org/10.3390/foods10123125

Carvalho, N. R., Barros, J. L., Silva, D. A., Nakashima, G. T., & Yamaji, F. M. (2021). Caracterização física e química da biomassa usada como combustível sólido em uma caldeira. *Química Nova*, *44*(1), 35–40. https://doi.org/10.21577/0100-4042.20170663

Esteves, B., Sen, U., & Pereira, H. (2023). Influência da composição química no poder calorífico da biomassa: Uma revisão e análise bibliométrica. *Energies*, *16*(10), Artigo 4226. https://doi.org/10.3390/en16104226

Hao, H., Dai, L., Wang, K., Xu, J., & Liu, W. (2021). An updated framework for climate change impact assessment of bioenergy and an application in poplar biomass. *Applied Energy*, *299*, Artigo 117323.

Hougni, D.-G. J. M., Schut, A. G. T., Woittiez, L. S., Vanlauwe, B., & Giller, K. E. (2021). How nutrient rich are decaying cocoa pod husks? The kinetics of nutrient leaching. *Plant and Soil*, *463*(1–2), 155–170. https://doi.org/10.1007/s11104-021-04885-1
Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. (2024). *Produção de cacau no Brasil é estimada em 287,8 mil toneladas em 2024*. https://www.ibge.gov.br

International Cocoa Organization. (2025). *Quarterly bulletin of cocoa statistics: Production* (Vol. 51, No. 2). ICCO. https://www.icco.org/wp-content/uploads/Production_QBCS-LI-No.-2.pdf

International Organization for Standardization. (2015). *Solid biofuels — Determination of total content of carbon, hydrogen and nitrogen* (ISO 16948:2015). ISO.

International Organization for Standardization. (2016). *Solid biofuels — Determination of total content of sulfur and chlorine* (ISO 16994:2016). ISO.

Krexner, T., Bauer, A., Gronauer, A., Mikovits, C., Schmidt, J., & Kral, I. (2024). Environmental life cycle assessment of a stilted and vertical bifacial crop-based agrivoltaic multi land-use system and comparison with a mono land-use of agricultural land. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *196*, Artigo 114321. https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.114321

Mendoza-Meneses, C. J., Feregrino-Pérez, A. A., & Gutiérrez-Antonio, C. (2021). Uso potencial de resíduos industriais de cacau na produção de biocombustíveis. *Journal of Chemistry*, *2021*, Artigo 3388067. https://doi.org/10.1155/2021/3388067

Meza-Sepúlveda, D. C., Hernandez-Urrea, C., Sanchez Rivera, J. P., & Agudelo Serna, L. D. (2025). Biocomposite film formulated with cellulose extracted from cocoa pod husk. *Cellulose*, *32*, 7591–7602. https://doi.org/10.1007/s10570-025-06642-4

Morgado-León, F. J., González-Martínez, S., & Jojoa-Unigarro, G. D. (2025). Methane production from previously fermented cacao waste pod husks. *Waste and Biomass Valorization*, *55*(13), 8922–8936. https://doi.org/10.1007/s12649-025-03115-4

Murdiyati, S., Herat, S., Purwanto, W. W., & Kaparaju, P. (2026). Bioenergy potential for heat and power generation in Indonesia based on biomass resources assessment: Analysis up to 2060. *Biomass and Bioenergy*, *214*, Artigo 109447. https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2026.109447

Obernberger, I., Brunner, T., & Bärnthaler, G. (2006). Propriedades químicas de biocombustíveis sólidos: Significado e impacto. *Biomass and Bioenergy*, *30*(11), 973–982. https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2006.06.011

Organização das Nações Unidas. (2015). *Transformando nosso mundo: A Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável* (A/RES/70/1). https://brasil.un.org/sites/default/files/2020-09/agenda2030-pt-br.pdf

Pérez, N. P., Travieso, J. A. R., Shelton, E. D., Pedroso, D. T., Machin, E. B., Tuna, C. E., & Silveira, J. L. (2025). Desvendando o potencial do bagaço de cana-de-açúcar: Uma análise abrangente para conversão avançada de energia. *Bioresources and Bioprocessing*, *12*(1), Artigo 60. https://doi.org/10.1186/s40643-025-00878-5

Salcedo-Puerto, O., Mendoza-Martinez, C., & Vakkilainen, E. (2025). Resíduos sólidos da cadeia de produção de cacau: Avaliação de rotas de valorização termoquímica. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *208*, Artigo 115048. https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.115048

United Nations Framework Convention on Climate Change. (2025). *UN Climate Change Conference – Belém, November 2025 (COP30)*. https://unfccc.int/cop30

Vassilev, S. V., Baxter, D., Andersen, L. K., & Vassileva, C. G. (2010). Uma visão geral da composição química da biomassa. *Fuel*, *89*(5), 913–933. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2009.10.022

Caracterização Tecnológica de Briquetes de Madeira Residual Aplicados à Defumação de Alimentos

Bruna da Silva Cruz[1]; Fabiola Martins Delatorre[1]; Iara Nobre Carmona[1]; Sabrina Soares da Silva[1] Allana Katiussya Silva Pereira[2]; Kamilla Crysllayne Alves da Silva[3]; Gabriela Aguiar Amorim[3]; Ananias Francisco Dias Júnior[1]

[1] Universidade Federal do Espírito Santo (UFES), Departamento de Ciências Florestais e da Madeira, CEP 29550-000, Jerônimo Monteiro, Espírito Santo, Brasil.

[2] Universidade Federal do Recôncavo da Bahia (UFRB), Centro de Ciências Agrárias, Ambientais e Biológicas (CCAAB), CEP 44.380-000,Cruz das Almas, Bahia, Brasil.

[3] Universidade de São Paulo (USP), Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, CEP 13418-900, Piracicaba, São Paulo, Brasil.

Resumo: A crescente geração de resíduos lignocelulósicos provenientes de atividades florestais e de pomares frutíferos tem impulsionado a busca por alternativas sustentáveis para seu aproveitamento energético. Nesse contexto, este estudo teve como objetivo produzir e caracterizar briquetes elaborados a partir de resíduos madeireiros de *Psidium guajava*, *Citrus sinensis* e *Eucalyptus* spp., visando sua aplicação potencial no processo de defumação de alimentos. Os briquetes foram produzidos sob condições controladas de pressão e temperatura e avaliados quanto às propriedades físicas, mecânicas, químicas e energéticas. Foram determinadas a densidade aparente, química estrutura, química imediata e densidade energética. Os resultados demonstraram diferenças significativas entre os materiais avaliados. Os briquetes de *Citrus sinensis* apresentaram os maiores valores de densidade aparente, taxa de compactação e densidade energética, além da menor expansão volumétrica. Os briquetes de *Psidium guajava* destacaram-se pela elevada resistência mecânica e maior teor de carbono fixo. Já os briquetes de *Eucalyptus* spp. apresentaram os maiores teores de materiais voláteis e poder calorífico. De modo geral, os resíduos avaliados mostraram potencial para a produção de briquetes com características adequadas para aplicações energéticas, constituindo uma alternativa sustentável para a valorização de resíduos agroflorestais e para o desenvolvimento de biocombustíveis sólidos destinados à defumação de alimentos.

Palavras-chave: Resíduos Agroindustriais; Valorização Energética; Economia Circular.

Technological Characterization of Wood Residue Briquettes for Food Smoking

Abstract: The growing generation of lignocellulosic waste from forestry activities and fruit orchards has driven the search for sustainable alternatives for its energy use. In this context, this study aimed to produce and characterize briquettes made from wood residues of Psidium guajava, Citrus sinensis, and Eucalyptus spp., with a view to their potential use in the food smoking process. The briquettes were produced under controlled pressure and temperature conditions and evaluated for physical, mechanical, chemical, and energetic properties. Apparent density, structural chemistry, proximate chemistry, and energy density were determined. The results showed significant differences among the evaluated materials. Citrus sinensis briquettes showed the highest apparent density, compaction rate, and energy density, as well as the lowest volumetric expansion. The Psidium guajava briquettes stood out for their high mechanical strength and higher fixed carbon content. On the other hand, the Eucalyptus spp. briquettes showed the highest levels of volatile materials and calorific value. Overall, the residues evaluated showed potential for producing briquettes with suitable characteristics for energy applications, providing a sustainable alternative for the use of agroforestry residues and for the development of solid biofuels intended for food smoking.

Keywords: Agroindustrial Waste; Energy Recovery; Circular Economy

1. Introdução

A crescente demanda mundial por energia, associada à necessidade de reduzir os impactos ambientais decorrentes do uso de combustíveis fósseis, tem impulsionado a busca por fontes energéticas renováveis e sustentáveis (Majeed et al., 2026). Nesse contexto, a biomassa destaca-se por sua ampla disponibilidade, caráter renovável e potencial para contribuir com a redução das emissões de gases de efeito estufa quando manejada adequadamente (Espinoza-Tellez et al., 2020). Entre as alternativas disponíveis, o aproveitamento de resíduos provenientes das atividades florestais e da fruticultura representa uma estratégia eficiente para agregar valor a materiais frequentemente descartados ou subutilizados.

Durante as etapas de produção, colheita, transporte e processamento da madeira, bem como nas atividades de manejo e renovação de pomares, são geradas grandes quantidades de resíduos lignocelulósicos (Mujtaba et al., 2023). Esses materiais incluem galhos, ramos, cascas, serragem e aparas no setor florestal, além de resíduos lenhosos oriundos da poda e

renovação de pomares na fruticultura (Udali et al., 2025; Zhu et al., 2023). A valorização desses resíduos por meio da densificação apresenta-se como uma alternativa ambientalmente adequada, permitindo sua conversão em biocombustíveis sólidos com maior valor agregado

Entre as tecnologias de densificação, a briquetagem destaca-se pela capacidade de transformar biomassa particulada em combustíveis sólidos de elevada densidade, resistência mecânica e potencial energético (Wu et al., 2025). O processo consiste na compactação da biomassa sob altas pressões, promovendo a união das partículas principalmente pela ação da lignina, que atua como aglomerante natural (Sanchez-Roque et al., 2025) Como resultado, os briquetes apresentam maior densidade energética, uniformidade dimensional, facilidade de armazenamento e transporte, além de combustão mais eficiente quando comparados à biomassa in natura (Walozi et al., 2026). A qualidade desses biocombustíveis é influenciada por características físicas, químicas e energéticas da matéria-prima, como teor de umidade, composição química, massa específica e poder calorífico, parâmetros considerados pela ISO 17225-7:2021 para classificação dos briquetes (ISSO,2021).

Diante desse cenário, a produção de briquetes a partir de resíduos madeireiros configura-se como uma alternativa promissora para o aproveitamento energético de biomassas lignocelulósicas, conciliando benefícios ambientais, econômicos e sociais Além do potencial para geração de energia renovável, determinadas espécies florestais e frutíferas podem apresentar características favoráveis para aplicação em processos de defumação de alimentos, devido à composição química da fumaça gerada durante a combustão. Assim, este estudo teve como objetivo produzir e caracterizar briquetes elaborados a partir de resíduos madeireiros de *Psidium guajava* L., *Citrus sinensis* (L.) e *Eucalyptus* spp., avaliando suas propriedades físicas, químicas, mecânicas e energéticas, visando sua aplicação potencial no processo de defumação de alimentos.

Material e métodos

Neste estudo foram investigados de resíduos de madeira das biomassas de laranja (*Citrus sinensis*), (*Psidium guajava*) e *Eucalyptus* spp. para a produção dos briquetes. Foram realizadas análises físicas, químicas e energéticas com estres briquetes (Figura 1).

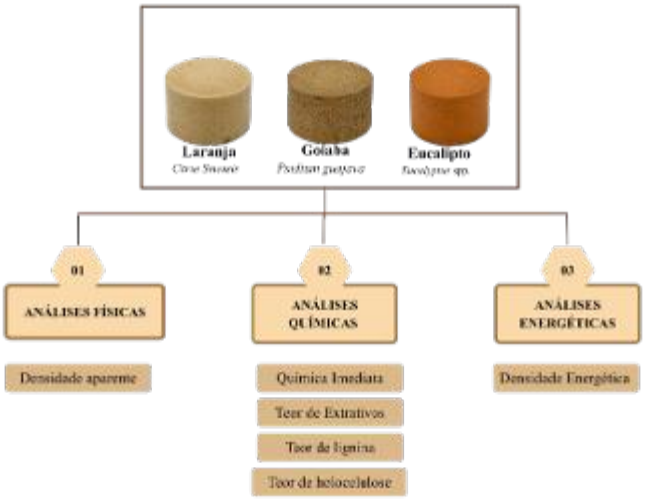


Figura 1 – Analises realizadas nos briquetes produzidos a partir das biomassas estudadas.

Os dados foram submetidos aos testes de normalidade (Shapiro-wilk) e de homoscedasticidade (Bartlett). Os resultados das análises das biomassas e resultados das análises dos briquetes (densidade energética, teor de materiais voláteis, teor de cinzas e teor de carbono fixo) foram realizadas apenas por estatística descritiva. A análise estatística das demais propriedades dos briquetes, dos ensaios físicos, químicos e térmicos dos briquetes foram analisados por meio de um delineamento inteiramente aleatorizado (DIA), considerando os tipos das biomassas lignocelulósicas estudadas, variáveis do processo de briquetagem e defumação. Para identificar diferenças significativas após o indicativo da análise de variância, foi aplicado o teste Tukey de comparação múltipla das médias. Os testes foram executados a 95% de probabilidade. Medidas de dispersão do erro padrão foram fornecidas para melhor entender o intervalo de confiança obtido para cada variável estudada. O software R Core Team foi utilizado para as análises citadas.

Tabela 1 – Médias das variáveis relacionadas aos resíduos de *Citrus sinensis*, *Psidium guajava*, *Eucalyptus* spp.

Parâmetros	DA	MV	CZ	EXT	LIG	HOLO	DE
MCS	1165.42 ± (61.50) b	80.76 ± (1.01) a	2.04 ± (0.43) b	9.53 ± (1.39) a	20.54 ± (1.91) b	69,93 ± (0.37) a	1.54 ± (0.09) a
MPG	1324.70 ± (28.93) a	76.20 ± (1.14) b	3.34 ± (0.07) a	9.57 ± (1.19) a	19.58 ± (3.90) b	67.51 ± (2.75) b	1.42 ± (0.03) b
EUC	844.58 ± (33.53) c	81.44 ± (0.59) a	0.22 ± (0.06) c	9.57 ± (0.19) a	31.64 ± (0.80) a	58.80 ± (0.98) c	1.03 ± (0.01) c

Médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Turkey ao nível de 5% de significância (p > 0,05). ( ): erro padrão. Fonte: autora (2026).

2. Resultados e discussão

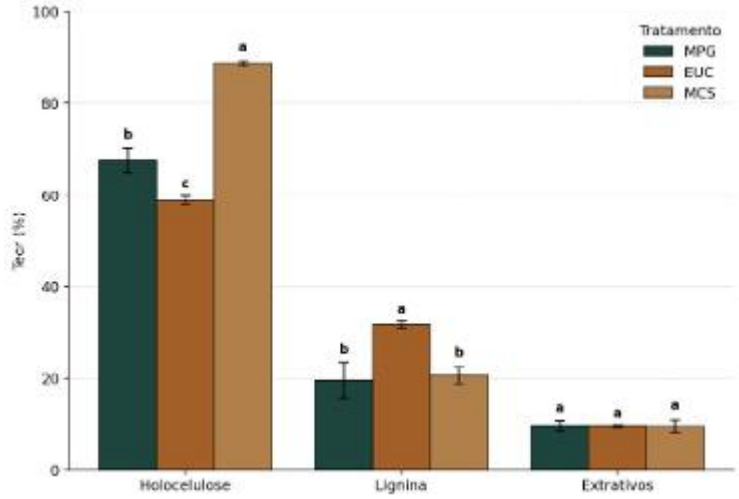


Figura 2 - Composição química estrutural dos briquetes produzidos a partir dos resíduos agroindustriais de *Citrus sinensis*, *Psidium guajava*, *Eucalyptus* spp., sendo que: MCS: *Citrus sinensis*; EUC: *Eucalyptus* spp., MPG: *Psidium guajava*.

A composição química estrutural das biomassas utilizadas na produção dos briquetes está apresentada na Figura 2. Observa-se que os resíduos de *Eucalyptus* spp. apresentaram o maior teor de lignina (31,64%), diferindo estatisticamente das demais espécies, enquanto *Citrus sinensis* e *Psidium guajava* apresentaram teores inferiores e estatisticamente semelhantes. Para os extrativos, não foram observadas diferenças significativas entre os materiais avaliados, com valores próximos a 9–10% (Faruk; Sain, 2016; Lu; Lu; Fan, 2020). A lignina é um polímero aromático altamente condensado que apresenta elevada estabilidade térmica, sendo responsável por prolongar a combustão e aumentar a resistência à degradação térmica da biomassa. Dessa forma, o maior teor de lignina observado nos resíduos de *Eucalyptus* spp. sugere potencial para uma combustão mais lenta e controlada, característica desejável para processos de defumação que exigem geração contínua de fumaça e calor. (Lu; Gu, 2022). Além da contribuição energética, a lignina exerce papel fundamental na formação dos compostos aromáticos liberados durante a combustão. Compostos derivados de sua degradação térmica, como fenóis, guaiacóis e siringóis, estão diretamente relacionados ao aroma, sabor e coloração dos alimentos defumados. (Snehanath et al., 2026; Xin et al., 2021). Dessa forma, biomassas com maiores

teores de lignina tendem a apresentar maior potencial para aplicações relacionadas à defumação.

Os teores de extrativos observados para as três biomassas indicam potencial para a geração de compostos voláteis responsáveis pelas características sensoriais da fumaça. No caso da laranjeira, a presença de compostos fenólicos, flavonoides e terpenos pode contribuir para perfis aromáticos diferenciados, agregando valor ao produto final. (Anticona et al., 2024). Assim, os resultados demonstram que as três espécies apresentam características químicas favoráveis para utilização na produção de briquetes destinados à defumação de alimentos. (Huynh et al., 2024).

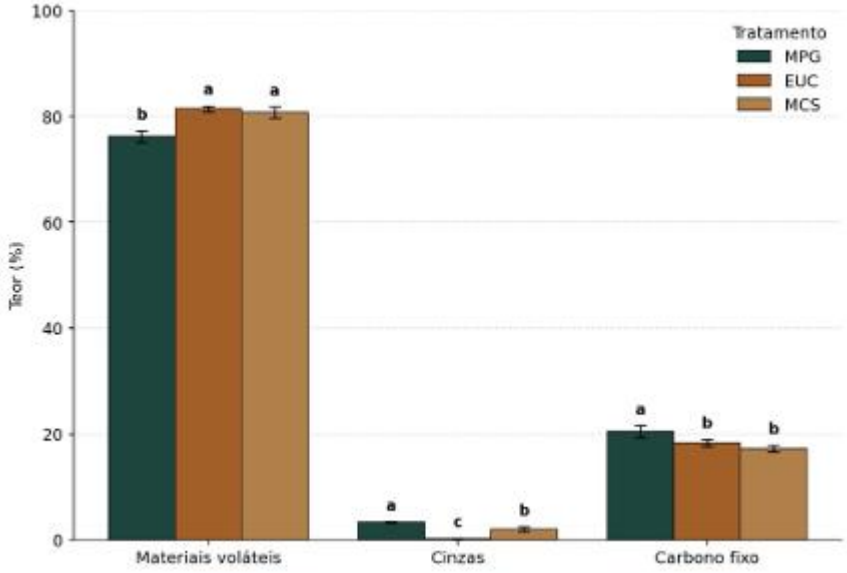


Figura 1 **–** Análise imediata dos briquetes produzidos a partir dos resíduos agroindustriais de *Citrus sinensis*, *Psidium guajava*, *Eucalyptus* spp., sendo. Em que: MCS: *Citrus sinensis*; EUC: *Eucalyptus* spp., MPG: *Psidium guajava*.

Os resultados da composição química imediata dos resíduos estudados estão apresentados na Figura 3. Os teores de materiais voláteis variaram entre 76,20% e 81,44%, sendo os maiores valores observados para *Eucalyptus* spp. e *Citrus sinensis*. Em contrapartida, *Psidium guajava* apresentou o menor teor de materiais voláteis e o maior teor de carbono fixo (20,46%). Os materiais voláteis desempenham papel fundamental durante a ignição e propagação da combustão, uma vez que são rapidamente liberados quando a biomassa é submetida ao aquecimento (Mencarelli et al., 2025). Estudos realizados por Marreiro et al, (2021) verificaram que biomassas lenhosas normalmente apresentam 76–86% de voláteis e que maiores teores aumentam a reatividade e a inflamabilidade do combustível. Assim, os maiores teores

observados para *Eucalyptus* spp. e *Citrus sinensis* indicam maior facilidade de ignição e maior produção de fumaça, fatores desejáveis para aplicações em defumação de alimentos (Lima et al., 2020). Por outro lado, o carbono fixo está associado à manutenção da combustão após a liberação dos compostos voláteis. essa forma, o elevado teor observado para *Psidium guajava* sugere maior capacidade de sustentar a geração de calor por períodos prolongados, contribuindo para maior estabilidade térmica durante o processo de queima.

Em relação ao teor de cinzas, *Psidium guajava* apresentou o maior valor (3,34%), enquanto *Eucalyptus* spp. apresentou o menor (0,22%). Teores elevados de cinzas podem representar limitações operacionais devido ao acúmulo de resíduos após a combustão e à necessidade de manutenção mais frequente dos equipamentos. (Martínez-García et al., 2022). Sob a perspectiva da classificação estabelecida pela ISO 17225-3, os resultados indicam que os briquetes produzidos a partir de *Eucalyptus* spp. apresentam maior potencial para enquadramento em categorias superiores de qualidade . De forma geral, os resultados da química imediata demonstram que as três biomassas apresentam características adequadas para produção de briquetes, embora com comportamentos distintos quanto à geração de fumaça, estabilidade de combustão e produção de resíduos.

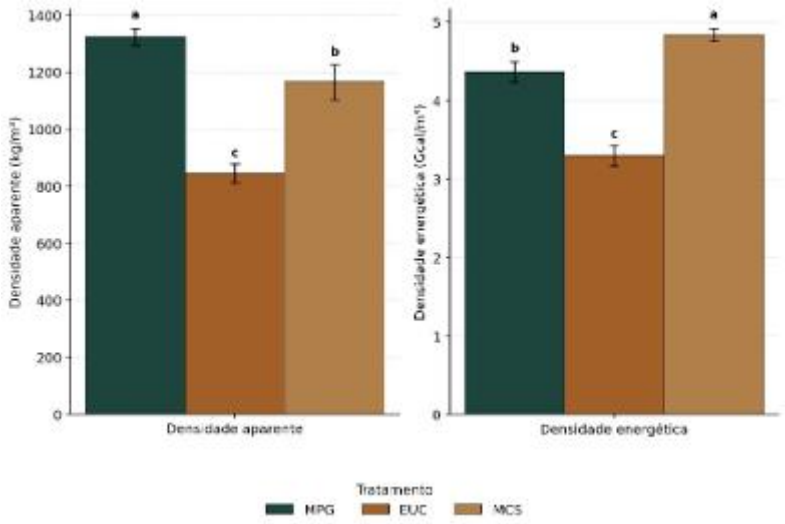


Figura *2* **-** Densidade aparente e densidade energética dos briquetes produzidos a partir dos resíduos agroindustriais de *Citrus sinensis*, *Psidium guajava*, *Eucalyptus* spp., Em que: MCS: *Citrus sinensis*; EUC: *Eucalyptus* spp., MPG: *Psidium guajava*.

Os resultados de densidade energética estão apresentados na Figura 4. Observou-se diferença significativa entre os tratamentos, sendo os maiores valores registrados para os briquetes produzidos a partir de *Citrus sinensis*, seguidos por *Psidium guajava* e *Eucalyptus* spp. O

desempenho superior dos briquetes de *Citrus sinensis* está relacionado à combinação entre elevada densidade aparente e adequado conteúdo energético da biomassa (Marreiro et al., 2021). Embora os briquetes produzidos com resíduos de *Psidium guajava* tenham apresentado maior densidade aparente, sua densidade energética foi inferior à observada para *Citrus sinensis*, evidenciando que o desempenho energético não depende exclusivamente da densidade física da biomassa, mas também de sua composição química e do conteúdo energético intrínseco do material. Além disso, Ivanova et al. (2018) destacam o potencial da madeira de goiabeira para a produção de briquetes, evidenciando sua aptidão como matéria-prima para biocombustíveis sólidos. Sob o ponto de vista tecnológico, os elevados valores de densidade energética observados para *Citrus sinensis* e *Psidium guajava* constituem características desejáveis para briquetes destinados à defumação, uma vez que favorecem maior autonomia operacional e fornecimento contínuo de energia durante a combustão (Eling et al., 2024).

Sob o ponto de vista tecnológico, a elevada densidade energética observada para MCS e MPG é uma característica desejável para briquetes destinados à defumação de alimentos, pois está associada à maior concentração de energia por unidade de volume e a melhores características de combustão. Biomassas densificadas com maior densidade energética tendem a apresentar maior eficiência durante o uso e melhor aproveitamento energético (Eling et al., 2024b). Além disso, o aproveitamento dos resíduos de laranjeira e goiabeira para essa finalidade representa uma alternativa sustentável de valorização de resíduos agroflorestais, sendo a goiabeira reconhecida como uma matéria-prima promissora para a produção de briquetes (Ivanova et al., 2018).

3. Conclusões

A avaliação conjunta das propriedades químicas, físicas, mecânicas e energéticas demonstra que as três biomassas estudadas apresentam potencial para utilização na produção de briquetes destinados à defumação de alimentos. Entretanto, cada espécie apresenta características específicas que podem influenciar seu desempenho durante o processo. Os resíduos *de Eucalyptus* spp. destacaram-se pelos elevados teores de lignina e materiais voláteis, indicando potencial para geração de fumaça e compostos aromáticos durante a combustão. Os briquetes produzidos com *Psidium guajava* apresentaram elevada, maior densidade aparente e maior teor de carbono fixo, características associadas à estabilidade da combustão e à durabilidade do combustível. Já *Citrus sinensis* apresentou o melhor desempenho energético e elevada estabilidade dimensional, evidenciando grande potencial para aplicações que demandam

combustão eficiente e geração contínua de energia. Dessa forma, os resultados obtidos indicam que as três biomassas constituem alternativas promissoras para produção de briquetes destinados à defumação de alimentos, contribuindo para a valorização energética de resíduos agroflorestais e para o desenvolvimento de biocombustíveis sólidos com potencial de aplicação industrial.

4. Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001)

5. Referências bibliográficas

Anticona, M., Lopez-Malo, D., Frigola, A., Blesa, J., & Esteve, M. J. (2024). Recovery of Phenolic Compounds from Citrus Peel Through Solid Phase Extraction and QuEChERS as Clean-up Methods. Natural Product Communications, 19(9). https://doi.org/10.1177/1934578X241280831

Eling, J., Okot, D. K., Menya, E., & Atim, M. R. (2024). Densification of raw and torrefied biomass: A review. *Biomass and Bioenergy*, 184, 107210. https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2024.107210

Espinoza-Tellez, T., Bastías, J., Quevedo-León, R., Valencia-Aguilar, E., Aburto, H., Díaz-Guineo, D., Ibarra-Garnica, M., & Díaz-Carrasco, O. (2020). Agricultural, forestry, textile and food waste used in the manufacture of biomass briquettes: a review. *Scientia Agropecuaria*, 11(3), 427–437. https://doi.org/10.17268/sci.agropecu.2020.03.15

Faruk, O., & Sain, M. (2016). *Lignocellulosic polymer composites: processing, characterization, and properties*. John Wiley & Sons. https://doi.org/10.1002/9781118871515

Huynh, T. N., Tran, T. T., & Le, V. V. M. (2024). Application of fruit tree residues for sustainable solid fuel production. *Industrial Crops and Products*, 210, 118120. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2024.118120

International Organization for Standardization. (2021a). *ISO 17225-3:2021: Solid biofuels — Fuel specifications and classes — Part 3: Graded wood briquettes*. https://www.iso.org/standard/74291.html

International Organization for Standardization. (2021b). *ISO 17225-7:2021: Solid biofuels — Fuel specifications and classes — Part 7: Graded non-woody briquettes*. https://www.iso.org/standard/74295.html

Ivanova, T., Mendoza Hernández, A. H., Bradna, J., Fernández Cusimamani, E., García Montoya, J. C., & Armas Espinel, D. A. (2018). Assessment of Guava (*Psidium Guajava* L.) Wood Biomass for Briquettes' Production. *Forests*, 9(10), 613. https://doi.org/10.3390/f9100613

Lima, M. D. R., Patrício, E. P. S., Junior, U. de O. B., Assis, M. R. de, Xavier, C. N., Bufalino, L., Trugilho, P. F., Hein, P. R. G., & Protásio, T. de P. (2020). Logging wastes from sustainable forest management as alternative fuels for thermochemical conversion systems in Brazilian Amazon. *Biomass and Bioenergy*, 140, 105660. https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2020.105660

Lu, F., & Gu, L. (2022). Thermal degradation kinetics and pyrolytic vapor products of lignin during thermal conversion. *Fuel*, 312, 122910. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.122910

Lu, H., Lu, Y., & Fan, Y. (2020). Characterization of chemical composition and thermal behavior of fruit tree wastes. *Bioresource Technology*, 302, 122850. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.122850

Majeed, M. T., Bolat, S., Inglesi-lotz, R., & Tiwari, A. K. (2026). The impact of biomass energy and information and communication technology on economic growth: a global panel data analysis. *Energy Sources, Part B: Economics, Planning, and Policy*, 21(1). https://doi.org/10.1080/15567249.2026.2671303

Marreiro, H. M. P., Peruchi, R. S., Lopes, R. M. B. P., Andersen, S. L. F., Eliziário, S. A., & Rotella Junior, P. (2021). Empirical Studies on Biomass Briquette Production: A Literature Review. *Energies*, 14(24), 8320. https://doi.org/10.3390/en14248320

Martínez-García, R., Jagadesh, P., Zaid, O., Şerbănoiu, A. A., Fraile-Fernández, F. J., de Prado-Gil, J., Qaidi, S. M. A., & Grădinaru, C. M. (2022). The Present State of the Use of Waste Wood Ash as an Eco-Efficient Construction Material: A Review. *Materials*, 15(15), 5349. https://doi.org/10.3390/ma15155349

Mencarelli, A., Greco, R., & Grigolato, S. (2025). Interactions between wood charcoal and meat types as determining factors of VOC and particle emissions. *Essoar*, 1-12. https://doi.org/10.22541/essoar.176409126.66982711/v1

Mujtaba, M., Fernandes Fraceto, L., Fazeli, M., Mukherjee, S., Savassa, S. M., Araujo de Medeiros, G., do Espírito Santo Pereira, A., Mancini, S. D., Lipponen, J., & Vilaplana, F. (2023). Lignocellulosic biomass from agricultural waste to the circular economy: a review with focus on biofuels, biocomposites and bioplastics. *Journal of Cleaner Production*, 402, 136815. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.136815

Sanchez-Roque, Y., Orantes-Flores, H. J., López-de-Paz, P., Pérez-Luna, Y. C., Canseco-Pérez, M. A., & Zenteno-Carballo, A. G. (2025). Biomass briquettes: Raw material, technologies and densification parameters, quality and future challenges. *Scientia Agropecuaria*, 16(2), 293–306. https://doi.org/10.17268/sci.agropecu.2025.024

Snehanath, K., Kumar, A., & Sharma, M. (2026). Flavor profile generation during thermal degradation of biomass in food smoking: A review. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 74(2), 890–905. https://doi.org/10.1021/acs.jafc.5b12040

Udali, A., Chung, W., Talbot, B., & Grigolato, S. (2025). Managing harvesting residues: a systematic review of management treatments around the world. *Forestry: An International Journal of Forest Research*, 98(2), 117–135. https://doi.org/10.1093/forestry/cpae041

Walozi, R., Onep, G. S., Sanusi, Y. S., Babiker, O. E., Dennison, M. S., Candia, A., & Okurut, S. (2026). Critical review of biomass heterogeneity effects on briquette combustion. *Discover Applied Sciences*, 8(3), 309. https://doi.org/10.1007/s42452-025-08212-6

Wu, M., Wei, K., Jiang, J., Xu, B. Bin, & Ge, S. (2025). Advancing green sustainability: A comprehensive review of biomass briquette integration for coal-based energy frameworks. *International Journal of Coal Science & Technology*, 12(1), 44. https://doi.org/10.1007/s40789-025-00779-0

Xin, C., Zhang, Y., & Liu, X. (2021). Phenolic compounds from biomass burning smoke: Formation mechanism and influence on smoked food quality. *Food Research International*, 148, 110600. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2021.110600

Zhu, Y., Luan, Y., Zhao, Y., Liu, J., Duan, Z., & Ruan, R. (2023). Current Technologies and Uses for Fruit and Vegetable Wastes in a Sustainable System: A Review. *Foods*, 12(10), 1949. https://doi.org/10.3390/foods12101949

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Carvão vegetal de espécies de *Myrcia* DC. provenientes de floresta secundária na Amazônia Oriental

Jonathan Dias Marques[1]; Angélica de Cássia Oliveira Carneiro[2]; Gustavo Batista Borges[1]; João Gilberto Meza Ucella Filho[2]; Fernanda de Jesus Jorge[2]; Amélia Guimarães Carvalho[3]; Elesandra da Silva Araujo[1]; Marcela Gomes da Silva[1]

[1] Universidade Federal Rural da Amazônia
[2] Universidade Federal de Viçosa
3 Universidade Federal de Uberlândia

Resumo: A busca por espécies nativas para plantios energéticos visando a produção de carvão vegetal representa uma alternativa para diversificar a base florestal destinada à bioenergia na Amazônia. Assim, este estudo teve como objetivo verificar o potencial de *Myrcia splendens* e *Myrcia eximia*, encontradas em florestas secundárias na Amazônia, como matéria-prima para a produção de carvão vegetal. Foram selecionadas cinco árvores de cada espécie, submetidas à carbonização em escala laboratorial, sendo avaliados o rendimento gravimétrico (RG), as densidades aparente (DA) e a granel (DAG), o teor de finos, a composição química imediata (materiais voláteis, teor de cinzas e carbono fixo) e o poder calorífico superior (PCS). Apenas a DA, DAG e o teor de cinzas (TCZ) diferiram entre as espécies, com maiores valores de densidade para *M. eximia* (DA = 0,529 g cm^{-3}, DAG = 0,344 g cm^{-3}) e maior TCZ (1,05%) para *M. splendens*. Ambas as espécies apresentaram características físicas e químicas compatíveis com os requisitos para uso siderúrgico e doméstico. Os resultados demonstram que *M. splendens* e *M. eximia* apresentam potencial para a produção de carvão vegetal, ampliando as possibilidades de aproveitamento energético de espécies nativas da Amazônia.
Palavras-chave: Bioenergia; Bioeconomia; Espécies nativas

Charcoal from *Myrcia* DC. species from a secondary forest in the Eastern Amazon

Abstract: The search for native species for energy plantations aimed at charcoal production represents an alternative for diversifying the forest base for bioenergy in the Amazon. Thus, this study aimed to assess the potential of *Myrcia* splendens and *Myrcia eximia*, found in secondary forests in the Amazon, as raw materials for charcoal production. Five trees of each species were selected and subjected to laboratory-scale carbonization, and gravimetric yield (RG), apparent density (DA), bulk density (DAG), fines content, proximate chemical composition (volatile matter, ash content, and fixed carbon), and higher heating value (PCS) were evaluated. Only DA, DAG, and ash content (TCZ) differed between species, with higher density values for *M. eximia* (DA = 0.529 g cm^{-3}, DAG = 0.344 g cm^{-3}) and higher TCZ (1.05%) for *M. splendens*. Both species exhibited physical and chemical characteristics compatible with the requirements for industrial and domestic use. The results demonstrate that *M. splendens* and *M. eximia* have potential for charcoal production, expanding the possibilities for the energetic utilization of native Amazonian species.
Keywords: Bioenergy; Bioeconomy; Native species

1. Introdução

Em 2024, as florestas plantadas no Brasil ocuparam uma área de 10,52 milhões de hectares, sendo aproximadamente 95,06% desse total ocupado por *Eucalyptus* e *Pinus* (Indústria Brasileira de Árvores, 2025). O *Eucalyptus* destaca-se como a principal matéria-prima para a produção de carvão vegetal, setor no qual o Brasil é líder mundial em produtividade (Barros et al., 2023; Pena-Vergara et al., 2022), com 6,6 milhões de toneladas produzidas em 2024, destinadas principalmente à produção de ferro-gusa e aço (IBÁ, 2025).

No entanto, os plantios concentram-se principalmente nas regiões Sudeste e Sul, sendo incipientes na Amazônia (IBÁ, 2024), o que é insuficiente para suprir a demanda energética da região de Carajás, responsável por 14,0% da produção brasileira de ferro-gusa (Sindicato da Indústria do Ferro no Estado de Minas Gerais, 2026). Além disso, a forte dependência de espécies exóticas, como o *Eucalyptus*, representa um desafio diante das mudanças climáticas, com projeções indicando que até 47% dos plantios poderão se tornar economicamente inviáveis no futuro (Florêncio et al., 2022).

Diante disso, estudos para avaliação do potencial energético de espécies nativas da Amazônia para plantios energéticos são importantes. A literatura relata o potencial de espécies da Amazônia como o *Tachigali vulgaris* (Silva et al., 2021) e *Schizolobium parahyba* var. *amazonicum* (Ucella-Filho et al., 2023). Porém, para outras espécies, como as do gênero *Myrcia*, os estudos ainda são incipientes para essa finalidade.

Na Amazônia ocorrem 112 espécies de *Myrcia* (Santos et al., 2026). Algumas espécies, como *M. splendens* e *M. eximia*, ocorrem em florestas secundárias, apresentam rápido crescimento e possuem diferentes formas de utilização, incluindo aplicações na medicina tradicional, na produção de alimentos, em pequenas construções e como fonte de lenha (Araujo et al., 2020). Entretanto, grande parte dessas aplicações utiliza-se do conhecimento tradicional das populações locais, havendo ainda escassez de estudos científicos que subsidiem seu potencial de uso em diferentes cadeias produtivas.

Além disso, até o momento, as propriedades da madeira das espécies pertencentes a esse gênero permanecem pouco estudadas, refletindo-se em seu reduzido aproveitamento e baixo valor comercial. Nesse contexto, a incorporação dessas espécies ao processo de produção de carvão vegetal por meio de plantios energéticos pode representar uma alternativa promissora para ampliar o aproveitamento dos recursos florestais. Porém, inicialmente é necessário entender o potencial dessas espécies para essa finalidade.

Nesse contexto, o objetivo deste estudo foi verificar o potencial da madeira de *M. splendens* e *M. eximia*, provenientes de floresta secundária na Amazônia Oriental, como matéria-prima para a produção de carvão vegetal.

2. Material e métodos

Área de estudo e coletada das amostras

O estudo foi conduzido em um fragmento de floresta secundária localizado na Vila de Beja, município de Abaetetuba, Pará, Brasil. Foram selecionadas cinco árvores de cada espécie (*M. splendens* e *M. eximia*). As árvores de *M. splendens* apresentaram diâmetro à altura do peito (DAP) médio de 10,85 cm e altura total média de 10,08 m, enquanto para *M. eximia* esses valores foram de 7,26 cm e 9,86 m, respectivamente. Além disso, a idade dos indivíduos é desconhecida. De cada árvore foram retirados discos de madeira com aproximadamente 10 cm de espessura ao longo da seção do fuste compreendida entre a base (aproximadamente 0,10 m acima do nível do solo), e o DAP, totalizando aproximadamente 12 discos por árvore. Posteriormente, os discos foram seccionados em corpos de prova para a produção de carvão vegetal.

Para a confirmação científica das espécies, foi coletado material botânico de cada árvore, seguindo os procedimentos de herborização descritos por Ferreira (2006). As amostras foram encaminhadas ao Laboratório de Taxonomia de Árvores da Universidade Federal Rural da Amazônia (LABTAX/UFRA) onde foram identificadas por especialistas e incorporadas ao acervo do Herbário Felisberto Camargo (FC/UFRA).

Carbonização em escala laboratorial e qualidade do carvão vegetal

As carbonizações foram realizadas em forno tipo mufla, utilizando um contêiner metálico conectado a um condensador resfriado a água, acoplado a um frasco coletor de gases condensáveis e os gases não condensáveis foram queimados na saída do sistema de condensação. Para cada árvore foram realizadas duas carbonizações, totalizando 20 carbonizações (10 por espécie). Em cada carbonização foram utilizados aproximadamente 350 g de madeira de *M. splendens* e 400 g de madeira de *M. eximia*, ambas com teor de umidade, base seca, de aproximadamente 10%, determinadas por um medidor de umidade para madeiras (DL 2000, Digisystem, Brasil).

O processo de carbonização teve duração total de 10 h e 30 min, com temperatura inicial de 150 ºC e atingindo temperatura máxima de 450 °C, mantida por 3 h, com uma taxa de

aquecimento de 4,17 ºC min^{-1}. Ao término da carbonização, o contêiner foi resfriado externamente com panos umedecidos até que sua temperatura atingisse valores inferiores a 100 °C, procedimento que durou aproximadamente 5 min. O acompanhamento da redução de temperatura foi realizada com um termômetro infravermelho modelo TI-550 (Instrutherm, Brasil). Posteriormente, o sistema permaneceu em resfriamento por convecção natural por pelo menos quatro horas.

O rendimento gravimétrico foi calculado pela razão entre a massa seca estimada do carvão vegetal e a massa seca da madeira utilizada em cada carbonização. A densidade aparente do carvão vegetal foi determinada pelo método hidrostático, com imersão em mercúrio, conforme a metodologia proposta por Vital (1984), utilizando três amostras de carvão por carbonização, totalizando seis amostras por árvore, totalizando 30 amostras por espécie. A densidade a granel do carvão vegetal foi determinada conforme a norma NBR 6922 (ABNT, 1981), utilizando um recipiente de volume conhecido (343 cm^3). A densidade a granel foi obtida pela razão entre a massa do carvão e o volume do recipiente. Foram realizadas duas repetições por árvore, totalizando 10 repetições por espécie.

O teor de finos foi determinado por ensaio de abrasão mecânica, utilizando aproximadamente 20 g de carvão submetidos à rotação de 35,5 rpm por 6 min em um friabilômetro, conforme metodologia adaptada da Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais (1982). Após o ensaio, o material foi peneirado em malha de 9,5 mm e o teor de finos foi calculado pela porcentagem de perda de massa. Foram realizadas duas repetições por árvore, totalizando 10 repetições por espécie.

Os teores de materiais voláteis, cinzas e carbono fixo foram determinados de acordo com a norma ASTM D1762-84 (ASTM, 2021), sendo realizadas três repetições por carbonização, totalizando seis repetições por árvore. As amostras de carvão vegetal foram previamente moídas e peneiradas em duas peneiras sobrepostas de malha 40 e 60 mesh, em que as amostras retidas na peneira de 60 mesh foram utilizadas para as análises. O poder calorífico superior foi determinado conforme a norma DIN EN 14918 (DIN, 2010), sendo realizadas duas repetições por árvore.

Análise de dados

As variáveis foram submetidas ao teste de normalidade de Shapiro-Wilk ($p > 0,05$) e ao teste de homogeneidade das variâncias pelo teste de Bartlett ($p > 0,05$). Para as variáveis que atenderam aos pressupostos, foi aplicado o teste t de Student ($p < 0,05$). Para o teor de finos e

teor de cinzas, em que foi observada heterogeneidade das variâncias, utilizou-se o teste t de Welch ($p < 0,05$), que não pressupõe igualdade de variâncias. Todas as análises estatísticas foram realizadas utilizando o software R (versão 4.2.3).

3. Resultados e discussão

Entre as propriedades do carvão avaliadas, a densidade aparente (DA), densidade a granel (DAG) e o teor de cinzas (TCZ) diferiram significativamente entre as espécies (Tabela 1). *M. eximia* apresentou maior DA ($t = -5,86$; $p < 0,001$) e DAG ($t = -12,27$; $p < 0,001$), enquanto *M. splendens* apresentou maior TCZ ($t = 18,30$; $p < 0,001$). O rendimento gravimétrico das duas espécies foi semelhante ao observado por Protásio et al. (2021) para 14 clones de *Eucalyptus* destinados à produção de carvão vegetal, com rendimentos variando entre 33,7 e 35,8%, se encontrando dentro da faixa considerada adequada para a produção industrial de carvão vegetal (Carneiro et al., 2026). Rendimentos gravimétricos mais elevados são importantes por proporcionarem maior produtividade dos fornos, maior retorno econômico com a comercialização do carvão vegetal e menor emissão de gases (Lima et al., 2022).

Tabela 1 – Valores médios de rendimento e propriedades de carvão vegetal produzido a partir da madeira de *Myrcia splendens* e *Myrcia eximia*

Variáveis	*Myrcia splendens*	*Myrcia eximia*
RG (%)	34,73 ± 0,79 a	34,59 ± 0,50 a
DA (g cm^{-3})	0,443 ± 0,028 b	0,529 ± 0,017 a
DAG (g cm^{-3})	0,272 ± 0,003 b	0,344 ± 0,013 a
TEOR DE FINOS (%)	2,01 ± 0,49 a	2,05 ± 0,30 a
TMV (%)	22,77 ± 1,17 a	23,31 ± 0,60 a
TCZ (%)	1,05 ± 0,07 a	0,48 ± 0,01 b
CF (%)	76,20 ± 1,22 a	76,22 ± 0,59 a
PCS (MJ kg^{-1})	31,13 ± 0,50 a	31,44 ± 0,38 a

RG: Rendimento Gravimétrico; DA: Densidade aparente do carvão; DAG: Densidade a granel; TMV: Teor de materiais voláteis; TCZ: Teor de cinzas; CF: Teor de carbono fixo; PCS: Poder calorífico superior. Médias seguidas pela mesma letra na linha não diferem entre si pelo teste t ($p > 0,05$). Valores apresentados como média ± desvio padrão (n = 5).

A DA é uma propriedade importante para a utilização do carvão vegetal como biorredutor na indústria siderúrgica, pois valores mais elevados proporcionam maior resistência mecânica, melhor aproveitamento do volume do alto-forno e menor geração de finos durante o manuseio (Protásio et al., 2021; Massuque et al., 2023). Os valores obtidos para as duas espécies foram iguais ou superiores aos relatados para clones de *Eucalyptus* e *Corymbia* aos sete anos de idade, que variaram de 0,223 a 0,456 g cm^{-3} (Martins et al., 2025) e foram maiores que os valores observados por Dias Junior et al. (2015) para carvões de *Eucalyptus* spp. (0,320 g cm^{-3}) destinados ao uso doméstico. Em comparação com carvões produzidos a partir de resíduos de espécies florestais provenientes de manejo florestal da Amazônia, os valores também foram iguais ou superiores aos registrados para *Couratari oblongifolia* (0,431 g cm^{-3}), *Caryocar villosum* (0,464 g cm^{-3}) e *Pseudopiptadenia suaveolens* (0,526 g cm^{-3}) (Lima et al. 2020).

Os valores de DAG das duas espécies superaram o valor mínimo de 0,200 g cm^{-3} estabelecido pela norma PMQ 3-03 da Resolução SAA nº 40 para carvão vegetal destinado ao uso doméstico no Estado de São Paulo (SAA, 2015). As médias observadas foram de 0,272 g cm^{-3} para *M. splendens* e 0,344 g cm^{-3} para *M. eximia*. Os teores de finos obtidos foram menores que os avaliados para clones de *Eucalyptus* e *Corymbia* entre 5 e 7 anos que variaram 4,80% a 12,54% (Martins et al. 2025; Carneiro et al. 2026). Valores baixos de teor de finos são importante, pois partículas finas reduzem a permeabilidade da carga do alto-forno aos gases reagentes, afetando sua eficiência (Dias Júnior et al. 2020). Para uso doméstico, os valores obtidos de teor de finos neste estudo atendem ao estabelecido pela norma PMQ 3-03 que estabelece um valor máximo de 5% de finos (SAA, 2015).

Os valores de TMV, TCZ e CF das duas espécies apresentaram valores recomendados para a utilização do carvão vegetal na siderurgia, que são de 22 - 25%, 1 - 1,5%, e 74 - 77%, respectivamente (Assis et al., 2016). Além disso, ambas atenderam aos requisitos da norma PMQ 3-03 para carvão vegetal destinado ao uso doméstico, que estabelece TCZ inferior a 5% e CF superior a 73%. A composição química imediata é um dos principais parâmetros utilizados para avaliar a qualidade do carvão vegetal, uma vez que influencia diretamente seu desempenho nas diferentes aplicações.

Na siderurgia, elevados valores de CF são desejáveis por aumentarem a produtividade de ferro-gusa para um mesmo consumo especifico de carvão vegetal (Protásio et al., 2021) e para uso doméstico, maiores teores de CF também são indicados, pois reduzem a formação de chamas e proporcionam maior liberação de calor durante a combustão (Dias Júnior et al., 2020). Além disso, baixos valores de TCZ são importantes para ambas as aplicações, uma vez que

elevados conteúdos minerais favorecem a formação de incrustações, sinterização e escórias durante a combustão, comprometendo a transferência de calor (Santos et al., 2024).

Valores de PCS iguais ou superiores a 29,30 MJ kg^{-1} (7.000 kcal kg^{-1}) dos carvões vegetais são desejáveis para seu energético (Carneiro et al., 2026). O carvão vegetal de *M. splendens* e *M. eximia* foram superiores a 31,00 MJ kg^{-1}, indicando potencial para uso siderúrgico e energético. Os valores obtidos também superaram os relatados para o carvão vegetal produzido a partir de resíduos madeireiros de áreas de manejo florestal da Amazônia, como *Dinizia excelsa* (30,00 MJ kg^{-1}) (Barros et al. 2025). Além disso, foram semelhantes ou superiores aos observados em clones de *Eucalyptus* com 7,5 anos de idade indicados para a siderurgia, cujos valores variaram entre 29,60 e 31,89 MJ kg^{-1} (Pereira et al. 2012).

4. Conclusões

As espécies *Myrcia splendens* e *Myrcia eximia* apresentaram potencial para a produção de carvão vegetal, produzindo um carvão com características compatíveis com as exigências para aplicações siderúrgicas e uso doméstico. Embora *M. eximia* tenha apresentado maiores densidades aparente e a granel e *M. splendens* maior teor de cinzas, ambas produziram carvão vegetal de elevada qualidade, indicando seu potencial como alternativa de matéria-prima para a bioenergia em florestas secundárias da Amazônia.

5. Agradecimentos

Os autores agradecem ao Laboratório de Painéis de Energia da Madeira (LAPEM) da Universidade Federal de Viçosa (UFV) pelo apoio na execução das atividades. Jonathan Dias Marques agradece ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela bolsa de doutorado (141434/2026-0).

6. Referências bibliográficas

American Society for Testing and Materials. (2021). D1762-84: Standard Test Method for Chemical Analysis of Wood Charcoal.

Araujo, E. S., Mota, G. S., Lorenço, M. S., Zidanes, U. L., Silva, L. R., Silva, E. P., Ferreira, V. R. F., Cardoso, M. G. C., & Mori, F. A. (2020). Characterisation and valorisation of the bark of *Myrcia eximia* DC. Trees from the Amazon rainforest as a source of phenolic compounds. Holzforschung, 74(10). https://doi.org/10.1515/hf-2019-0294

Assis, M. R., Brancheriau, L., Napoli, A., & Trugilho, P. F. (2016). Wood Science and Technology, 50. https://doi.org/10.1007/s00226-016-0812-6

Associação Brasileira de Normas Técnicas. (1981). NBR 6922: Carvão vegetal - testes para determinação da massa específica (densidade à granel).

Barros, D. S., Lima, M. D. R., Dias Junior, A. F., Bufalino, L., Massuque, J., Santos, E. V., Trugilho, P. F., Oliveira, F. A., & Protásio, T. P. (2023). Does the segregation of wood waste from Amazonia improve the quality of charcoal produced in brick kilns? BioEnergy Research, 16. https://doi.org/10.1007/s12155-022-10551-w

Barros, D. S., Lima, M. D. R., Massuque, J., Santos, E. V., Guirardi, B. D., Dias Junior, A. F., Bufalino, L., Silveira, E. A., Carneiro, A. C. O., Trugilho, P. F., & Protásio, T. P. (2025). Advancing circular economy in Amazonian forest management: A comparative study of the effects of wood waste segregation and traditional carbonization on charcoal properties, combustibility, and spontaneous combustion risk. Circular Economy. 4(3). https://doi.org/10.1016/j.cec.2025.100152

Carneiro, A. C. O., Moretti, S. D. A., Zanuncio, A. J. V., Lima, B. L., Melo, J. D., Jorge, F. J., Junqueira, M. S., Carvalho, A. M. M. L., Araújo, S. O., & Carvalho, A. G. *Eucalyptus* and *Corymbia* clones: effects of harvest age on wood quality for sustainable charcoal production. 84(97). https://doi.org/10.1007/s00107-026-02432-2

Deutsches Institut Fur Normung - DIN. (2010). EN 14918: Determination of calorific value.

Dias Junior, A. F., Brito, J. O., & Andrade, C. R. (2015). Granulometric influence on the combustion of charcoal for barbecue. Revista Árvore, 39(6). http://dx.doi.org/10.1590/0100-67622015000600016

Dias Junior, A. F., Andrade, C. R., Milan, M., Brito, J. O., Andrade, A. M., & Souza, N. D. (2020). Quality function deployment (QFD) reveals appropriate quality of charcoal used in barbecues. Scientia Agricola, 6. http://dx.doi.org/10.1590/1678-992X-2019-0021

Ferreira, G. C. (2006). Diretrizes para coleta e identificação de material botânico. Embrapa.

Florêncio, G. W. L., Martins, F. B., & Fagundes, F. F. A. (2022). Climate change on Eucalyptus plantations and adaptive measures for sustainable forestry development across Brazil. Industrial Crops and Products, 188. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2022.115538

Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais. (1982). Carvão vegetal: destilação; carbonização; propriedades; controle de qualidade.

Indústria Brasileira de Árvores. (2025). Relatório Anual IBÁ 2025 ano base 2024. https://iba.org/wp-content/uploads/2025/10/relatorioAnual2025.pdf

Lima, M. D. R., Simetti, R., Assis, M. R., Trugilho, P. F., Carneiro, A. C. O., Bufalino, L., Hein, P. R. G., & Protásio, T. P. (2020). Charcoal of logging wastes from sustainable forest management for industrial and domestic uses in the Brazilian Amazonia. Biomass and Bioenergy, 142. https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2020.105804

Lima, M. D. R., Massuque, J., Bufalino, L., Trugilho, P. F., Ramalho, F. M. G., Protásio, T. P., & Hein, P. R. (2022). Clarifying the carbonization temperature effects on the production and apparent density of charcoal derived from Amazonia wood wastes. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 166. https://doi.org/10.1016/j.jaap.2022.105636

Massuque, J., Sanchez, J. Y. S., Loureiro, B. A., Setter, C., Lima, M. D. R., Silva, P. H. M., Protásio, T. P., Hein, P. R. G., & Trugilho, P. F. Evaluating the Potential of Non-commercial *Eucalyptus* spp. and *Corymbia* spp. for Bioenergy in Brazil. BioEnergy Research, 16. https://doi.org/10.1007/s12155-022-10502-5

Martins, C. C. N., Castro, V. R., Hein, P. R. G., Carneiro, A. C. O., Mascarenhas, A. R. P., Bufalino, L., Medeiros, D. T. Scatolino, M. V., Lima, M. D. R., Cunha, J. S., Andressa, I., Cardoso, R. S. G., & Demnuner, I. (2025). Prediction of the Energy Properties of Charcoal Obtained from *Eucalyptus* and *Corymbia* Biomass Using Portable and Benchtop NIR Spectrometers. BioEnergy Research, 18(81). https://doi.org/10.1007/s12155-025-10882-4

Pena-Vergara, G., Castro, L. R., Gasparetto, C. A., & Bizzo, W. A. (2022). Energy from planted forest and its residues characterization in Brazil. Energy, 239. https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.122243

Pereira, B. L. C., Oliveira, A. C., Carvalho, A. M. M. L., Carneiro, A. C. O., Santos, L. C., & Vital, B. R. (2012). Quality of wood and charcoal from *Eucalyptus* clones for ironmaster use. International Journal of Forestry Research, 2012. https://doi.org/10.1155/2012/523025

Protásio, T. P., Lima, M. D. R., Scatolino, M. V., Silva, A. B., Figueiredo, I. C. R., Hein, P. G., & Trugilho, P. F. (2021). Charcoal productivity and quality parameters for reliable classification of *Eucalyptus* clones from Brazilian energy forests. Renewable Energy, 164. https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.09.057

R Development Core Team. (2023) R: A language and environment for statistical computing. R foundation for statistical computing v. 4. 2. 3.

Santos, E. V., Lima, M. D. R., Dantas, K. G. F., Carvalho, F. I. M., Gonçalves, D. A., Silva, A. R. Sun, H., Ferreira, M. J., Bufalino, L., Hein, P. R. G., & Protásio, T. P. (2024). The

inorganic composition of *Tachigali vulgaris* wood: implications for bioenergy and nutrient balances of planted forests in the Amazonia. BioEnergy Research, 17. https://doi.org/10.1007/s12155-023-10679-3

Santos, M. F., Amorim, B. S., Burton, G. P., Fernandes, T., Gaem, P. H., Lourenço, A. R. L., Lima, D. F., Rosa, P. O., Santos, L. L. D., Staggemeier, V. G., Vasconcelos, T. N. C., & Lucas, E. J. (2026). *Myrcia in* **Flora e Funga do Brasil.** Jardim Botânico do Rio de Janeiro. https://floradobrasil.jbrj.gov.br/FB10660

Silva, M. O. S., Silva, M. G., Bufalino, L., Assis, M. R., Gonçalves, D. A., Trugilho, P. F., & Protásio, T. P. (2021). Variations in productivity and wood properties of Amazonian tachi branco trees planted at different spacing for bioenergy purposes. Journal of Forestry Research, 32(1). https://doi.org/10.1007/s11676-019-01068-8

Secretaria de Agricultura e Abastecimento do Estado de São Paulo - SAA. (2015). SAA Resolução - 40 de 14 de dezembro de 2015.Norma PMQ 3-03 para carvão vegetal. Diário Oficial, São Paulo, SP, Brasil.

Sindicato da Indústria do Ferro no Estado de Minas Gerais - SINDIFER. (2026). Produção de ferro-gusa em Minas Gerais e no Brasil: anuário estatístico ano base 2025. https://sindifer.com.br/sndfr/anuario-estatistico/

Ucella-Filho, J. G. M. Dias Júnior, A. F., Souza, E. C., Silva, J. G. M., Sant'anna Neto, A., Silva, A. P. C., Santos, L. M. H., Ortega Rodriguez D. R., Tomazello-Filho, M., & Brito, J. O. (2023). Clues about wood density and trace-element variability of *Schizolobium parahyba* var. *amazonicum* (Huber ex Ducke) Barneby for bioenergy use. Environmental Science and Pollution Research, v. 30. https://doi.org/10.1007/s11356-023-26343-4

Vital, B. R. (1984). Methods of determining wood density. Viçosa, MG: Universidade Federal de Viçosa.

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Classificação rápida da condição higroscópica de equilíbrio de carvões produzidos a partir de resíduos madeireiros amazônicos por espectroscopia NIR portátil

Valdenia Medeiros de Araújo[1]; Genilson Maia corrêa[1]; Elvis Vieira dos Santos[1]; Luíza Mendonça Bonfim Tavares[1]; Caio Palmeira Goulart[1]; Paulo Fernando Trugilho[1]; Thiago de Paula Protásio[1]; Paulo Ricardo Gherardi Hein[1]

[1] Universidade Federal de Lavras (UFLA), Departamento de Ciências Florestais, Lavras, Minas Gerais, 37.203-202, Brasil

Resumo: O carvão vegetal é um material bioenergético estratégico para o setor metalúrgico brasileiro, especialmente na Amazônia, onde resíduos do manejo florestal sustentável são cada vez mais utilizados como matéria-prima. Este estudo avaliou o comportamento higroscópico de carvões produzidos a partir de três espécies amazônicas (*Dinizia excelsa*, *Inga* spp. e *Parkia pendula*), carbonizadas a 400 °C e 800 °C, e condicionadas em seis níveis de umidade relativa do ar (40–90%). Espectros no infravermelho próximo (NIR) foram obtidos com um espectrômetro portátil MicroNIR, sendo desenvolvidos modelos quimiométricos para estimar o teor de umidade de equilíbrio e classificar as amostras conforme seus estados higroscópicos. O teor de umidade de equilíbrio aumentou com a umidade relativa do ambiente e foi mais elevado nos carvões produzidos a 800 °C, indicando alterações estruturais associadas ao aumento da porosidade. A regressão por mínimos quadrados parciais apresentou desempenho moderado na predição da umidade de equilíbrio (R^2cv = 0,57; RMSEcv ≈ 3,0%), enquanto a análise discriminante por mínimos quadrados parciais alcançou elevada acurácia na classificação das espécies (>89%) e dos estados higroscópicos (>94%), com validação cruzada superior a 97%. Os resultados demonstram que a espectroscopia NIR portátil associada à quimiometria constitui ferramenta rápida e não destrutiva para monitorar a condição higroscópica do carvão vegetal, contribuindo para o controle de qualidade, armazenamento e otimização de processos na cadeia de bioenergia.

Palavras-chave: Espectroscopia no infravermelho próximo; Modelagem quimiométrica; Modelagem Multivariada.

Rapid classification of the hygroscopic equilibrium condition of charcoal produced from Amazonian wood residues using portable NIR spectroscopy

Abstract: Charcoal is a strategic bioenergy material for the Brazilian metallurgical sector, particularly in the Amazon region, where residues from sustainable forest management are increasingly used as feedstock. This study evaluated the hygroscopic behavior of charcoal produced from three Amazonian wood species (*Dinizia excelsa*, *Inga* spp., and *Parkia pendula*), carbonized at 400 °C and 800 °C, and conditioned under six relative humidity levels (40–90%). Near-infrared (NIR) spectra were acquired using a portable MicroNIR spectrometer, and chemometric models were developed to estimate equilibrium moisture content and classify samples according to their hygroscopic states. Equilibrium moisture content increased with ambient relative humidity and was higher in charcoal produced at 800 °C, indicating structural changes associated with increased porosity. Partial least squares regression showed moderate

performance for predicting equilibrium moisture content (R^2cv = 0.57; RMSEcv ≈ 3.0%), whereas partial least squares discriminant analysis achieved high accuracy in classifying wood species (>89%) and hygroscopic states (>94%), with cross-validation accuracy exceeding 97%. The results demonstrate that portable NIR spectroscopy combined with chemometric analysis is a rapid and non-destructive tool for monitoring the hygroscopic condition of charcoal, contributing to quality control, storage management, and process optimization within the bioenergy supply chain.

Keywords: Near-infrared spectroscopy; Chemometric modeling; Multivariate modeling.

1. Introdução

O carvão vegetal desempenha papel estratégico na matriz bioenergética brasileira, especialmente como agente redutor renovável na siderurgia. Na Amazônia, resíduos do manejo florestal sustentável (MFS) representam oportunidade para maior eficiência de recursos e cadeias produtivas sustentáveis (Santos et al., 2024). Sua aceitação industrial depende de propriedades como umidade, resistência mecânica e desempenho energético (Lima et al., 2020; Silva et al., 2020).

A higroscopicidade controla a adsorção de umidade e influencia o teor de umidade de equilíbrio, poder calorífico e friabilidade. Em alto-forno, elevados teores de umidade reduzem a eficiência térmica e aumentam a geração de finos, sendo desejáveis valores inferiores a ~7%. O carvão, entretanto, apresenta elevada suscetibilidade à adsorção de umidade em ambientes tropicais (Zam et al., 2024). Esse comportamento é influenciado pela temperatura de carbonização, que modifica grupos funcionais e porosidade (Costa, 2020).

Os métodos convencionais de determinação de umidade são gravimétricos, destrutivos e lentos. A espectroscopia no infravermelho próximo (NIR) constitui alternativa rápida e não destrutiva, amplamente aplicada à biomassa (Pasquini, 2018; Wei et al., 2021), permitindo estimar indiretamente a umidade por meio de sinais associados às vibrações O–H, C–H e N–H e de modelos quimiométricos (Achata et al., 2015; Lima et al., 2022).

Persistem lacunas no estudo do equilíbrio higroscópico do carvão e no uso de NIR portátil, especialmente para resíduos amazônicos. Além disso, o resfriamento com água após a carbonização aumenta a variabilidade da umidade inicial (Zam et al., 2024), reforçando a necessidade de métodos rápidos e aplicáveis em campo.

Assim, este estudo avalia o equilíbrio higroscópico de carvões de três espécies amazônicas, produzidos em duas temperaturas e submetidos a diferentes umidades relativas. A espectroscopia NIR portátil associada à quimiometria foi utilizada para estimar o teor de umidade de equilíbrio e classificar seus estados. A hipótese é que maiores temperaturas

aumentam a porosidade e a capacidade de adsorção, permitindo a discriminação espectral desses estados. Os objetivos são (i) quantificar o teor de umidade de equilíbrio sob diferentes condições de umidade relativa e (ii) desenvolver modelos rápidos e não destrutivos para classificação dos estados de equilíbrio higroscópico.

2. Material e métodos

2.1 Área de estudo e matéria-prima

Resíduos madeireiros de manejo florestal sustentável foram coletados na Fazenda Rio Capim, Paragominas, PA, Brasil. Foram selecionadas três espécies amazônicas: *Dinizia excelsa*, *Inga* spp. e *Parkia pendula*. A carbonização e as análises foram realizadas no Laboratório Multiusuário de Biomateriais e Energia de Biomassa da UFLA.

Foram preparados 60 corpos de prova por espécie (3,4 × 3,8 × 4,2 cm), sendo 30 carbonizados a 400 °C e 30 a 800 °C. Após secagem a 103 ± 2 °C por 24 h, a carbonização foi realizada em forno mufla elétrico, em triplicata por espécie e temperatura, com aquecimento de 100 °C h^{-1} e permanência de 30 min na temperatura final, totalizando 18 ensaios.

2.2 Condicionamento do equilíbrio higroscópico e determinação da umidade

Foram utilizadas 72 amostras de carvão (24 por espécie; 12 por temperatura), condicionadas a 30 °C em câmara climática (Hotpack), sob UR de 40, 50, 60, 70, 80 e 90%. As amostras foram pesadas a cada 24 h em balança analítica (±0,0001 g) até estabilização da massa. Após o equilíbrio, foram determinadas as massas de equilíbrio e seca, esta última após secagem a 103 ± 2 °C por 2 h. A umidade de equilíbrio (UE) foi calculada em base seca.

2.3 Aquisição de espectros NIR

Os espectros no infravermelho próximo foram obtidos diretamente na superfície dos corpos de prova de carvão vegetal, utilizando um espectrômetro portátil MicroNIR (Viavi Solutions Inc., CA, EUA) em modo de reflectância. A aquisição cobriu a faixa de 950 a 1650 nm, com resolução de 5,6 nm, resultando em 125 variáveis por espectro, sendo cada espectro a média de 16 varreduras.

As medições seguiram o procedimento “apontar e medir”, com varreduras de escuro e referência a cada 10 min. Os dados foram coletados no software SpectralSoft (Viavi Solutions Inc., CA, EUA), em ambiente climatizado a 20 °C e 60% de umidade relativa. Foram obtidas 450 assinaturas espectrais a partir de 72 corpos de prova de carvão, com réplicas para capturar a

heterogeneidade interna, posteriormente associadas aos dados de umidade de equilíbrio para análise multivariada.

2.4 Análise multivariada dos dados

As análises multivariadas foram realizadas no Chemoface (v. 1.65; Nunes et al., 2012), utilizando espectros brutos e pré-processados. A PCA avaliou a variabilidade espectral em função da temperatura de carbonização, espécie e condições de equilíbrio higroscópico. A PLS-R foi aplicada à estimativa do teor de umidade de equilíbrio, com validação leave-one-out e avaliação por R^2c, R^2cv, RMSEC e RMSECV. A PLS-DA classificou as amostras por espécie e classes de umidade de equilíbrio, codificadas binariamente (1/0) conforme Gomes et al. (2025).

Foram testados os pré-processamentos Savitzky–Golay (1ª derivada, 15 pontos, polinômio de 2ª ordem), SNV e MSC, mantendo-se apenas Savitzky–Golay pelo melhor desempenho. Os outliers foram identificados por inspeção visual e, quando necessário, os espectros foram reacquiridos, sem exclusão de dados. A validação utilizou leave-one-out, com até 15 variáveis latentes selecionadas pela maior acurácia. A PLS-DA foi avaliada por VL, Cp%, SEN, SPEC, ACCU e EFF (Oliveri e Downey, 2012; Zhou et al., 2020).

$$SEN = \frac{TP}{TP + FN} x\,100$$

$$SPEC = \frac{TN}{TN + FP} x\,100$$

$$ACCU = \frac{TN + TP}{TP + FN + TN + FP} x\,100$$

$$EFF = \sqrt{\frac{TN \times TP}{(TP + FN) \times (TN + FP)}}\, x\,100$$

Em que: TP é o verdadeiro positivo, TN é o verdadeiro negativo, FN é o falso negativo e FP é o falso positivo.

3. Resultados e discussão

3.1 Comportamento de equilíbrio higroscópico do carvão vegetal

A umidade de equilíbrio (UE) aumentou com a elevação da umidade relativa (UR) para todas as espécies e temperaturas de carbonização (Tabela 1). O carvão produzido a 800 °C apresentou consistentemente maiores valores de UE em comparação ao produzido a 400 °C. A

90% de UR, os valores variaram entre 6,9–8,2% para os carvões produzidos a 400 °C e entre 12,4–20,6% para aqueles produzidos a 800 °C.

Tabela 1 – Valores médios de umidade de equilíbrio higroscópico do carvão vegetal em função da exposição a diferentes umidades relativas do ambiente

Espécies	Temp (°C)	Umidade relativa (%)					
		40	50	60	70	80	90
Dinizia excelsa	400	3.68	4.9	5.46	6.15	6.72	6.89
	800	5.49	8.57	9.16	9.68	10.32	12.42
Inga spp.	400	3.96	4.84	5.6	6.47	6.94	8.19
	800	9.48	12.2	13.43	14.09	15.08	19.86
Parkia pendula	400	3.99	4.92	5.55	6.22	6.55	7.27
	800	9.32	13.04	13.68	14.37	15.03	20.6

Temp = temperatura de carbonização.

O aumento da temperatura de carbonização promoveu incrementos médios de aproximadamente 116% no TUE. Esse comportamento está associado ao desenvolvimento de uma estrutura mais porosa e com maior área superficial em temperaturas elevadas, favorecendo a adsorção de vapor d'água (Pari, 2011; Júnior et al., 2016; Yu et al., 2023). Os resultados indicam que carvões produzidos em temperaturas mais altas, embora apresentem maior teor de carbono fixo, podem ser mais suscetíveis à adsorção de umidade durante armazenamento e transporte.

3.2 Assinaturas espectrais NIR

Os espectros NIR foram obtidos na faixa de 950–1650 nm. Os espectros brutos apresentaram variações de linha de base e ruído, reduzidos após aplicação da primeira derivada de Savitzky-Golay (Figura 1). Apesar das diferenças entre espécies e temperaturas de carbonização, não foi observada separação visual clara entre os grupos, corroborando estudos anteriores que relatam diferenças espectrais sutis em carvões e materiais lignocelulósicos (Ramalho et al., 2017; Lima et al., 2022)

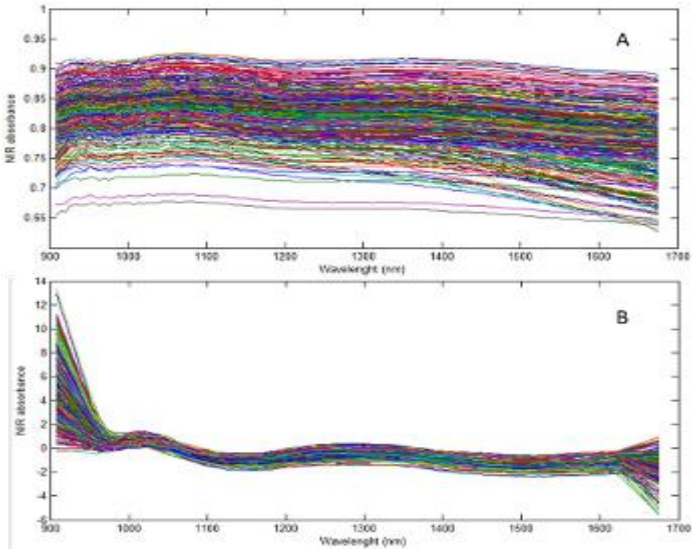


Figura 1 – Assinaturas espectrais NIR dos carvões vegetais obtidas por espectroscopia MicroNIR portátil: espectros brutos (A) e espectros da primeira derivada (B).

3.3 Análise de Componentes Principais

A PCA foi utilizada para avaliação exploratória da variabilidade espectral (Figura 2). O primeiro componente principal explicou 99,92% da variância total, enquanto o segundo explicou apenas 0,02%. Não foram observados agrupamentos evidentes em função da espécie, temperatura de carbonização ou condição higroscópica. Dessa forma, a PCA apresentou baixa capacidade discriminatória, justificando a utilização de métodos supervisionados nas etapas subsequentes.

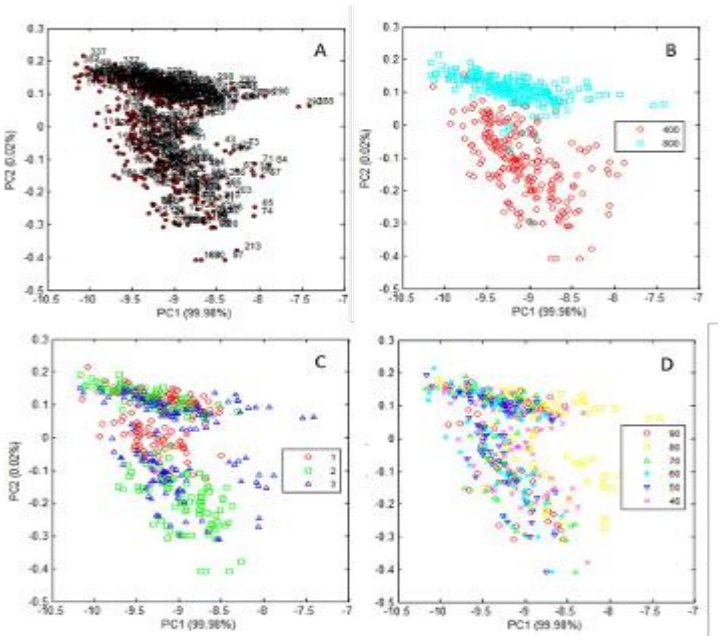


Figura 2 − Escores da Análise de Componentes Principais (PCA) das amostras de carvão vegetal: distribuição geral das amostras (A) e gráficos separados por temperatura de carbonização (B), espécie madeireira (C) e umidade relativa (D), utilizando os espectros brutos obtidos com o espectrômetro NIR portátil. 1 – *Dinizia excelsa*; 2 – *Parkia pendula*; 3 – *Inga* spp.

3.4 Regressão por mínimos quadrados parciais para o teor de umidade de equilíbrio

Os modelos PLS-R desenvolvidos para estimar o TUE apresentaram desempenho moderado, com $R^2cv = 0,57$ e RMSECV ≈ 2,99% utilizando oito variáveis latentes (Figura 3). Embora o modelo tenha capturado tendências gerais de variação da umidade, sua precisão foi limitada, provavelmente em razão da heterogeneidade estrutural do carvão vegetal. Assim, a principal aplicação da espectroscopia NIR neste estudo concentrou-se na classificação dos estados higroscópicos.

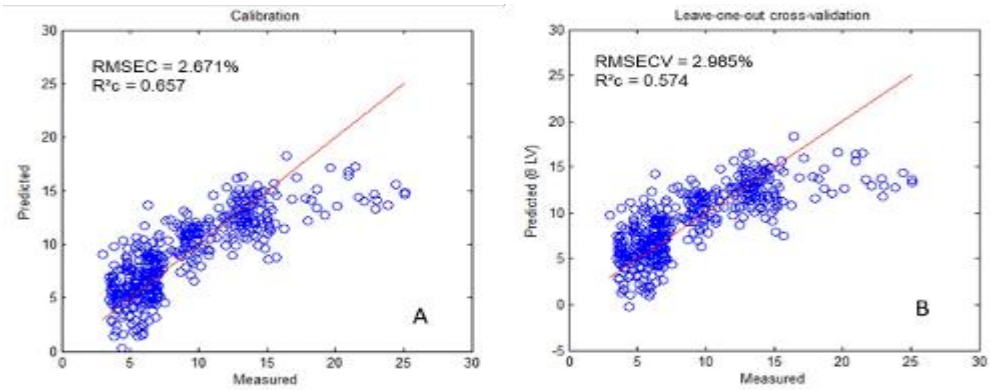


Figura 2 − Gráfico dos modelos de calibração PLS-R (A) e validação cruzada para estimar o teor de umidade de equilíbrio de amostras de carvão vegetal por espectroscopia NIR portátil.

3.5 Análise Discriminante por Mínimos Quadrados Parciais

Os modelos PLS-DA apresentaram elevada capacidade de classificação das espécies, com acurácia superior a 89% e validação cruzada acima de 88% para todas as classes (Tabela 2). A maior acurácia foi observada para *Inga* spp. (91,5%). A matriz de confusão demonstrou que mais de 92% das amostras foram corretamente classificadas durante a validação cruzada (Tabela 3), indicando que informações espectrais relacionadas à espécie permanecem detectáveis mesmo após a carbonização.

Tabela 2 – Matriz de confusão da análise discriminante de mínimos quadrados parciais para a classificação do carvão vegetal produzido a partir de três espécies de madeira.

Calibre	Espécies de classificação NIR			Correto (%)
	Dinizia	*Parkia*	*Inga*	
Dinizia	132	6	9	91,6

Parkia	19	133	3	96,2
Inga	6	5	133	96,0
Total				**94,6**
LOO-CV	*Dinizia*	*Parkia*	*Inga*	Correto (%)
Dinizia	123	12	12	90,6
Parkia	20	126	9	92,8
Inga	8	9	127	93,0
Total				**92,2**

3.6 PLS-DA para classificação de carvão vegetal por umidade relativa

Os modelos PLS-DA para classificação dos estados de equilíbrio higroscópico apresentaram elevada eficiência, com acurácia média superior a 94% e validação cruzada próxima de 98% (Tabelas 4 e 5). As menores taxas de acerto ocorreram em classes intermediárias de umidade, devido à maior sobreposição espectral entre estados adjacentes. Ainda assim, os resultados demonstram que a espectroscopia NIR portátil associada ao PLS-DA é capaz de discriminar de forma confiável diferentes estados higroscópicos do carvão vegetal.

Tabela 4 – Desempenho dos modelos PLS-DA para classificação das classes de umidade de equilíbrio higroscópico do carvão vegetal associadas a condições de umidade relativa controlada, com base em espectros NIR coletados usando equipamentos NIR portáteis.

LOO-CV	Média	90	80	70	60	50	40
n	446	71	75	72	73	72	83
TP	62.2	62	66	64	55	56	70
TN	359.5	363	366	362	355	364	347
FP	12.2	12	5	12	18	10	16
FN	12.2	9	9	8	18	16	13
SPEC	96.7	96.8	98.7	96.8	95.2	97.3	95.6
SEN	83.6	87.3	88	88.9	75.3	77.8	84.3
ACU	94.5	95.3	96.9	95.5	91.9	94.2	93.5
EFF	91.9	93.2	92.8	84.7	87	89.8	91.9

Tabela 5 – Matriz de confusão da Análise Discriminante de Mínimos Quadrados Parciais (PLS-DA) para classificação das classes de umidade de equilíbrio higroscópico do carvão vegetal (associadas a níveis controlados de umidade relativa) em amostras produzidas a partir de três espécies de madeira.

Calibre	Classificação NIR das classes de umidade de equilíbrio higroscópico						Correto (%)
	90	80	70	60	50	40	
90	64	0	2	2	0	3	98,4
80	1	71	0	0	2	1	98,9

70	2	0	68	0	2	0	97,6
60	2	1	3	59	3	5	97,3
50	0	1	4	4	62	1	98,1
40	1	2	0	4	0	76	97,2
Total							**97,9**
LOO-CV	90	80	70	90	50	40	Correto (%)
90	64	0	2	2	0	3	96,8
80	1	71	0	0	2	1	98,7
70	2	0	68	0	2	0	96,8
60	2	1	3	59	3	5	95,2
50	0	1	4	4	62	1	97,3
40	1	2	0	4	0	76	95,6
Total							**97,9**

4. Conclusões

A umidade de equilíbrio aumentou com a umidade relativa e foi maior nos carvões produzidos a 800 °C, indicando maior capacidade de adsorção de água associada às alterações estruturais promovidas pela carbonização em temperaturas elevadas.

Os modelos PLS-R apresentaram desempenho moderado na predição da umidade de equilíbrio ($R^2cv = 0,57$), enquanto a PLS-DA apresentou elevada acurácia na classificação das espécies (>89%) e dos estados higroscópicos (>94%).

A espectroscopia NIR portátil associada à quimiometria mostrou-se uma ferramenta rápida e não destrutiva para o monitoramento da condição higroscópica do carvão vegetal, com potencial aplicação no controle de qualidade e na otimização de sistemas bioenergéticos.

5. Agradecimentos

Este estudo contou com o apoio do Laboratório Multiusuário de Biomateriais e Energia da Biomassa e do Núcleo de Estudos em Madeira (NEMAD) da Universidade Federal de Lavras (UFLA, Brasil). Esta pesquisa foi financiada, em parte, pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES, Brasil) – Código de Financiamento 001; pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq; Processo nº 406053/2022-7); e pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG; Processo nº APQ-05431-24).

6. Referências bibliográficas

Achata, E. M., Esquerre, C., O'Donnell, C. P., Gowen, A. A. (2015) Estudo sobre a aplicação de imagem química hiperespectral no infravermelho próximo para monitoramento do teor de umidade e atividade de água em sistemas de baixa umidade. Molecules 20(2): 2611–2621. https://doi.org/10.3390/molecules20022611.

Costa, L. J. (2020) Relação água/carvão vegetal de eucalipto produzido em diferentes temperaturas. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Viçosa, Viçosa–MG. https://locus.ufv.br//handle/123456789/27967.

Lima, M. D. R., Simetti, R., Assis, M. R., Trugilho, P. F., Carneiro, A. C. O., Bufalino, L., Hein, P. R. G., Protásio, T. P. (2020) Carvão vegetal de resíduos de exploração florestal oriundos do manejo florestal sustentável para usos industriais e domésticos na Amazônia brasileira. Biomass and Bioenergy 142: 105804. https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2020.105804.

Lima, M. D. R., Trugilho, P. F., Bufalino, L., Júnior, A. F. D., Ramalho, F. M. G., Protásio, T. P., Hein, P. R. G. (2022) Eficiência da espectroscopia no infravermelho próximo na classificação de resíduos de madeira amazônica para geração de bioenergia. Biomass and Bioenergy 166: 106617. https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2022.106617.

Nunes, C. A., Freitas, M. P., Pinheiro, A. C. M., Bastos, S. C. (2012) Chemoface: uma nova interface gratuita e amigável para quimiometria. Journal of the Brazilian Chemical Society 23: 2003–2010. https://doi.org/10.1590/S0103-50532012005000073.

Pasquini, C. (2018) Espectroscopia no infravermelho próximo: uma técnica analítica madura com novas perspectivas – uma revisão. Analytica Chimica Acta 1026: 8–36. https://doi.org/10.1016/j.aca.2018.04.004.

Ramalho, F. M. G., Hein, P. R. G., Andrade, J. M., Napoli, A. (2017) Potencial da espectroscopia no infravermelho próximo para distinguir carvão vegetal produzido de madeira plantada e nativa para fins energéticos. Energy & Fuels 31(2): 1593–1599. http://dx.doi.org/10.1021/acs.energyfuels.6b02446.

Santos, I. V., Carneiro, P. P. B., Dionísio, L. F. S., Raabe, J., Angelo, D. H., Rizzo, F. A., Paixão, M. V. C., Hein, P. R. G., Protásio, T. P. (2024) Cadeia produtiva de carvão vegetal a partir de resíduos de madeira do manejo florestal sustentável: um estudo de caso no pólo siderúrgico da região de Carajás. Nativa 12(2): 205–214. https://doi.org/10.31413/nat.v12i2.17032.

Silva, L. F. F., Castro, A. R. S., Oliveira, R. S., Silva, S. S., Pamplona, V. M. S., Barros, D. S., Nobre, J., Numazawa, S. (2020) Seleção de espécies, temperatura e tempo de carbonização na produção de carvão vegetal com resíduos madeireiros da Amazônia. Pesquisa Florestal Brasileira 40: e201801737. https://doi.org/10.4336/2020.pfb.40e201801737.

Wei, L., Peng, B., Liu, X., Ren, F., Zhang, L. (2021) Análise imediata inteligente de carvão baseada em espectroscopia no infravermelho próximo. Journal of Applied Spectroscopy 88(3): 645–652. https://doi.org/10.1007/s10812-021-01220-5.

Zam, J., Biwôlé, A., Eyinga, J., Fongnzossie, E., Bessike, G., Mouangue, R., Zobo, J. (2024) Determinação da qualidade de carvões vegetais como fonte de bioenergia em regiões tropicais úmidas da África Central: efeito do tipo de madeira carbonizada e do tempo de armazenamento. Biomass Conversion and Biorefinery. https://doi.org/10.1007/s13399-024-05763-3.

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Co-briquetagem de serragem de *Pinus* e casca de café para a produção de biocombustível sólido

Joy Aduralere Ogunsuyi[1]; Fabíola Martins Delatorre[1]; Merlindo Jacinto Manjate[1,3]; Paulo Renato Souza de Oliveira[1]; Atanásio Félix[1,2] Sabrina Soares da Silva[1]; Juliana Terezinha Santos da Cruz[1]; Ananias Francisco Dias Júnior[1]

[1] Universidade Federal do Espírito Santo (UFES), Departamento de Ciências Florestais e da Madeira. CEP 29550-000, Jerônimo Monteiro, ES, Brasil.
[2] Instituto de Investigação Agrária de Moçambique (IIAM), Delegação Regional Noroeste (DRNe), Posto Agrário de Mutuáli, CEP: 09-12-04, Malema, Nampula, Moçambique.
[3] Universidade Lúrio (UniLúrio), Faculdade de Ciências Agrárias, CEP 3300, Campus Unango, Distrito de Sanga, Niassa, Moçambique

Resumo: Este estudo avaliou as propriedades de briquetes produzidos a partir de uma mistura de serragem de *Pinus taeda* L. (PS) e casca de *Coffea arabica* L. (CF) em cinco proporções, compactados a 0,69 MPa e 80 °C. A umidade manteve-se estável (10,72%–15,73%), enquanto a densidade a granel aumentou até 246,69 kg/m³ com maiores proporções de casca de café. A densidade aparente atingiu seu valor máximo (1399,41 kg/m³) com 25% de casca de café, ao passo que a expansão volumétrica alcançou o pico (4,34 %) com 75 %. O aumento da proporção de casca de café reduziu o teor de materiais voláteis de 83,72 % para 67,66 %, mas elevou o teor de cinzas de 0,41 % para 10,23 %, carbono fixo de 16,69 % para 42,57 %. A incorporação de 25% de CF/PS proporciona o equilíbrio ideal entre estabilidade física e qualidade energética dos briquetes.
Palavras-chave: Resíduos; Valorização; Potencial bioenergético

Co-briquetting of *pine* sawdust and coffee husks for solid biofuel production

Abstract: This study evaluated the properties of briquettes made from *Pinus taeda sawdust* (PS) and *Coffea arabica* husk blended (CF) in five proportions, compacted at 0,69 MPa and 80°C. Moisture remained stable (10,72–15,73%), while bulk density increased up to 246.69 kg/m³ with higher coffee husk ratios. Apparent density reached its peak (1399.41 kg/m³) at 25% coffee husk, whereas volumetric expansion peaked (4,34%). Increasing coffee husk reduced volatile matter (83,72%-67,66%) but increased ash content (0,41%-10,23%) and fixed carbon (16,69%-42,57%). Incorporating 25% CF into PS yields the optimal balance of physical, mechanical, and energy quality.
Keywords: Wastes; Valorization; Bioenergetic potential

1. Introdução

Diante dos desafios ambientais e energéticos atuais, marcados pelo aumento da demanda por energia, pela dependência de combustíveis fósseis e pela necessidade de redução das emissões de gases de efeito estufa, cresce a busca por recursos renováveis e sustentáveis capazes de atender às demandas energéticas globais (Wang & Azam, 2024). Neste cenário, a produção de biocombustíveis a partir da biomassa tem se destacado como uma alternativa promissora para a diversificação da matriz energética e a valorização de resíduos lignocelulósicos. Entre as matérias-primas de maior potencial, destacam-se os subprodutos

florestais e agrícolas, como serragem de *Pinus* e cascas de café, têm demonstrado potencial como recursos valiosos para a conversão em bioenergia (Guo *et al*., 2024).

O Brasil gera anualmente volumes expressivos de resíduos florestais e agrícolas, o que reforça a necessidade de estratégias sustentáveis para o manejo e a valorização desses materiais. O processamento mecânico da madeira de *Pinus* gera de 3,5 a 5 milhões de m³ de resíduos por ano, dos quais a serragem fina representa centenas de milhares de metros cúbicos (Lin *et al*., 2024). Paralelamente, a cafeicultura projeta a geração de cerca de 6 milhões de toneladas de biomassa a partir da safra de 2025 (Winter *et al*., 2025). Por serem materiais de baixa densidade, as cascas de café apresentam alto potencial para a geração de bioenergia por meio do processo de densificação, reduzindo a dependência de combustíveis fósseis (Imdad *et al*., 2026).

A briquetagem transforma esses materiais de baixa densidade em combustíveis sólidos com maior densidade energética. A qualidade física e térmica do briquete final depende diretamente das características da biomassa, como composição química, teor de umidade, granulometria e condições de compactação. Estudos anteriores confirmam que a otimização desses fatores é essencial para maximizar a resistência mecânica e o desempenho energético do combustível (Seboka *et al*., 2025).

Pesquisas indicam que briquetes de *Pinus* sem aditivos possuem excelente aptidão bioenergética (Ramirez-Ramirez *et al*., 2021), e que a mistura de caules e galhos de café com madeira de *Pinus* supera a baixa resistência mecânica observada em briquetes feitos apenas com resíduos de café (Mendoza Martinez *et al*., 2019). No entanto, a combinação específica entre serragem de pinheiro e casca de café ainda é pouco explorada. Investigar essa mistura representa uma oportunidade promissora para otimizar processos de co-densificação e expandir as opções de biocombustíveis com elevado potencial energético.

Diante disso, este estudo teve como objetivo avaliar o efeito da incorporação de casca de café em briquetes produzidos a partir de serragem de *Pinus*, por meio da caracterização das propriedades físico-químicas e mecânicas, visando determinar o potencial desses resíduos lignocelulósicos para aplicação como biocombustível sólido.

2. Material e métodos

A biomassa de casca de café (*Coffea arabica* L.) e de serragem de pinheiro (*Pinus taeda* L.) foi investigada para a produção de briquetes. Inicialmente, a casca de café e a serragem de *Pinus* foram secas ao sol por três dias para reduzir o teor de umidade inicial. Após a secagem, os materiais foram classificados em peneira de 60 mesh para obter uma distribuição

granulométrica uniforme. A fração retida na peneira foi reservada para a determinação do teor de umidade, enquanto a fração mais fina foi utilizada para a caracterização imediata subsequente. Cinco briquetes foram produzidos para cada proporção estudada (0%, 25%, 50%, 75% e 100% casca de cafe). Os briquetes foram produzidos em uma prensa hidráulica a uma pressão de 0,69 MPa e uma temperatura de 80°C por 10 minutos, seguidos de resfriamento por 3 minutos.

O teor de umidade dos briquetes foi determinado de acordo com a metodologia da norma ASTM D-1762-84, após secagem em estufa das amostras até massa constante (ASTM, 2021). A densidade a granel da biomassa foi determinada pela razão entre a massa do material solto e o volume ocupado, de acordo com a norma ASTM D-5057-17 (ASTM, 2017). A expansão volumétrica dos briquetes foi determinada medindo-se o comprimento e o diâmetro com um paquímetro eletrônico e, posteriormente, subtraindo-se o volume inicial do volume medido após cinco dias de condicionamento, com base na metodologia de Dias Júnior *et al*. (2021). A densidade aparente do briquete foi expressa como a razão entre a massa do briquete e o seu volume (Dias Júnior *et al*., 2021).

A análise química imediata dos briquetes de cada tratamento experimental foi realizada em triplicata, seguindo os procedimentos recomendados pela norma ASTM D-1762-84, para determinar os teores de umidade, matéria volátil, carbono fixo e cinzas (ASTM, 2021).

Os dados foram analisados sob um delineamento inteiramente casualizado (DIC). A normalidade dos resíduos foi verificada pelo teste de Shapiro-Wilk ($\alpha = 0,05$). Em seguida, aplicou-se a análise de variância (ANOVA) e, quando constatadas diferenças significativas, foram ajustados modelos de regressão. A seleção dos modelos baseou-se na significância dos coeficientes e no coeficiente de determinação (R^2), adotando-se $p < 0,05$.

3. Resultados e discussão

Os valores de teor de umidade variaram de 15,73% a 10,72% para a casca de café e a serragem de *Pinus*, respectivamente. No entanto, a análise de variância demonstrou que não há diferença significativa entre as diversas proporções utilizadas. Esse resultado está em consonância com pesquisas anteriores de Yang *et al*. (2021), que registraram teores de umidade entre 9% e 10,3%, observando pouca variação após a inclusão de *Pinus*.

A densidade a granel diferiu significativamente entre as proporções de biomassa utilizadas na produção dos briquetes. Conforme apresentado na Figura 1A, essa propriedade

aumentou progressivamente com o incremento da casca de café, passando de 142,93 kg m^{-3}, na composição contendo apenas serragem de *Pinus*, para 246,69 kg m^{-3}, na biomassa composta exclusivamente por casca de café. Embora o aumento entre as proporções de 0% e 25% tenha sido menos acentuado, observou-se uma tendência crescente nas demais proporções avaliadas (Garcia *et al*., 2012).

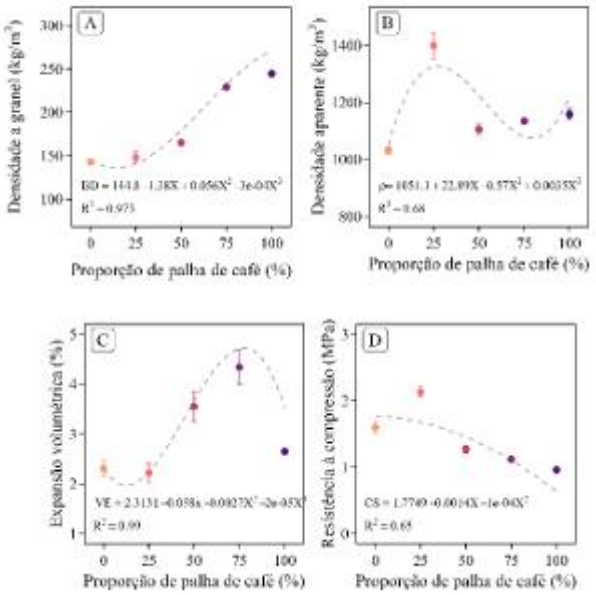


Figura 1 – Propriedades físicas e mecânica da biomassa/briquetes.

Os resultados de densidade aparente evidenciaram diferenças significativas entre os briquetes produzidos a partir de diferentes proporções de serragem de *Pinus* e casca de café, com valores variando de 1032,39 a 1399,41 kg m^{-3}. A densidade aparente aumenta acentuadamente até atingir um pico com 25% de casca de café, cai significativamente entre 25% e 75% e apresenta uma leve recuperação próxima a 100%. A densidade máxima observada com 25% sugere uma distribuição granulométrica ideal, na qual partículas finas de casca de café preenchem os espaços vazios entre as partículas da matriz, maximizando a densidade após a compactação (de Souza *et al*., 2020). Acima de 25%, o incremento de casca provavelmente gera microvazios internos, efeitos de expansão após a prensagem ou menor coesão entre as partículas, reduzindo a densidade aparente global (Garcia *et al*., 2012).

A expansão volumétrica dos briquetes apresentou diferenças significativas ($p < 0,05$), variando de 2,22% a 4,34%. Conforme ilustrado pelo modelo de regressão (Figura 1C), a expansão manteve-se relativamente baixa e estável na faixa de 0% a 25% de incorporação de casca de café, antes de aumentar rapidamente até um pico com 75% de substituição, seguido por um declínio acentuado em 100%. A expansão acentuada observada com 75% de inclusão é

determinada pela natureza porosa e hidrofílica das fibras da casca de café, as quais induzem uma maior recuperação elástica pós-compressão e relaxamento dimensional induzido pela umidade (Lubwama & Yiga, 2018).

A resistência à compressão dos briquetes (Figura 1D) varia de forma não linear com a adição de casca de café, iniciando em aproximadamente 1,6 MPa (0% de casca), atingindo o valor máximo de 2,1 MPa na mistura contendo 25% de casca de café e apresentando redução contínua até a substituição total (100%). O aumento inicial da resistência observado em 25% é atribuído a um efeito sinérgico de compactação, no qual as partículas mais finas da casca de café preenchem os espaços vazios entre as fibras da biomassa, melhorando o intertravamento mecânico e aumentando a área de contato entre as partículas (Alliah *et al*., 2023; Setter *et al*., 2020). Por outro lado, proporções superiores a 25% de casca de café reduzem a resistência à compressão devido ao aumento do teor de cinzas inorgânicas e à redução de agentes ligantes naturais ativos, como a lignina, comprometendo a ligação entre as partículas durante o processo de compactação (Liu *et al*., 2021; Setter *et al*., 2020). Embora normas internacionais como a ISO 17225-7 (2021) não especifiquem um valor preciso de resistência à compressão, optando em vez disso por testes de durabilidade mecânica, diretrizes industriais e pesquisas indicam um limite mínimo de 1,5 a 2,0 MPa para reduzir a produção de partículas finas durante o transporte (Kpalo et al., 2020).

O teor de material volátil nos briquetes variou de 67,66% a 83,72%. A Figura 2A mostra que o material volátil diminui linearmente à medida que a proporção de casca de café aumenta. Portanto, resíduos de café e madeira de *Pinus* apresentam-se como opções atraentes para processos de combustão. Esses valores são relativamente elevados, sugerindo uma combustão rápida dos briquetes, visto que um alto teor de matéria volátil nos materiais favorece uma combustão intensa (Mendoza Martinez *et al.*,2019)

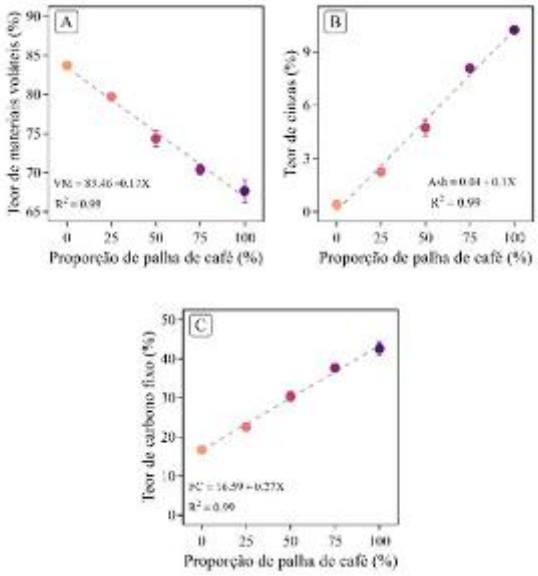


Figura 2 – Análise imediata das distintas proporções de biomassa usadas na produção dos briquetes.

Conforme apresentado na Figura 2B, o teor de cinzas das formulações avaliadas apresentou variação significativa ($p < 0,05$), com valores entre 0,41% e 10,23%. Observou-se uma relação linear positiva entre a proporção de casca de café incorporada e o teor final de cinzas dos briquetes. O aumento expressivo no teor de cinzas (atingindo 10,23%) sugere uma maior tendência à formação de escória e incrustações nas grelhas da caldeira e nas superfícies dos trocadores de calor(Brand *et al.*,2021). Consequentemente, formulações com maior proporção de casca exigirão maior frequência de limpeza, sistemas mais avançados de manuseio de cinzas e um controle rigoroso das temperaturas de operação, a fim de evitar perdas de eficiência térmica e a corrosão dos equipamentos. A incorporação progressiva de cascas de café elevou sistematicamente as frações inorgânicas totais de cinzas, reduzindo, concomitantemente, o rendimento em material volátil. Esse comportamento está em conformidade com padrões estabelecidos e relatados para a compactação de biomassa não lenhosa (Brand *et al*., 2021). Pesquisas sobre briquetes de casca de café demonstram que o aumento do teor de cinzas influencia diretamente a taxa de queima, a transferência de calor e a eficiência do combustível (Liu *et al*., 2021; Aliah *et al*., 2023).

O teor de carbono fixo variou de 16,69% a 42,57%. A Figura 2C mostra que o carbono fixo aumenta linearmente à medida que a proporção de casca de café aumenta. O teor de carbono fixo é inversamente proporcional ao teor de material volátil; ou seja, à medida que o carbono fixo aumenta, o material volátil diminui (Dias Junior *et al*., 2021). Segundo Linchinga

et al. (2025), um alto teor de carbono fixo indica que os materiais tendem a queimar mais lentamente, favorecendo um maior tempo de residência em comparação com combustíveis de baixo teor de carbono fixo.

Consequentemente, a mistura com 25% de casca de café representa a formulação ideal para obter a máxima durabilidade física, química e mecânica.

4. Conclusões

A co-densificação de serragem de *Pinus taeda* e casca de café (C. arabica) mostra-se uma estratégia eficaz para a produção de biocombustíveis sólidos de alta qualidade. A incorporação de 25% de casca de café apresentou o melhor desempenho global entre as formulações avaliadas, proporcionando maior densidade aparente, menor expansão volumétrica e melhorias nas propriedades mecânicas e energéticas dos briquetes. Além disso, essa composição favoreceu o aumento do teor de carbono fixo e a redução da matéria volátil, contribuindo para uma combustão mais prolongada. Embora maiores proporções de casca de café tenham elevado o teor de cinzas, a formulação selecionada apresentou um equilíbrio adequado entre estabilidade física, resistência mecânica, desempenho térmico e aproveitamento de resíduos agroindustriais.

5. Agradecimentos

Agradecimentos a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES – Código de financiamento 001), Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq - Chamada Universal nº. 18/2021, Chamada Bolsa de Produtividade em Desenvolvimento Tecnológico e Extensão Inovadora nº. 08/2022, Apoio a Projetos Internacionais de Pesquisa Científica, Tecnológica e de Inovação nº. 14/2023, Conhecimento Brasil – Rede de Colaboração nº.22/2024, Apoio a Projetos Internacionais de Pesquisa Científica, Tecnológica e de Inovação nº. 16/2024) e bolsa de doutorado TWAS/CNPq 2024.

6. Referências bibliográficas

Aliah, H., Rahmah, B. L., Sawitri, A., Iman, R. N., Syarif, D. G., Setiawan, A., & Nuryadin, B. W. (2023). Physical properties of briquettes composite from coffee husks (Coffea Arabica L) and Corncob (Zea Mays) for alternative fuel. *AIP Conf. Proc*. 2646, 060004. https://doi.org/10.1063/5.0114133

ASTM. (2017). Standard Test Method for Bulk Density of Loose Biomass (ASTM D5057-17). *ASTM International*. https://doi.org/10.1520/D5057-17

ASTM. (2021). Standard Test Method for Chemical Analysis of Wood Charcoal (ASTM D1762-84). *ASTM International*. https://doi.org/10.1520/D1762-84R21

Brand, M. A., Henne, R. A., Schein, V. A. S., & Pereira, E. R. (2021). Mapeamento dos problemas associados à geração e tratamento das cinzas na combustão da biomassa florestal em caldeira. *Ciência Florestal*, *31*(3), 1167-1192.

de Souza, H. J. P. L., Arantes, M. D. C., Vidaurre, G. B., Andrade, C. R., Carneiro, A. D. C. O., de Souza, D. P. L., & de Paula Protásio, T. (2020). Pelletization of eucalyptus wood and coffee growing wastes: Strategies for biomass valorization and sustainable bioenergy production. *Renewable Energy*, 149, 128-140. https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.12.015.

Dias Júnior, A.F., Suuchi, M.A., Sant'Anna Neto, A., da Silva, J.G.M., da Silva, Á.M., de Souza, N.D., Protásio, T.D.P. and Brito, J.O. (2021). Blends of charcoal fines and wood improve the combustibility and quality of the solid biofuels. *BioEnergy Research*, 14(1). 344-354. https://doi.org/10.1007/s12155-020-10179-8

García, R., Pizarro, C., Lavín, A. G., & Bueno, J. L. (2012). Characterization of Spanish biomass wastes for energy use. *Bioresource Technology*, 103(1), 249-258. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2011.10.004

Guo, J., Zhang, Y., Fang, J., Ma, Z., Li, C., Yan, M., Qiao, N., Liu, Y. and Bian, M., 2024. Reduction and reuse of forestry and agricultural bio-waste through innovative green utilization approaches: A review. *Forests*, 15(8), 1372. https://doi.org/10.3390/f15081372

ISO, E. (2021). 17225-1: 2021. *Solid Biofuels—Fuel Specifications and Classes—Part*, *1*.

Kpalo, S. Y., Zainuddin, M. F., Manaf, L. A., & Roslan, A. M. (2020). A review of technical and economic aspects of biomass briquetting. *Sustainability*, *12*(11), 4609. https://doi.org/10.3390/su12114609

Imdad, S., Yadav, M. D., Vaidya, P. D., & Joshi, J. B. (2026). Minor steps with major impact on biomass thermochemical conversion through drying and torrefaction. *Drying Technology*, 1-40. https://doi.org/10.1080/07373937.2026.2697268

Lichinga, K. N., Sikazwe, K., Elibariki, R., Masse, A. A., Kayumba, H. I., & Shija, H. (2025). Cleaner cooking solutions: Optimizing biomass briquettes to replace charcoal and mitigate climate change in Tanzania. *Scientific African*, 30, e03056. https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2025.e03056

Lin, M., Shan, L., Cao, Y., & Li, W. (2024). Innovation subjects impacting business model changes in Chinese wooden furniture manufacturers: an empirical study. *Forest Products Journal*, *74*(1), 72-87. https://doi.org/10.13073/FPJ-D-23-00042

Liu, J., Jiang, X., Cai, H., & Gao, F. (2021). Study of combustion characteristics and kinetics of agriculture briquette using thermogravimetric analysis. *ACS omega*, 6(24), 15827. https://doi.org/10.1021/acsomega.1c01249

Lubwama, M., & Yiga, V. A. (2018). Characteristics of briquettes developed from rice and coffee husks for domestic cooking applications in Uganda. *Renewable energy*, 118, 43-55. https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.11.003

Mendoza Martinez, C. L., Alves Rocha, E. P., Oliveira Carneiro, A. C., Borges Gomes, F. J., Ribas Batalha, L. A., Vakkilainen, E., & Cardoso, M. (2019). Characterization of residual biomasses from the coffee production chain and assessment the potential for energy purposes. *Biomass and Bioenergy*, 120, 68–76. https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2018.11.003.

Ramírez-Ramírez, M. A., Carrillo-Parra, A., Ruiz-Aquino, F., Pintor-Ibarra, L. F., & Rutiaga-Quiñones, J. G. (2021). Valorization of briquettes fuel using Pinus spp. sawdust from five regions of Mexico. *BioResources*, 16(2), 2249–2263. https://doi.org/10.15376/biores.16.2.2249-2263

Sarker, T. R., Nanda, S., Meda, V., & Dalai, A. K. (2023). Densification of waste biomass for manufacturing solid biofuel pellets: a review. *Environmental Chemistry Letters*, 21(1), 231-264. https://doi.org/10.1007/s10311-022-01510-0

Seboka, A. D., Morken, J., Adaramola, M. S., Ewunie, G. A., & Feng, L. (2025). Optimization of briquetting parameters and their effects on thermochemical fuel properties of biowaste briquettes. *Bioresource Technology*, 133277. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2025.133277

Setter, C., Ataíde, C. H., Mendes, R. F., & de Oliveira, T. J. P. (2020). Influence of particle size on the physico-mechanical and energy properties of briquettes produced with coffee husks. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(7), 8215–8223. https://doi.org/10.1007/s11356-020

Wang, J., & Azam, W. (2024). Natural resource scarcity, fossil fuel energy consumption, and total greenhouse gas emissions in top emitting countries. *Geoscience frontiers*, 15(2), 101757. https://doi.org/10.1016/j.gsf.2023.101757

Winter, S. G., Zanuncio, A. J. V., Carvalho, A. G., Ferreira, M. V., Lopes, O. P., Carneiro, A. D. C. O., & Araújo, S. D. O. (2025). Sustainable solid biofuel production from coffee byproducts: characterization and pelletization of husk and parchment. *Resources*, 14(12), 188. https://doi.org/10.3390/resources14120188

Yang, I., Cooke-Willis, M., Song, B., & Hall, P. (2021). Densification of torrefied Pinus radiata sawdust as a solid biofuel: effect of key variables on the durability and hydrophobicity of briquettes. *Fuel Processing Technology*, 214, 106719. https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2020.106719

Yank, A., Ngadi, M., & Kok, R. (2016). Physical properties of rice husk and bran briquettes under low pressure densification for rural applications. *Biomass and Bioenergy*, 84, 22-30. https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2015.09.015

.

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Como a temperatura de pirólise e a proporção de carvão vegetal afetam as propriedades mecânicas e químicas de biocompósitos de matriz poliéster?

Fabíola Martins Delatorre[1]; Merlindo Jacinto Manjate[1,2]; Bruna da Silva Cruz[1]; Sabrina Soares da Silva[1]; Tayná Rebonato Oliveira[1]; Paulo Renato Souza de Oliveira[1]; Gabriela Fontes Mayrinck Cupertino[3]; Ananias Francisco Dias Júnior[1]

[1] Universidade Federal do Espírito Santo (UFES), Departamento de Ciências Florestais e da Madeira. CEP 29550-000, Jerônimo Monteiro, ES, Brasil.
[2] Universidade Lúrio (UniLúrio), Faculdade de Ciências Agrárias, CEP 3300, Campus Unango, Distrito de Sanga, Niassa, Moçambique.
[3] Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA), Divisão de Engenharia de Energia, CEP: 60415- 513 – Fortaleza, CE – Brasil.

Resumo: Os biocompósitos de matriz poliéster reforçados com carvão vegetal apresentam potencial para o desenvolvimento de materiais sustentáveis com propriedades aprimoradas. Este estudo avaliou o efeito da temperatura de produção do carvão vegetal (400, 600 e 800 °C) e da proporção incorporada (10, 20 e 30% em massa) nas propriedades mecânicas e químicas dos biocompósitos. As amostras foram caracterizadas quanto à resistência à flexão, módulo de elasticidade, tração e espectroscopia de infravermelho com transformada de Fourier (FTIR). O compósito contendo 30% de carvão vegetal produzido a 800 °C apresentou os maiores valores de resistência à flexão (95,3 MPa) e módulo de elasticidade (4417,4 MPa), com incrementos de 14,5% e 45,7% em relação ao controle. As análises de FTIR evidenciaram alterações nos grupos funcionais, com aumento relativo das bandas associadas às estruturas aromáticas e redução de grupos alifáticos em temperaturas mais elevadas. Os resultados indicam que a temperatura de produção e o teor de carvão vegetal são fatores determinantes para o desempenho dos biocompósitos poliéster.
Palavras-chave: Conversão termoquímica; Bioreforço; Interação química.

How do pyrolysis temperature and charcoal proportion affect the mechanical and chemical properties of polyester-matrix biocomposites?

Abstract: Charcoal-reinforced polyester matrix biocomposites show potential for the development of sustainable materials with enhanced properties. This study evaluated the effect of charcoal production temperature (400, 600, and 800 °C) and incorporation ratio (10, 20, and 30 wt%) on the mechanical and chemical properties of the biocomposites. Samples were characterized regarding flexural strength, modulus of elasticity, tensile properties, and Fourier-transform infrared spectroscopy (FTIR). The composite containing 30% charcoal produced at 800 °C exhibited the highest values for flexural strength (95.3 MPa) and modulus of elasticity (4417.4 MPa), representing increases of 14.5% and 45.7%, respectively, compared to the control. FTIR analyses revealed changes in functional groups, with a relative increase in bands associated with aromatic structures and a reduction in aliphatic groups at higher temperatures. The results indicate that production temperature and charcoal content are determining factors for the performance of polyester biocomposites.

Keywords: Thermochemical conversion; Bioreinforcement; Chemical interaction.

Introdução

O uso de compósitos baseados em polímeros derivados de fontes fósseis tem gerado preocupações ambientais devido à dependência de recursos não renováveis, à geração de resíduos de difícil degradação e à possibilidade de liberação de compostos potencialmente nocivos durante seu ciclo de vida. Além disso, a produção dessas matrizes poliméricas está associada ao consumo de combustíveis fósseis e, consequentemente, à emissão de gases de efeito estufa, contribuindo para os impactos relacionados às mudanças climáticas (Alijagic et al., 2024; Baniasadi, Abidnejad, et al., 2025; Baniasadi, Äkräs, et al., 2025). Nesse contexto, os biocompósitos de base biológica surgem como uma alternativa para reduzir os impactos ambientais associados aos polímeros convencionais, por incorporarem componentes provenientes de fontes renováveis e reduzirem a dependência de matérias-primas fósseis (Baniasadi, Äkräs, et al., 2025).

Entre os materiais renováveis empregados como reforço, o carvão apresenta elevado potencial devido ao seu alto teor de carbono, estabilidade térmica e estrutura porosa, características que podem favorecer sua interação com matrizes poliméricas e contribuir para o desenvolvimento de compósitos mais sustentáveis e com propriedades aprimoradas (Baniasadi, Äkräs, et al., 2025; Yao et al., 2014). Entretanto, o desempenho desses materiais depende das características do carvão vegetal e das condições empregadas em sua produção, como temperatura de pirólise, além de fatores relacionados à incorporação na matriz, como tamanho de partícula, concentração e compatibilidade interfacial. As alterações promovidas durante a pirólise na estrutura química e morfológica do carvão vegetal, incluindo a formação de estruturas carbonáceas mais aromáticas, mudanças na porosidade e nos grupos funcionais superficiais, podem influenciar sua capacidade de interação com a matriz polimérica e, consequentemente, as propriedades finais dos biocompósitos.

Além disso, a quantidade de carvão vegetal adicionada deve ser otimizada, pois teores elevados ou inadequados podem prejudicar a dispersão das partículas e comprometer o desempenho mecânico do material (Baniasadi, Abidnejad, et al., 2025; Phiri et al., 2023). Com base nesses aspectos, a hipótese deste estudo é que o carvão vegetal produzido em diferentes temperaturas de pirólise e incorporado em distintas proporções à matriz poliéster promove alterações nas características químicas, físicas e mecânicas dos biocompósitos, devido às mudanças estruturais do material carbonáceo e às interações estabelecidas entre o reforço e a matriz polimérica. Dessa forma, este trabalho teve como objetivo avaliar a influência da

temperatura de produção do carvão vegetal e da sua concentração na matriz poliéster sobre as propriedades dos biocompósitos obtidos.

Material e métodos

2.1. Produção do carvão vegetal

Para a produção dos biocompósitos, foram utilizados carvões vegetais obtidos a partir de madeira de *Eucalyptus saligna* com 10 anos de idade. A biomassa foi previamente seca em estufa a 103 ± 2 °C até atingir massa constante e, posteriormente, triturada e peneirada para obtenção de partículas com granulometria de 0,841 mm. O carvão vegetal foi produzido por pirólise em forno mufla elétrico (Quimis, Diadema, Brasil), sob atmosfera com baixa disponibilidade de oxigênio e sem injeção externa de gás inerte. O processo foi conduzido com taxa de aquecimento de 10 °C min^{-1} até as temperaturas finais de 400, 600 e 800 °C, permanecendo por 2 h em cada condição experimental. O sistema de pirólise utilizado apresenta configuração previamente empregada em estudos semelhantes (Cupertino et al., 2024). Após a carbonização, o carvão vegetal foi resfriado naturalmente até a temperatura ambiente e, posteriormente, submetidos à moagem em moinho de bolas (Marconi MA-500, Piracicaba, Brasil) durante 3h, utilizando relação massa de bolas/material de 10:1 e velocidade de rotação de 300 rpm. Por fim, os materiais foram peneirados em malha de 250 mesh (0,056 mm) para uniformização da granulometria.

2.2. Produção e caracterização dos biocompósitos

Os biocompósitos foram produzidos utilizando resina poliéster insaturada UC 2120 AC PLUS (massa molecular Mn = 9 × 10^3 g mol^{-1}) como matriz polimérica, associada ao endurecedor 2154, catalisador butanox M-50, monômero de estireno e borracha de silicone branca (PS), todos fornecidos pela Redelease (São Paulo, Brasil). As formulações foram preparadas com diferentes teores de carvão vegetal (0, 10, 20 e 30% em massa) para cada temperatura de produção, sendo a formulação sem carvão utilizada como controle. A dispersão das partículas na matriz foi realizada por agitação mecânica a 300 rpm durante 3 min.

A cura dos corpos de prova foi realizada em reator pressurizado a 90 psi por 24 h, garantindo a completa polimerização da resina poliéster.

As propriedades mecânicas dos biocompósitos foram avaliadas em máquina universal de ensaios (EMIC, São José dos Pinhais, Brasil), por meio de testes de flexão e tração, conforme as normas ASTM D7264 (ASTM, 2021) e ASTM D3039, respectivamente.

A identificação dos grupos funcionais e das ligações químicas presentes nos biocompósitos foi realizada por Espectroscopia de Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR), utilizando um espectrômetro Bruker (Tensor 27, Bruker Optik GmbH, Ettlingen, Alemanha) equipado com acessório de Reflexão Total Atenuada (ATR). Os espectros foram obtidos na faixa espectral de 4000 a 600 cm^{-1}, com 32 varreduras.

2.3. Delineamento experimental e análise dos dados

Os dados foram obtidos em sete repetições e submetidos aos testes de normalidade de Shapiro-Wilk e homogeneidade de variâncias de Bartlett. A análise de variância (ANOVA) foi realizada em delineamento inteiramente casualizado, considerando um arranjo fatorial 3 × 3, com os fatores temperatura de pirólise do carvão vegetal (400, 600 e 800 °C) e proporção de carvão vegetal (10, 20 e 30%). Quando observadas diferenças significativas, foram ajustados modelos de regressão, selecionando-se o modelo de melhor ajuste com base na significância dos coeficientes e no R^2 ajustado. Os resultados foram avaliados com nível de significância de 5% e apresentados por meio de gráficos de contorno para representação das tendências de resposta. Medidas de dispersão baseadas no erro padrão foram utilizadas para auxiliar a interpretação dos resultados.

Resultados e discussão

A resistência a flexão, o módulo de elasticidade e a resistência à tração dos compósitos sem carvão vegetal (tratamento controle) foram de 83,2 (±0,27), 2399,7 (±231,07) e 51,6 (±0,71) MPa, respectivamente. O comportamento da resistência dos biocompósitos em função da temperatura de pirólise do carvão vegetal e da proporção de reforço é mostrado na Figura 1.

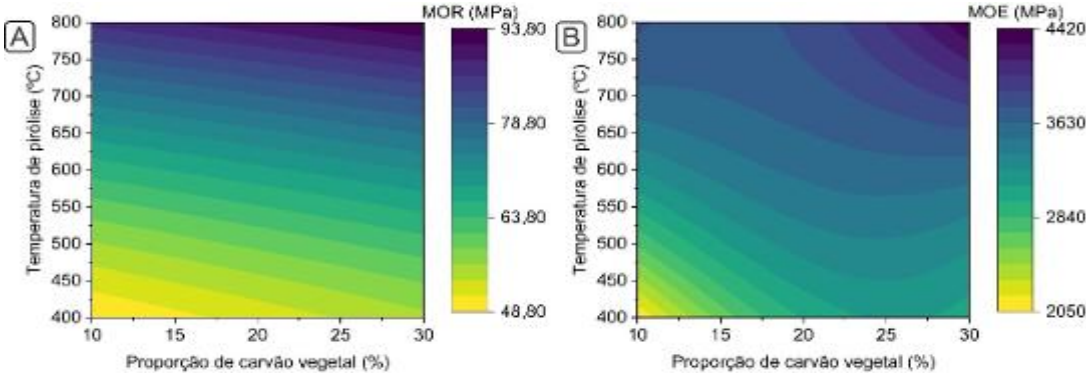


Figura 1 – Análise de flexão de biocompósitos produzidos utilizando carvão vegetal em diferentes temperaturas e proporções de pirólise como reforço, (A) resistência à flexão, (B) módulo de elasticidade.

A temperatura de produção do carvão vegetal e sua proporção na matriz poliéster influenciaram significativamente o comportamento mecânico dos biocompósitos. A resistência à flexão apresentou tendência crescente com o aumento da temperatura de pirólise (Figura 1A), indicando que carvões vegetais produzidos em condições térmicas mais elevadas proporcionaram maior capacidade de reforço. Para os compósitos contendo carvão vegetal obtido a 800 °C, foram observados valores de resistência à flexão de 86,0, 89,6 e 95,3 MPa para as proporções de 10, 20 e 30%, respectivamente. O tratamento com 30% de carvão vegetal produzido a 800 °C apresentou aumento de aproximadamente 14,5% em relação ao material controle (83,2 MPa), evidenciando o efeito positivo da incorporação do reforço.

O módulo de elasticidade (Figura 1B) aumentou de forma constante com o teor de carvão vegetal, seguindo um padrão semelhante ao da resistência à flexão. A fração de 30% apresentou o maior valor em todas as temperaturas testadas. Comparado ao controle (0% de carvão vegetal), os compósitos com 30% de reforço apresentaram aumentos de 21,19% (400 – 3044,1 MPa), 31,95% (600 – 3526,2 MPa) e 45,67% (800 – 4417,4 MPa). O melhor desempenho observado para o carvão vegetal produzido a 800 °C indica que temperaturas mais elevadas de pirólise favorecem a obtenção de um reforço com maior rigidez estrutural. Esse comportamento pode estar associado às modificações estruturais promovidas pela pirólise em temperaturas elevadas, que favorecem maior grau de carbonização, aumento da aromaticidade e maior organização das estruturas carbonáceas (Edwin et al., 2025; Kabir Ahmad et al., 2022; Sahu et al., 2025; Zhang et al., 2020). Essas características podem contribuir para o aumento da rigidez do carvão vegetal e favorecer a transferência de tensões entre a matriz polimérica e a fase de reforço durante o carregamento mecânico.

Diferentemente do observado para a resistência à flexão, a resistência à tração apresentou redução com o aumento da temperatura de produção do carvão vegetal utilizado como reforço (Figura 2).

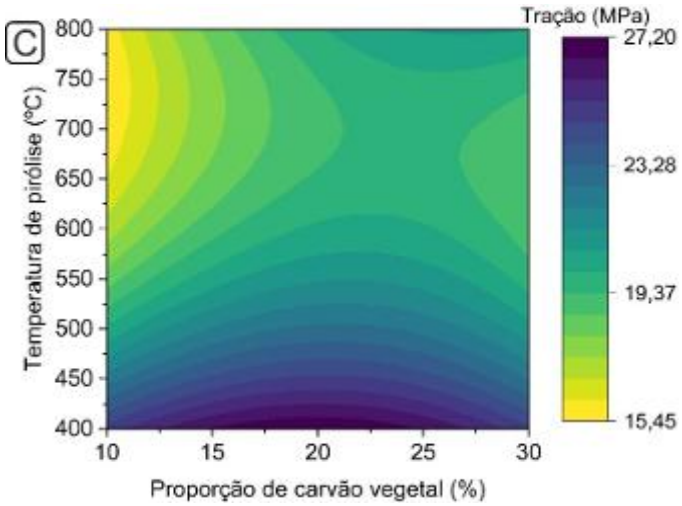


Figura 2 – Análise de tração de biocompósitos produzidos utilizando carvão vegetal em diferentes temperaturas e proporções de pirólise como reforço.

Para os biocompósitos contendo carvão vegetal produzido a 400 e 600 °C, os maiores valores de resistência a tração foram obtidos na proporção de 20%, correspondendo a 28,0 ± 0,88 MPa e 21,2 ± 1,44 MPa, respectivamente, porém ainda inferiores ao tratamento controle (51,6 ± 0,71 MPa). O compósito contendo 30% de carvão vegetal produzido a 800 °C apresentou o maior valor entre os materiais reforçados (22,5 ± 1,42 MPa). Esse comportamento pode estar relacionado à maior sensibilidade do ensaio de tração à presença de defeitos na interface reforço/matriz, como aglomeração de partículas, formação de vazios e baixa adesão interfacial, que favorecem a concentração de tensões e o início de falhas prematuras (Das, Bhattacharyya, & Sarmah, 2016; O. Das, Bhattacharyya, Hui, et al., 2016; O. Das et al., 2015; S. C. Das et al., 2021; Zhang et al., 2020). Assim, embora temperaturas mais elevadas de pirólise promovam maior organização da estrutura carbonácea e maior conteúdo da estrutura aromática do carvão vegetal, essas modificações não garantem, isoladamente, incrementos na resistência à tração quando limitações relacionadas à interface permanecem presentes (Das, Bhattacharyya, & Sarmah, 2016; Das, Bhattacharyya, Hui, et al., 2016; Das et al., 2021).

Resultados semelhantes foram observados por Ho et al. (2015), que verificaram redução da resistência à tração em compósitos de matriz poliácido lático reforçados com carvão vegetal de bambu produzido em temperaturas mais elevadas, associando esse comportamento à interação interfacial insuficiente entre o reforço e a matriz. No presente estudo, os resultados indicam que o efeito do carvão vegetal depende do tipo de solicitação mecânica aplicada. Enquanto o aumento da temperatura de produção favoreceu a rigidez e o desempenho sob

carregamento de flexão, a resistência à tração permaneceu limitada por mecanismos de falha associados à interface matriz/carvão vegetal. Além disso, a proporção de reforço mostrou-se um fator determinante para o comportamento mecânico dos biocompósitos, reforçando a importância da otimização do teor de carvão vegetal para obtenção de melhores propriedades (Zhang et al., 2020). A espectroscopia de infravermelho com transformada de Fourier (FTIR) foi empregada para caracterizar os grupos funcionais presentes no biocompósito controle e nos materiais contendo carvão vegetal produzido em diferentes temperaturas de pirólise. Os espectros obtidos na faixa de 4000–600 cm^{-1} são apresentados na Figura 3.

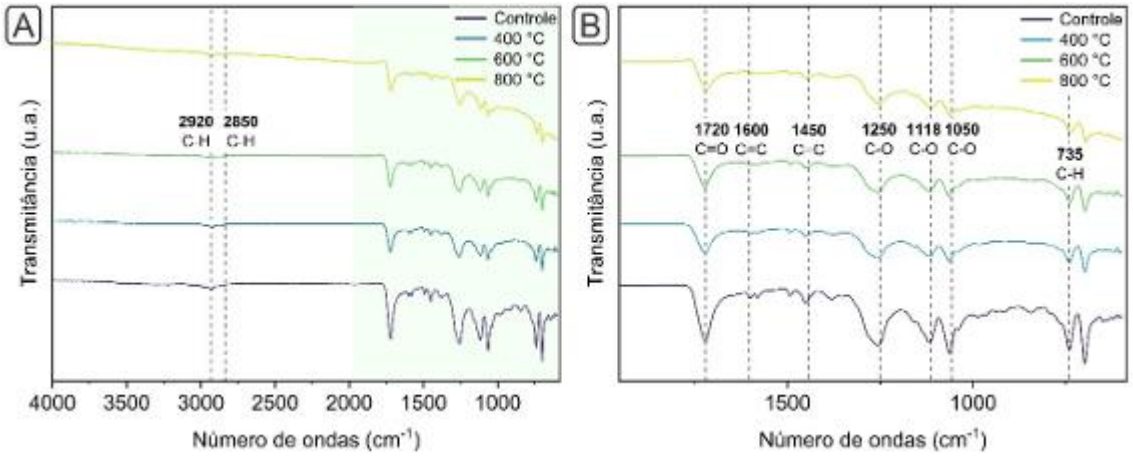


Figura 3 – (A) Espectros FTIR de compósitos de matriz de poliéster reforçados com carvão vegetal (30%) obtidos em diferentes temperaturas de pirólise; (B) vista ampliada da região de 1800–800 cm^{-1} para melhor visualizar as alterações induzidas pela temperatura de pirólise.

As bandas em 2920 e 2850 cm^{-1} correspondem ao estiramento das ligações C–H de grupos alifáticos presentes na matriz poliéster (Zhang, Xu, et al., 2020). A redução da intensidade dessas bandas com o aumento da temperatura de produção do carvão vegetal indica a degradação de estruturas alifáticas e a evolução da carbonização, associada a processos de desidrogenação e desoxigenação, que favorecem o aumento da aromaticidade da fase carbonácea (Zhang, Xu, et al., 2020). Essas alterações podem contribuir para maior estabilidade do reforço e interação com a matriz polimérica [38,40]. A banda próxima a 1720 cm^{-1} foi atribuída ao estiramento da ligação C=O, característica da resina poliéster (Nusyirwan et al., 2026). Sua permanência nos compósitos indica a preservação da estrutura química da matriz após a incorporação do carvão vegetal (Nusyirwan et al., 2026). As bandas em aproximadamente 1600 e 1450 cm^{-1}, associadas às ligações C=C de estruturas aromáticas, apresentaram maior intensidade nos materiais produzidos em temperaturas mais elevadas, indicando maior desenvolvimento de estruturas carbonáceas aromáticas (Nusyirwan et al.,

2026; Zhang, Xu, et al., 2020). As regiões entre 1250, 1118 e 1050 cm^{-1} estão relacionadas às vibrações C–O de grupos oxigenados presentes principalmente na matriz polimérica (Edozíuno & Akaluzia, 2024). Já as bandas entre 770 e 730 cm^{-1} correspondem às deformações das ligações C–H em estruturas aromáticas e segmentos alifáticos residuais (Fenta & Ali, 2024).

Conclusões

As características dos biocompósitos termofixos de matriz poliéster pode ser modificadas pelo controle das condições de produção do carvão vegetal e pela quantidade incorporada à matriz polimérica. O aumento da temperatura de pirólise promove transformações na estrutura do material carbonáceo, incluindo maior formação de estruturas aromáticas, redução de grupos contendo oxigênio e alterações na porosidade, favorecendo a interação entre o reforço e a matriz. A incorporação de carvão vegetal produzido em temperaturas elevadas, especialmente em maiores proporções, contribui para o aprimoramento das propriedades mecânicas dos biocompósitos. Além disso, a utilização de carvão vegetal obtido a partir de biomassa lignocelulósica representa uma estratégia sustentável para valorização de recursos renováveis, redução da dependência de materiais fósseis e desenvolvimento de materiais de maior desempenho alinhados aos princípios da economia circular.

Agradecimentos

Este estudo foi financiado pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES – Código Financeiro 001), Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq – Chamada Universal nº 18/2021, Chamada Bolsa de Produtividade em Desenvolvimento Tecnológico e Extensão Inovadora nº 08/2022, Apoio a Projetos Internacionais de Pesquisa Científica, Tecnológica e de Inovação nº 14/2023, Conhecimento Brasil – Rede de Colaboração nº 22/2024.

Referências bibliográficas

Alijagic, A., Kotlyar, O., Larsson, M., Salihovic, S., Hedbrant, A., Eriksson, U., Karlsson, P., Persson, A., Scherbak, N., Färnlund, K., Engwall, M., & Särndahl, E. (2024). Immunotoxic, genotoxic, and endocrine disrupting impacts of polyamide microplastic particles and chemicals. *Environment International*, *183*, 108412. https://doi.org/10.1016/j.envint.2023.108412

ASTM, American Society for Testing and Materials. *ASTM D 3039-17: Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials.*

ASTM, American Society for Testing and Materials (2021). *ASTM D 7264M-21: Standard Test Method for Flexural Properties of Polymer Matrix Composite Materials* (p. 11).

Baniasadi, H., Abidnejad, R., Cruz, C. D., Fathi, Z., Tammela, P., Kontturi, E., & Lizundia, E. (2025). Sustainable multifunctional foams for cold-chain packaging: Stabilizing polyethylene glycol with cellulose and pomegranate peel for antibacterial protection and temperature control. *Sustainable Materials and Technologies*, *43*, e01312. https://doi.org/10.1016/j.susmat.2025.e01312

Baniasadi, H., Äkräs, L., Paganelli, Z., Dammann, N., Abidnejad, R., Lipponen, S., Silvenius, F., Vahvaselkä, M., Ilvesniemi, H., Seppälä, J., & Niskanen, J. (2025). Can biochar fillers advance the properties of composites? Early-stage characterization and life cycle assessment of novel polyamide/biochar biocomposites. *Environmental Research*, *275*, 121446. https://doi.org/10.1016/j.envres.2025.121446

Cupertino, G. F. M., Silva, Á. M. da, Pereira, A. K. S., Delatorre, F. M., Ucella-Filho, J. G. M., Souza, E. C. de, Profeti, D., Profeti, L. P. R., Oliveira, M. P., Saloni, D., Luque, R., & Dias Júnior, A. F. (2024). Co-pyrolysis of biomass and polyethylene terephthalate (PET) as an alternative for energy production from waste valorization. *Fuel*, *362*, 130761. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2023.130761

Das, O., Bhattacharyya, D., Hui, D., & Lau, K.-T. (2016). Mechanical and flammability characterisations of biochar/polypropylene biocomposites. *Composites Part B: Engineering*, *106*, 120–128. https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.09.020

Das, O., Bhattacharyya, D., & Sarmah, A. K. (2016). Sustainable eco–composites obtained from waste derived biochar: a consideration in performance properties, production costs, and environmental impact. *Journal of Cleaner Production*, *129*, 159–168. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.04.088

Das, O., Sarmah, A. K., & Bhattacharyya, D. (2015). A novel approach in organic waste utilization through biochar addition in wood/polypropylene composites. *Waste Management*, *38*, 132–140. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.01.015

Das, S. C., Ashek-E-Khoda, S., Sayeed, Md. A., Suruzzaman, Paul, D., Dhar, S. A., & Grammatikos, S. A. (2021). On the use of wood charcoal filler to improve the properties of natural fiber reinforced polymer composites. *Materials Today: Proceedings*, *44*, 926–929. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.10.808

Edwin, T., Komala, P. S., Mera, M., Zulkarnaini, Z., & Jamil, Z. (2025). Coconut shell biochar as a sustainable approach for nutrient removal from agricultural wastewater. *Journal of Water and Land Development*, 177–184. https://doi.org/10.24425/jwld.2025.154261

Ho, M., Lau, K., Wang, H., & Hui, D. (2015). Improvement on the properties of polylactic acid (PLA) using bamboo charcoal particles. *Composites Part B: Engineering*, *81*, 14–25. https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2015.05.048

Kabir Ahmad, R., Anwar Sulaiman, S., Yusup, S., Sham Dol, S., Inayat, M., & Aminu Umar, H. (2022). Exploring the potential of coconut shell biomass for charcoal production. *Ain Shams Engineering Journal*, *13*(1), 101499. https://doi.org/10.1016/j.asej.2021.05.013

Phiri, R., Mavinkere Rangappa, S., Siengchin, S., Oladijo, O. P., & Dhakal, H. N. (2023). Development of sustainable biopolymer-based composites for lightweight applications from agricultural waste biomass: A review. *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research*, *6*(4), 436–450. https://doi.org/10.1016/j.aiepr.2023.04.004

Sahu, S. K., Sreekanth, P. S. R., Praveen Kumar, A., El-Rayyes, A., & Ayrilmis, N. (2025). Effect of Pyrolysis Derived Coconut Shell Biochar on the Mechanical, Thermal, Rheological, and Water Absorption Properties of PLA Composites. *International Journal of Thermophysics*, *46*(11), 164. https://doi.org/10.1007/s10765-025-03637-y

Yao, Y., Gao, B., Fang, J., Zhang, M., Chen, H., Zhou, Y., Creamer, A. E., Sun, Y., & Yang, L. (2014). Characterization and environmental applications of clay–biochar composites. *Chemical Engineering Journal*, *242*, 136–143. https://doi.org/10.1016/j.cej.2013.12.062

Zhang, Q., Zhang, D., Xu, H., Lu, W., Ren, X., Cai, H., Lei, H., Huo, E., Zhao, Y., Qian, M., Lin, X., Villota, E. M., & Mateo, W. (2020). Biochar filled high-density polyethylene composites with excellent properties: Towards maximizing the utilization of agricultural wastes. *Industrial Crops and Products*, *146*, 112185. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2020.112185

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

COMPACTAÇÃO DE RESÍDUOS LIGNOCELULÓSICOS PARA PRODUÇÃO DE PELLETS

Pedro Venâncio Wate[1]; Beatriz do Carmo Corrêa Lima[1]; Gustavo Augusto Senna do Nascimento[1]; Alisson Lara de Carvalho[1]; Douglas Lamounier Faria[1]

[1] Universidade Federal de Lavras – Departamento de Ciências Florestais

Resumo: O processo de peletização se destaca como uma alternativa eficiente para auxiliar na mitigação e minimização das emissões de gases do efeito estufa e mudanças climáticas, aumentando a densidade energética de biomassas lignocelulósicas em comparação ao seu estado *in natura*, melhorando seu uso como fonte de energia renovável. Assim, objetivou-se avaliar as características de pellets produzidos a partir de serragem de *Pinus* e cascas de café. Inicialmente, foi feita a analise fisico-quimica das biomassas *in natura*. Após isso, foi feita a peletização e os pelletes produzidos foram submetidos a caracterização fisico-química e de resistência mecânica. A peletização melhorou as propriedades físico-mecanicas da biomassa, tornando-a mais eficiente como biocombustível. Os pellets de *Pinus* apresentaram melhor estabilidade mecânica, enquanto os de casca de café mostraram maior ganho de densidade. Futuramente, estudos podem ser realizados para otimizar o processo, avaliando as emissões na combustão e testando misturas entre biomassas para melhorar as propriedades dos pellets.

Palavras-chave: Peletização; Resistência Mecânica; Sustentabilidade.

COMPACTION OF LIGNOCELLULOSIC RESIDUES FOR PELLET PRODUCTION

Abstract:

The pelletization process stands out as an efficient alternative to help mitigate and minimize greenhouse gas emissions and climate change; it increases the energy density of lignocellulosic biomass compared to its raw state, thereby enhancing its utility as a renewable energy source. This study aimed to evaluate the characteristics of pellets produced from *Pinus* sawdust and coffee husks. Initially, a physicochemical analysis of the raw biomass was conducted. Subsequently, pelletization was performed, and the resulting pellets underwent physicochemical and mechanical strength characterization. Pelletization improved the biomass's physical and mechanical properties, making it more efficient as a biofuel. *Pinus* pellets exhibited superior mechanical stability, whereas coffee husk pellets showed a greater increase in density. Future studies could focus on process optimization by evaluating combustion emissions and testing biomass blends to further improve pellet properties.

Keywords: Pelletization; Mechanical Strength; Sustainability

Introdução

A crescente demanda por fontes de energia sustentáveis e a necessidade de reduzir a dependência de combustíveis fósseis têm impulsionado o aproveitamento de resíduos agroindustriais e florestais para a produção de biocombustíveis sólidos, como os pellets. Nesse contexto, a peletização constitui uma alternativa tecnológica para a valorização de materiais lignocelulósicos, possibilitando o aumento da densidade aparente, a padronização das características físicas, além de facilitar o manuseio, o transporte e o armazenamento. Essas características favorecem a utilização dos pellets em sistemas de conversão termoquímica, como combustão e gaseificação, ampliando as possibilidades de aproveitamento energético de diferentes resíduos lignocelulósicos (FERREIRA et al., 2023).

A casca de café constitui um resíduo agroindustrial gerado em grandes volumes nas regiões produtoras e apresenta composição lignocelulósica e conteúdo energético que justificam seu aproveitamento na produção de biocombustíveis sólidos. Seu poder calorífico superior (PCS) pode apresentar valores na faixa de 18 a 20 MJ kg^{-1}, dependendo das características da matéria-prima e das condições de processamento. A utilização desse resíduo na forma peletizada representa, portanto, uma possibilidade de agregação de valor e de aproveitamento energético de um material frequentemente associado às cadeias produtivas do café (SOUZA et al., 2025).

De forma complementar, a serragem de Pinus constitui um importante resíduo da cadeia produtiva florestal e madeireira, apresentando características lignocelulósicas favoráveis à densificação e ao aproveitamento energético. A disponibilidade desse material, associada ao seu conteúdo energético e às características de sua composição química, torna sua utilização na produção de pellets uma alternativa relevante para a geração de biocombustíveis sólidos e para o aproveitamento mais eficiente dos resíduos provenientes do processamento da madeira.

Além das propriedades energéticas, a produção de pellets a partir desses resíduos contribui para a valorização de materiais lignocelulósicos e para a redução de perdas de recursos ao longo das cadeias agroindustrial e florestal. Dessa forma, o aproveitamento energético da casca de café e da serragem de Pinus pode contribuir para estratégias relacionadas à bioeconomia e à economia circular, especialmente em regiões caracterizadas pela expressiva produção de café e madeira e pela consequente geração desses resíduos (RIBEIRO et al., 2025).

Nesse contexto, o presente estudo tem como objetivo caracterizar e avaliar o desempenho energético de pellets produzidos individualmente a partir de casca de café e de

serragem de Pinus, considerando parâmetros físico-químicos, térmicos e mecânicos relevantes para sua utilização como biocombustíveis sólidos. Busca-se, ainda, analisar o comportamento termoquímico desses materiais, incluindo aspectos relacionados à estabilidade térmica, ao processo de combustão e às emissões gasosas, de modo a ampliar a compreensão sobre seu potencial de utilização energética. Por fim, os resultados obtidos serão comparados com os requisitos e limites estabelecidos por normas internacionais, especialmente a ISO 17225-2, visando avaliar a adequação dos pellets produzidos e sua viabilidade como alternativas renováveis para o aproveitamento energético de resíduos agroindustriais e florestais.

2. Material e métodos

Para a execução da pesquisa, a metodologia foi dividida em três etapas: caracterização das biomassas *in natura* obtida localmente nos produtores locais MG; processo de peletização das biomassas; caracterização dos pellets obtidos da etapa anterior. Todas as etapas estão explicitadas na Figura 1.



Figura 1 – Fluxograma da metodologia empregada no estudo

Amostras secas e trituradas das duas biomassas lignocelulósicas, sendo casca de café e pó de serragem da madeira de *Pinus*, foram utilizados para as posteriores análises. A matéria volátil foi determinada segundo a ASTM E872, enquanto o teor de cinzas foi obtido conforme a ASTM E1755. O carbono fixo foi calculado por diferença, segundo a expressão $CF = 100 - MV - CZ$, e a determinação da umidade das biomassas por metódo gravimétrico. Posterior a isso, foi feita análise química estrutural, obtendo os parâmetros de teor dos extrativos, teor de lignina solúvel e insolúvel. Como ultimas analises para as biomassas, foi

determinado o poder calorifico superior (PCS) e densidade a granel conforme a norma NBR 6922 (ABNT, 1981).

2.1. Caracterização fisico-química das biomassas lignocelulósicas

A caracterização quimica inciou a partir dos extratviso, determinados pelo método de extração com acetona seguindo o padrão da TAPPI T280 pm-99 (2000).O teor de lignina insolúvel foi determinado pelo método de Klason modificado, onde foi utilizado 0,35g de biomassa adicionado 3ml de ácido sulfurico 72%, a mistura foi levada para banho maria por 1h e após isso, foi autoclavada por 1h a 121°C (Gomide e Demuner, 1996), O teor de lignina solúvel foi obtido a partir do filtrado da lignina insoluvel, onde esse filtrado foi diluido e lido em espectrofotometro uv-vis em 205nm, conforme a metodologia sugerida Goldschimid (1971). A determinação da porcentagem de cinzas foi obtida em temperatura de 575°C, de acordo com a ASTM D1102-84 (2007). Para a determinação da densidade a granel usou-se a noma NBR 6922 (ABNT, 1981). A holocelulose foi determinada por diferença a partir da equação 1:

Equação 1:

$$Holocelulose(\%) = 100 - (Tlig + Text + Tcz)$$

- *Tlig*– Teor de lignina (%)
- *Text* – Teor de extrativos (%)
- *Tcz* – Teor de Cinzas (%)

2.2. Produção dos *pellets*

A compactação das biomassas lignocelulósicas foi realizada em uma peletizadora da marca Eng-Maq®, modelo 0200v, com capacidade para produção de 110kg/h-¹ e matriz plana horizontal com 6 mm de diâmetro. A temperatura do processo na peletizadora alcança entre 80 a 95°C, com uma pressão de compactação de, aproximadamente, 300 kgf cm-2. As biomassas foram peletizadas com a umidade de equilíbrio higroscópico.

2.3. Teste de resistência à ruptura (tensão a compressão a tração)

Pretendeu-se por meio do ensaio de resistência à ruptura, quantificar a carga de compressão dos pellets da casca de café e de *Pinus*. Para o efeito, separou-se 10 amostras de pellets em cada tipo de biomassa. Para o teste foi utilizado a máquina de ensaio universal, ajustada com uma célula de carga de 500 kg e velocidade de aplicação de carga 0,05 mm/min com ponto de interrupção em 20% de perda de resistência do material e anotou-se os valores

do Módulo de Elasticidade (MOE) e Módulo de Ruptura (MOR), fornecidos pela máquina de ensaio. A tensão a compressão a tração foi calculada usando a formula 2 abaixo indicado.

Equação 2:

$$\sigma = \frac{F}{A} = \frac{2\,xF}{(\pi xDxC)}$$

- σ – Tensão a compressão a tracção
- C – o comprimento do pellet
- D – Diâmetro pellet
- F – Força
- A – Área

2.4. Caracterização física dos pellets e análise imediata

Os pellets foram caracterizados a partir da umidade, densidade a granel, teor de cinzas, tamanho diametral e comprimento. A umidade foi determinada de acordo com a norma DIN EN 14774-1 (DIN, 2010), em estufa a 105±2ºC. Para a determinação da densidade a granel dos pellets, foi utilizado um tubo cilíndrico como recipiente. Com o auxílio de uma balança analítica com precisão de 0,1g, foi determinada a massa acondicionada no volume de cada amostra. A densidade a granel dos pellets foi obtida a partir da a massa pelo volume da amostra.

O teor de cinzas dos pellets foi determinado de acordo com a norma ASTM D1102-84 (2007), seguindo o mesmo protocolo de determinação de cinzas nas biomassas *in natura* descrito neste documento acima. O tamanho em diâmetro (mm) e comprimento (mm) dos pellets foram obtidos, de acordo com a norma DIN EN 16127 (DIN, 2012), com medição realizada em paquímetro digital.

3. Resultados e discussão

Na Tabela 1 é apresentado a caracterização química das biomassas de casca de café e de serragem de *Pinus* sp. *in natura*. Densidade a Granel e aparente (kg/m^3), Extrativos (%), Lignina Solúvel e Insolúvel (%) e Holocelulose (%), para a estimativa de vários parâmetros.

Tabela 1. Análise Química das biomassas *in natura* (Pinus e Casca de Café)

Biomassa	Variáveis	Unidade	*In natura*	Desvio Padrão

Pinus	**Densidade a Granel**	(kg/m^3)	249,73	14,93
	Densidade Aparente	(kg/m^3)	1.212,33	58,54
	Extrativos	(%)	10,34	0,59
	Lignina Insolúvel	(%)	26,64	1,22
	Lignina Solúvel	(%)	3,41	0,40
	Holocelulose*	(%)	79,50	0,01
Casca de Café	**Densidade a Granel**	(kg/m^3)	184,00	5,64
	Densidade Aparente	(kg/m^3)	1.501,77	517,36
	Extrativos	(%)	27,53	2,31
	Lignina Insolúvel	(%)	26,54	0,83
	Lignina Solúvel	(%)	0,59	0,04
	Holocelulose*	(%)	68,01	0,04

A partir dos dados, foi possível observar que a casca de café apresentou maior teor de extrativos (27,53%) em comparação ao Pinus (10,34%), indicando maior presença de compostos fenólicos, lipídios e substâncias aromáticas (Lu *et al.*, 2024). O teor de lignina insolúvel foi semelhante entre as biomassas (aproximadamente 26,5%), enquanto o *Pinus* sp. apresentou maior teor de lignina solúvel (3,41%) que a casca de café (0,59%).

Tabela 2. Análise imediata dos peletes (Pinus e Casca de Café)

Biomassa	Variáveis	Unidade	Pellets	Desvio Padrão
Pinus	**Diâmetro**	mm	6,17	0,15
	Comprimento	mm	21,8	1,13
	Umidade	(%)	8,78	0,37
	Densidade a granel	Kg/m^3	664,10	18,63
	Carga Máxima	N	714,56	361
	Tensão Máxima	MPa	3,39	0,36
	Cinzas	(%)	0,74	0,09
Casca de Café	**Diâmetro**	mm	6,29	0,14
	Comprimento	mm	20,70	1,19
	Umidade	(%)	14,93	1,13
	Densidade a granel	Kg/m^3	591,38	4,57
	Carga Máxima	N	100,20	10,54
	Tensão Máxima	MPa	0,38	0,03
	Cinzas	(%)	8,01	0,96

A densidade a granel foi superior para o Pinus (249,73 kg/m³) em relação à casca de café (184,00 kg/m³), esse parâmetro em valores altos favorece o armazenamento e transporte da biomassa. Entretanto, a densidade aparente da biomassa de casca de café foi mais elevada

(1.501,77 kg/m³), indicando maior energia por unidade de volume após compactação (PROTÁCIO et al., 2011).

A holocelulose foi mais abundante no Pinus (79,50%) do que na casca de café (68,01%), sugerindo maior potencial para processos de conversão termoquímica e bioquímica. Já o elevado teor de extrativos da casca de café pode aumentar o poder calorífico, mas também favorecer a formação de fumaça, escórias e resíduos durante a combustão.

Na análise imediata, o Pinus apresentou menor teor de cinzas (0,63%) e maior poder calorífico superior (17,5 MJ/kg) quando comparado à casca de café (6,26% de cinzas e 15,44 MJ/kg). Esses resultados indicam melhor qualidade energética do Pinus para produção de pellets.

3.1. Caracterização dos pellets

Os pellets foram produzidos utilizando peletizadora ENG-MAQ da Universidade Federal de Lavras. Visualmente, os pellets de Pinus apresentaram coloração mais clara e melhor integridade estrutural que os produzidos com casca de café.



Figura 3.: Aspectos de Pellets de Pinus (à esquerda) e de Casca de Café (à direita).

A peletização promoveu aumento significativo da densidade a granel. Os pellets de Pinus atingiram 664,10 kg/m³, superando o limite mínimo recomendado pela norma ENplus-A1 (600 kg/m³). Os pellets de casca de café alcançaram 591,38 kg/m³, valor ligeiramente inferior ao recomendado.

Os pellets de Pinus apresentaram diâmetro médio de 6,17 mm e comprimento de 21,8 mm, enquanto os de casca de café apresentaram 6,29 mm e 20,7 mm, respectivamente. Ambos se enquadram nos padrões dimensionais estabelecidos pela norma EN ISO 17225-2.

Quanto à umidade, os pellets de Pinus apresentaram valor de 8,78%, dentro da faixa recomendada para combustíveis sólidos densificados. Os pellets de casca de café apresentaram 14,93%, valor elevado que pode reduzir a eficiência energética, dificultar a ignição e comprometer o armazenamento.

A resistência mecânica apresentou diferenças expressivas entre os materiais. Os pellets de Pinus suportaram carga máxima de 714,56 N e tensão máxima de 3,39 MPa, demonstrando elevada integridade estrutural. Já os pellets de casca de café apresentaram apenas 100,20 N de carga máxima e 0,38 MPa de tensão máxima, indicando baixa resistência mecânica.

O teor de cinzas também diferenciou os materiais. Os pellets de Pinus apresentaram apenas 0,74%, compatível com padrões internacionais de qualidade, enquanto os pellets de casca de café apresentaram 8,01%, valor que pode causar maior acúmulo de resíduos, incrustações e necessidade de manutenção nos sistemas de combustão.

Durante o ensaio de compressão diametral, os pellets de Pinus apresentaram comportamento típico de ruptura, atingindo tensão máxima de 3,39 MPa. Já os pellets de casca de café sofreram deformação contínua sem ruptura definida, impossibilitando a obtenção de uma curva tensão-deformação adequada. Esse comportamento pode estar relacionado ao elevado teor de extrativos da biomassa, que favorece a peletização, mas reduz a formação de uma camada externa resistente, comprometendo a resistência mecânica do pellet.

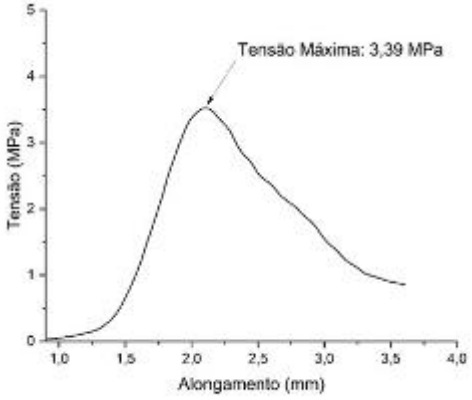


Figura 2.: Teste de compressão diametral Pellet de Pinus.

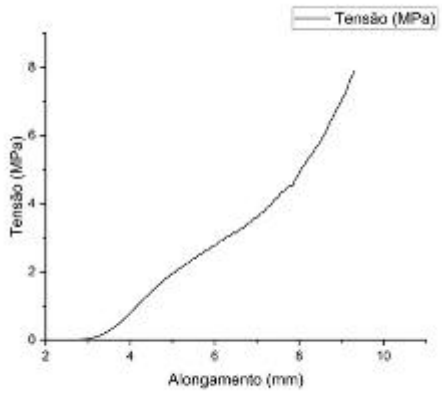


Figura 3.: Tensão deformação Pellet casca de café.

4. CONCLUSÕES

A densificação aumentou a densidade da biomassa *in natura*, porém os pellets de casca de café apresentaram menor resistência mecânica, elevado teor de cinzas (>8%) e densidade inferior a 600 kg/m³, limitando seu potencial energético e comercial. Os pellets de *Pinus* apresentaram menor teor de cinzas, embora ainda acima dos padrões internacionais, indicando a

necessidade de otimização do processo e seleção adequada da matéria-prima. De modo geral, a peletização apresenta potencial para a valorização energética de resíduos agroindustriais, mas a qualidade dos pellets depende das propriedades da biomassa e das condições de compactação. Estudos futuros devem avaliar temperatura, pressão, aditivos naturais, comportamento térmico e emissões durante a combustão para melhorar a resistência, estabilidade e viabilidade comercial dos pellets.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASTM D3173-11. **Standard Test Method for Moisture in Analysis Sample of Coal and Coke**.

ASTM D1102-84. **Standard Test Method for Ash in Wood**.

ASTM D5291-16. **Standard Test Method for Instrumental Determination of Carbon, Hydrogen, and Nitrogen in Petroleum Products and Lubricants**. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2016.

ASTM D664-18e2. **Standard Test Method for Acid Number of Petroleum Products by Potentiometric Titration. West Conshohocken**, PA: ASTM Internationnal, 2018.

ASTM D664-18e2. **Standard Test Method for Heat of Combustion of Liquid Hydrocarbon Fuels by Bomb Calorimeter**. West Conshohocken, PA: ASTM Internationnal, 2020.

ASTM D445-19. **Standard Test Method for Kinematic Viscosity of Transparent and Opaque Liquids**. West Conshohocken, PA: ASTM Internationnal, 2019.

ASTM E203-16. **Standard Test Method for Water Using Volumetric Karl Fischer Titration**. West Conshohocken, PA: ASTM Internationnal, 2016.

CARNEIRO, A. De C. O.; PROTÁSIO, T. de P.; TRUGILHO, P. F.; LIMA, J. T. de. *Potencial energético da madeira e de resíduos lignocelulósicos*. **Ciencia Florestal**, Santa Maria. V, 23, n. 2, p. 491-502, 2013.

DÍAZ-RAMÍREZ, M.; HERNÁNDEZ, J. A.; ROMERO, R. J. *Evaluation of agro-industrial biomasss for fuel pellets: Physical, chemical and combustion properties*. **Renewable energy**, v. 190, p. 246-256, 2022.

CZEKAŁA, W. *et al*. Waste-to-energy: **Biogas potential of waste from coffee production and consumption**. ***Energy***, v. 276, 127604, 2023. ISSN 0360-5442. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.127604.

FERREIRA, G.; BRITO, F.; CORREIA, N.; PAES, J. **Resíduos de biomassa florestal para produção de combustíveis sólidos compactados: uma revisão contextual**. ***Licuri***, 2023. DOI: 10.58203/Licuri.21893.

FERREIRA, I. G. M. et al. *Mapa dos produtores brasileiros de biocombustíveis: Pellets*. 2023. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/329786215. Acesso em: 03 ago. 2025.

KIM, J.; PARK, S.; CHOI, Y. **Emission characteristics and energy potential of coffee husk and wood pellet blends**. *Applied Sciences*, v. 14, n. 3, p. 1132, 2024. https://doi.org/10.3390/app14031132

OLIVEIRA, TIAGO JOSÉ PIRES de; LIMA, ANDRÉA REGINA; SANTOS, LETÍCIA R. dos. Propriedades fisica-mecanicas e nergetica de pellets produzidos com casca de café. Revista Ciência Agronômica, Fortaleza, v. 52, n. 4, p. 1-9, 2021. DOI: 10.5935/1806-6690.20210065

PROTÁSIO, T. de P.; TRUGILHO, P. F.; NEVES, T. A.; et al. *Estimativa da densidade energética de pellets de madeira*. **Ciência da Madeira (Bauru)**, v. 2, n. 2, 118-129, 2011.

PROTÁSIO, T. de P.; TRUGILHO, P. F.; NEVES, T. A.; et al. *Correlação entre características químicas e energéticas de resíduos lignocelulósicos para fins de compactação*. **Revista Árvore**, v. 38, n 3, p. 543-551, 2014.

PROTÁSIO, T. de P.; TRUGILHO, P. F.; LIMA, J. T. de; et al. *Qualidade dos pellets de biomassa florestal e agrícolas*. Revista **Ciência Florestal,** v. 23, n. 1, p. 171-182, 2013.

SÁ, I. A. *et al*. **Evaluating the quality of wood waste pellets and environmental impact mitigation for decentralized energy recovery in the Amazon**. ***Renewable Energy***, v. 231, 120929, 2024. ISSN 0960-1481. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.renene.2024.120929.

SITTER, CARINE; SARTORI, MARCIO MORESCHI PIRES; SEVERO, EDISON TADEU DIAS. **Qualidade física e energética de pellets de biomassa vegetal**. Floresta e Ambiente, Seropédica, v. 27, n. 4, p. e20200056, 2020. Doi:10.1590/2179-8087.00562020.

SOUZA, H. J. P. L. *et al*. **Pelletization of eucalyptus wood and coffee growing wastes: Strategies for biomass valorization and sustainable bioenergy production**. ***Renewable Energy***, v. 149, p. 128-140, 2020. ISSN 0960-1481. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.12.015.

SOUZA, C. F.; MENEZES, L. C.; OLIVEIRA, D.A. **Efeitos da composição e granulometria sobre as propriedades energéticas de pellets de biomassa**. *Fuel*, v. 352, p. 128936, 2025. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2024.128936

RIBEIRO, M. J.: CARDOSO, L. A.; MORAIS, R. L. **Valorização energética de resíduos lignocelulósicos: aplicações na economia circular**. *Applied Sciences*, v. 15, n. 5, p. 2458, 2025. https://doi.org/10.3390/app15052458

Comportamento de combustão de pellets produzidos a partir de resíduos lignocelulósicos e agroindustriais: influência da composição química e energética

Valdenia Medeiros de Araújo[1]; Genilson Maia corrêa[1]; Elvis Vieira dos Santos[1]; Thalles Loiola Dias[1]; Paulo Fernando Trugilho[1]; Paulo Ricardo Gherardi Hein[1], Thiago de Paula Protásio[1]

[1] Universidade Federal de Lavras (UFLA), Departamento de Ciências Florestais, Lavras, Minas Gerais, 37.203-202, Brasil

Resumo: A valorização energética de resíduos lignocelulósicos e agroindustriais constitui uma estratégia promissora para ampliar o uso de fontes renováveis e promover o aproveitamento sustentável de subprodutos. Neste contexto, este trabalho teve como objetivo avaliar a combustibilidade de pellets produzidos a partir de serragem de Pinus sp. e casca de café, relacionando o desempenho na combustão às suas propriedades físicas, químicas e energéticas. As biomassas foram secas, moídas e peletizadas em equipamento laboratorial. Os pellets foram caracterizados quanto à densidade unitária, teor de lignina, composição química imediata e poder calorífico superior (PCS). A combustibilidade foi avaliada por meio do monitoramento simultâneo da temperatura e da perda de massa durante a combustão. Os pellets de casca de café apresentaram maior densidade unitária (1193 kg m^{-3}), teor de lignina (31,39%) e carbono fixo (21,08%) em comparação aos pellets de Pinus sp., que apresentaram maiores teores de materiais voláteis (82,81%) e PCS (21,76 MJ kg^{-1}). Durante a combustão, os pellets de Pinus atingiram o pico de temperatura mais rapidamente, indicando maior intensidade de queima na fase inicial. Por outro lado, os pellets de casca de café mantiveram temperaturas elevadas por mais tempo e apresentaram combustão mais estável, comportamento associado à maior densidade, ao maior teor de lignina e ao maior conteúdo de carbono fixo. Os resultados demonstram o elevado potencial da casca de café para a produção de pellets destinados a aplicações bioenergéticas que requerem maior estabilidade térmica e maior tempo de combustão, contribuindo para o aproveitamento energético sustentável de resíduos da cadeia cafeeira.

Palavras-chave: Biomassa densificada; Bioenergia; Resíduos agroindustriais; Combustão; Pellets.

Combustion behavior of pellets produced from lignocellulosic and agro-industrial waste: influence of chemical and energy composition.

Abstract: Energy recovery from lignocellulosic and agro-industrial waste has emerged as a promising strategy to increase the share of renewable sources in the energy matrix and promote the sustainable use of by-products. In this context, this work aimed to evaluate the combustibility of pellets produced from *Pinus* sp. sawdust and coffee husks, correlating combustion performance with their physical, chemical, and energy properties. The biomasses were dried, ground, and pelletized using laboratory equipment. The pellets were characterized in terms of unit density, lignin content, immediate chemical composition, and higher heating value (HHV). Combustibility was evaluated by simultaneously monitoring temperature and mass loss during combustion. Coffee husk pellets showed higher unit density (1193 kg m^{-3}),

lignin content (31.39%), and fixed carbon (21.08%) compared to pine pellets, which showed higher volatile matter content (82.81%) and HV (21.76 MJ kg^{-1}). During combustion, pine pellets reached peak temperature more quickly, showing greater burning intensity in the initial phase. In contrast, coffee husk pellets maintained high temperatures for longer periods and showed more stable combustion, a behavior associated with higher density, higher lignin content, and higher fixed carbon content. The results demonstrate that coffee husk has high potential to produce pellets intended for bioenergy applications that demand greater thermal stability and prolonged combustion time, constituting a viable alternative for the energy use of residues from the coffee chain.

Keywords: Densified biomass; Bioenergy; Agro-industrial waste; Combustion; Pellets.

1. Introdução

A crescente demanda por fontes renováveis de energia e a necessidade de reduzir a dependência de combustíveis fósseis têm impulsionado o aproveitamento energético de resíduos lignocelulósicos e agroindustriais. Nesse contexto, a biomassa destaca-se como uma alternativa sustentável devido à sua ampla disponibilidade, caráter renovável e potencial para geração de energia com menores emissões líquidas de carbono. Entre as tecnologias empregadas para otimizar o aproveitamento energético desses materiais, a peletização tem recebido crescente atenção por promover o aumento da densidade energética, facilitar o armazenamento e transporte e melhorar a eficiência dos processos de combustão (Stachowicz et al., 2025; Palamanit et al., 2023; Sugebo, 2022).

A serragem de *Pinus* é uma das principais matérias-primas utilizadas na produção de pellets devido à sua elevada disponibilidade no setor florestal, baixo teor de cinzas e boas propriedades de compactação. Por outro lado, a casca de café representa um dos principais resíduos da agroindústria cafeeira, cuja geração ocorre em grandes volumes nos países produtores. A utilização energética desse resíduo contribui para a redução de passivos ambientais e para a agregação de valor a subprodutos frequentemente subutilizados (Sugebo, 2022; Stachowicz et al., 2025).

A qualidade dos pellets como combustível sólido está diretamente relacionada às suas propriedades físicas, químicas e energéticas, que influenciam o desempenho durante a combustão. Nesse sentido, parâmetros como teor de umidade, densidade, composição imediata e poder calorífico exercem papel fundamental na determinação da eficiência energética e do comportamento do combustível em sistemas de conversão térmica (Larsson et al., 2024).

Entre os métodos de avaliação do potencial energético de biocombustíveis sólidos, os ensaios de combustibilidade permitem analisar características relacionadas à ignição,

propagação da chama, taxa de queima e estabilidade da combustão. Essas informações são essenciais para a seleção de matérias-primas e para o desenvolvimento de combustíveis renováveis com maior eficiência e melhor desempenho operacional (Yu et al., 2021).

Diante do exposto, o objetivo deste trabalho foi avaliar a combustibilidade de pellets produzidos a partir de casca de café e serragem de *Pinus*, visando verificar o potencial energético dessas biomassas para aplicações bioenergéticas. Especificamente, buscou-se: i) produzir e caracterizar pellets de casca de café e serragem de *Pinus*; ii) determinar suas propriedades físicas, químicas e energéticas; e iii) avaliar os parâmetros de combustibilidade dos pellets visando comparar o desempenho dos diferentes biocombustíveis sólidos.

2. Material e métodos

Foram utilizados resíduos de serragem de *Pinus* sp. e casca de café provenientes da Universidade Federal de Lavras (UFLA). As biomassas foram secas, moídas e classificadas granulometricamente para produção dos pellets.

Os pellets foram produzidos em uma peletizadora de escala laboratorial ENG-MAQ (modelo ENG 0200V), com capacidade nominal de até 110 kg h^{-1}. O equipamento é equipado com matrizes intercambiáveis que permitem o ajuste da taxa de compactação (baixa, média e alta) e a obtenção de pellets com diâmetros de 6 ou 8 mm, possibilitando o controle das condições de densificação. Os pellets produzidos foram posteriormente caracterizados quanto à densidade unitária. O teor de lignina foi determinado pelo método Klason modificado, conforme a NBR 7989 (ABNT, 2010). A análise imediata foi realizada segundo a ASTM D1762-84, determinando-se os teores de materiais voláteis, cinzas e carbono fixo. O poder calorífico superior (PCS) foi determinado em bomba calorimétrica, conforme a ASTM E711-87.

A combustibilidade dos pellets foi avaliada pelo método proposto por Quirino e Brito (1991). Para a realização do ensaio, foram utilizadas amostras contendo aproximadamente 50 g de pellets, submetidas à combustão utilizando álcool etílico como material iniciador. Os pellets empregados nos ensaios apresentavam diâmetro nominal de 6 mm, conforme a matriz de compactação utilizada, e tiveram suas dimensões individuais (diâmetro e comprimento) previamente determinadas para o cálculo da densidade unitária. Durante o processo de combustão, a temperatura e a variação da massa da amostra foram monitoradas em intervalos regulares de um minuto, permitindo a determinação da porcentagem de massa consumida, da massa remanescente e da taxa de perda de massa ao longo da queima. Os dados obtidos foram

utilizados para avaliar o comportamento de combustão dos pellets e determinar seu desempenho energético, por meio do monitoramento simultâneo da temperatura e da perda de massa durante a combustão. A partir das curvas obtidas, foi analisado o comportamento de combustão dos materiais, correlacionando os resultados com a densidade unitária, a composição química imediata, o teor de lignina e o poder calorífico superior.

Os dados obtidos foram submetidos à análise exploratória, seguida da verificação da normalidade (teste de Shapiro–Wilk) e da homogeneidade das variâncias (teste de Levene). Quando atendidos os pressupostos, as médias foram comparadas por análise de variância (ANOVA) seguida do teste de Tukey ($\alpha = 0,05$). Quando os pressupostos não foram atendidos, utilizou-se o teste de Kruskal–Wallis seguido do teste de Dunn ($\alpha = 0,05$).

3. Resultados e discussão

Os pellets produzidos a partir da casca de café apresentaram densidade unitária média de 1193 kg m^{-3}, superior à observada para os pellets de *Pinus* (1119 kg m^{-3}). A maior compactação da biomassa pode influenciar diretamente a transferência de calor e a difusão de oxigênio durante a combustão, contribuindo para uma queima mais lenta e homogênea. Os resumos dos dados estão apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 – Características físicas e químicas dos pellets de serragem de *Pinus* e casca de café

Propriedade	Serragem de *Pinus*	Casca de café
Densidade unitária (kg m^{-3})	1121,41 ± 50,74	1189,96 ± 52,85
Lignina total (b.s %)	29,43 ± 0,35 b	31,39 ± 0,15 a
Materiais voláteis (b.s %)	82,81 ± 0,18 a	73,04 ± 0,24 b
Cinzas (b.s %)	0,40 ± 0 b	5,88 ± 0 a
Carbono fixo (b.s %)	16,79 ± 0,18 b	21,08 0,28 a
PCS (MJ kg^{-1})	21,76 ± 0,06	19,28 ± 0,38

O teor de lignina total diferiu significativamente entre as biomassas ($F_{1,4} = 81,27$; $p < 0,001$). A casca de café apresentou maior teor de lignina (31,39 ± 0,15%) em comparação ao Pinus (29,43 ± 0,35%). O teste de Tukey confirmou diferença significativa entre os tratamentos ($p < 0,001$). Os pressupostos de normalidade dos resíduos (Shapiro-Wilk, $W = 0,983$; $p = 0,966$) e homogeneidade das variâncias (Bartlett, $p = 0,298$) foram atendidos.

O teor de materiais voláteis diferiu significativamente entre as biomassas ($p < 0,001$). Os pellets de Pinus apresentaram maior teor de materiais voláteis (82,80 ± 0,80%) em comparação aos pellets de casca de café (73,00 ± 1,04%). A análise de variância indicou efeito significativo do tratamento sobre essa propriedade ($F = 332,10$; $p < 0,001$).

Os resultados para o teor de cinzas indicaram diferença significativa entre os tratamentos ($F = 4328$; $p < 0,001$). Os pellets de casca de café apresentaram teor médio de cinzas de 7,01 ± 0,09%, significativamente superior ao observado para os pellets de Pinus, que apresentaram 0,259 ± 0,153%. Os resíduos apresentaram distribuição normal (Shapiro-Wilk, $W = 0,861$; $p = 0,191$) e homogeneidade das variâncias foi verificada pelo teste de Bartlett ($\chi^2 = 0,442$; $p = 0,506$).

O teor de carbono fixo diferiu significativamente entre os tratamentos ($F = 79,87$; $p < 0,001$). Os pellets de casca de café apresentaram maior teor médio de carbono fixo (21,08 ± 0,90%), enquanto os pellets de Pinus apresentaram 16,79 ± 0,76%. Os resíduos apresentaram distribuição normal (Shapiro-Wilk, $W = 0,912$; $p = 0,227$) e as variâncias foram homogêneas entre os tratamentos (teste de Bartlett, $\chi^2 = 0,125$; $p = 0,723$).

Para o poder calorífico superior (PCS), as determinações foram realizadas em duplicata para cada tratamento. Dessa forma, os resultados foram apresentados como média ± desvio-padrão, sem aplicação de análise de variância, uma vez que o número reduzido de repetições não permite uma estimativa robusta da variabilidade experimental e dos pressupostos necessários à análise estatística. Os pellets de casca de café apresentaram PCS médio de 19,28 ± 0,38 MJ kg^{-1}, enquanto os pellets de Pinus apresentaram 21,76 ± 0,07 MJ kg^{-1}.

A Figura 1 apresenta o perfil de temperatura dos pellets durante a combustão. Observa-se que ambos os materiais apresentaram rápida elevação da temperatura nos primeiros minutos do ensaio, atingindo valores máximos próximos de 145 °C. Os pellets de *Pinus* alcançaram o pico térmico mais rapidamente, aproximadamente aos 3 minutos de combustão, comportamento associado ao maior teor de materiais voláteis (82,81%), que favorece a liberação de gases combustíveis e acelera a fase inicial da queima. Em contrapartida, os pellets de casca de café apresentaram redução mais gradual da temperatura após o pico, mantendo temperaturas mais elevadas entre os minutos 4 e 8. Esse comportamento pode ser atribuído ao maior teor de lignina (31,39%), carbono fixo (21,08%) e densidade unitária (1193 kg m^{-3}), características que favorecem a estabilidade térmica e prolongam a fase de combustão do material.

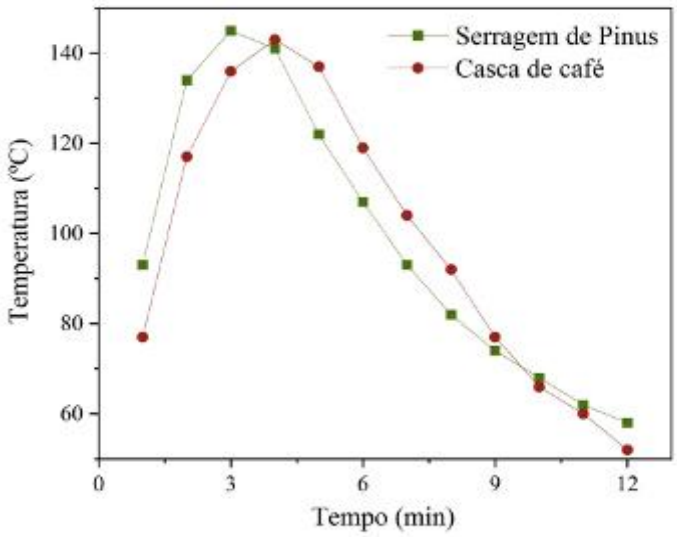


Figura 1 − Perfil de temperatura durante a combustão dos pellets produzidos com serragem de *Pinus* e casca de café.

A perda de massa ao longo do ensaio é apresentada na Figura 2. Ambos os materiais apresentaram intensa degradação nos três primeiros minutos, período em que ocorreu a maior liberação de voláteis. Após essa etapa, observou-se redução na taxa de consumo de massa, especialmente para os pellets de casca de café. Ao final do ensaio, a massa remanescente foi inferior para a casca de café, indicando combustão mais completa do material. Embora essa biomassa apresente maior teor de cinzas, os maiores conteúdos de lignina e carbono fixo parecem ter contribuído para a manutenção da combustão por períodos mais prolongados, favorecendo a conversão da matéria orgânica. Os resultados corroboram observações reportadas por Setter et al. (2020), que verificaram maior estabilidade térmica e comportamento de combustão mais uniforme em pellets produzidos a partir de resíduos agroindustriais densificados.

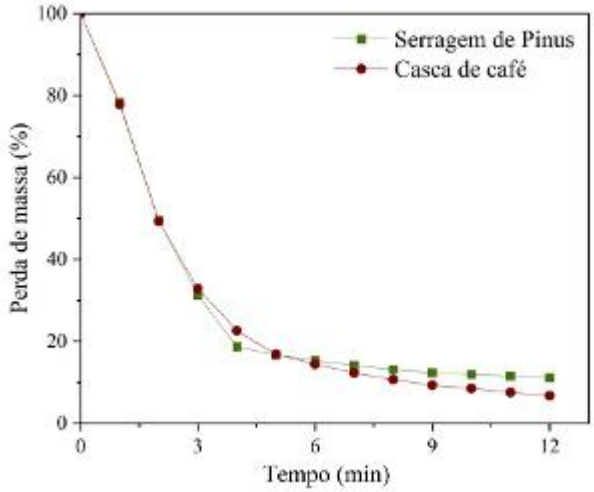


Figura 2 − Perda de massa dos pellets produzidos com serragem de *Pinus* e casca de café durante o ensaio de combustibilidade.

Durante os ensaios de combustibilidade, ambos os materiais apresentaram rápida elevação de temperatura nos primeiros minutos de combustão. Entretanto, os pellets de casca de café mantiveram temperaturas elevadas por períodos mais prolongados e apresentaram menor massa residual ao final do ensaio. Esse comportamento pode ser atribuído à combinação entre maior densidade unitária, maior teor de lignina e maior conteúdo de carbono fixo, características que favorecem a estabilidade térmica e prolongam a duração da combustão.

Por outro lado, os pellets de *Pinus* apresentaram maior teor de materiais voláteis, resultando em maior taxa de degradação térmica nas fases iniciais da combustão. Segundo Setter et al. (2020), materiais com maiores teores de voláteis tendem a apresentar combustão mais rápida devido à maior liberação de gases combustíveis durante o aquecimento. Adicionalmente, a menor densidade observada para os pellets de *Pinus* pode favorecer a difusão de oxigênio no interior do combustível, acelerando o processo de queima.

Apesar do menor poder calorífico superior da casca de café, sua combustão apresentou comportamento mais uniforme ao longo do tempo. Esse resultado demonstra que o desempenho durante a combustão não depende exclusivamente do conteúdo energético do combustível, mas também de características estruturais e químicas, como densidade, teor de lignina e carbono fixo. Dessa forma, os pellets produzidos a partir da casca de café apresentam potencial para aplicações energéticas que demandam maior estabilidade térmica e tempo de combustão prolongado.

4. Conclusões

Os pellets de casca de café e serragem de *Pinus* apresentaram potencial para uso energético. A casca de café destacou-se pela maior densidade, teor de lignina e carbono fixo, resultando em combustão mais estável e prolongada. Já os pellets de *Pinus* apresentaram maior teor de materiais voláteis e poder calorífico superior, favorecendo uma combustão mais intensa na fase inicial. Os resultados demonstram que as propriedades físicas e químicas da biomassa influenciam diretamente seu desempenho durante a combustão, indicando a casca de café como alternativa promissora para a produção de pellets destinados a aplicações bioenergéticas.

5. Agradecimentos

Este estudo contou com o apoio do Laboratório Multiusuário de Biomateriais e Energia da Biomassa e do Núcleo de Estudos em Madeira (NEMAD) da Universidade Federal de Lavras (UFLA, Brasil). Esta pesquisa foi financiada, em parte, pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES, Brasil) – Código de Financiamento 001; pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq; Processo nº 406053/2022-7); e pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG; Processo nº APQ-05431-24).

6. Referências bibliográficas

ABNT. NBR 7989. **A. B. D. N. TÉCNICAS. Pasta celulósica e madeira - determinação de lignina insolúvel em ácido**. Rio de Janeiro, 2010.

ASTM D1762 – 84. **Método de ensaio padrão para análise química de carvão vegetal**. Sociedade Americana para Testes e Materiais. Pensilvânia, 2021.

ASTM E711 – 87. **Método de ensaio padrão para o poder calorífico bruto de combustível derivado de resíduos por calorimetria de bomba**. Pensilvânia, 2004.

Larsson, S. H. et al. Pellets de madeira para combustível produzidos a partir de serragem de pinheiro-silvestre maduro e jovem: testes de autoaquecimento e emissão de gases em escala industrial. BioEnergy Research, v. 17, p. 1832–1842, 2024. https://doi.org/10.1007/s12155-024-10736-5.

Palamanit, A. et al. Exploração das características e adequação do gás de síntese para geração de calor de pellets de biomassa de café produzidos por peletização simples e combinada. Environmental Science and Pollution Research, v. 30, p. 125889–125906, 2023. Doi:10.1007/s11356-023-31050-1.

Quirino, W. F., 1991. Características e índice de combustão de briquetes vegetal. pp. 19. Disponível em: https://mundoflorestal.com.br/arquivos/indice.pdf.

Stachowicz, P. et al. Alterações nos parâmetros físicos, mecânicos, químicos e energéticos de pellets de casca de café durante armazenamento de curto prazo. Fuel, vol. 386, 134191, 2025.https://doi.org/10.1016/j.fuel.2024.134191.

Sugebo, B. A. Uma revisão sobre a produção aprimorada de biocombustíveis a partir de subprodutos do café usando diferentes técnicas de aprimoramento. Materiais para Energia Renovável e Sustentável, v. 11, p. 91–103, 2022. Doi:10.1007/s40243-022-00209-0.

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Conversão de resíduos agroindustriais em pellets para bioenergia: Efeito da biomassa sobre a resistência à combustão

Leticia Luz Botelho Coelho [1]; Raffael Ferreira Campideli [1]; Vinícius Rosa Moreira [1]; Adeilson Carvalho [1]; Douglas Lamounier Faria [1]; Thiago de Paula Protásio [1]

[1] Departamento de Ciências Florestais, Universidade Federal de Lavras - UFLA, Av. Perimetral, 37200-900, Lavras, MG, Brasil; leticia.coelho2@estudante.ufla.br

Resumo: Resíduos agroindustriais representam uma matéria-prima subutilizada com potencial valorização para produção de biocombustíveis sólidos. Desta forma, este trabalho avaliou as propriedades de pellets produzidos com resíduos de quatro culturas agrícolas do estado de Minas Gerais, especificamente bagaço de cana de açúcar, casca de arroz, folhas de maracujá e casca de café. Anteriormente a produção dos pellets, as biomassas foram avaliadas pelos teores de umidade, massa específica aparente e teor de cinzas. Os pellets foram produzidos com diâmetro nominal de 6 mm utilizando uma peletizadora plana horizontal Eng-Maq® 0200v, em que cada biomassa foi peletizada separadamente. A qualidade dos pellets foi analisada pela resistência à combustão pelo ensaio de combustibilidade. As biomassas lignocelulósicas em estudo apresentaram teores de umidade próximos de 12%, bem como massa específica aparente variando entre 119 e 441 kg/m³, valores ideais para produção de pellets de qualidade. Os resultados mostraram que a composição química das biomassas influenciou significativamente o comportamento térmico dos pellets, em que os mesmos apresentaram diferentes comportamentos no ensaio de combustibilidade, com perdas de massa de aproximadamente 99% para bagaço de cana de açúcar e 78% para folha de maracujá. Esse comportamento pode ser atribuído pelo maior teor de materiais inorgânicos presente nos resíduos de folha de maracujá (14,24%) em comparação ao bagaço de cana de açúcar (2,38%), resultando em menor disponibilidade de material combustível e, consequentemente, maior teor residual após a combustão. De modo geral, os resíduos agroindustriais em estudo demonstraram elevado potencial para a produção de pellets, promovendo a valorização de resíduos e o uso sustentável de biomassa para geração de energia renovável.
Palavras-chave: Densificação; Biocombustíveis sólidos; Resíduos lignocelulósicos.

Conversion of agro-industrial wastes into pellets for bioenergy: Effect of biomass on combustion resistance

Abstract: Agro-industrial residues represent an underutilized feedstock with potential for valorization through the production of solid biofuels. Therefore, this study evaluated the properties of pellets produced from residues of four agricultural crops from the state of Minas Gerais, specifically sugarcane bagasse, rice husks, passion fruit leaves, and coffee husks. Prior to pellet production, the biomasses were evaluated for moisture content, bulk density, and ash content. Pellets with a nominal diameter of 6 mm were produced using an Eng-Maq® 0200v horizontal flat-die pelletizer, with each biomass pelletized separately. Pellet quality was evaluated in terms of resistance to combustion using a combustibility test. The lignocellulosic biomasses evaluated in this study presented moisture contents close to 12% and bulk densities ranging from 119 to 441 kg/m³, values considered suitable for the production of quality pellets. The results showed that the chemical composition of the biomasses significantly influenced the

thermal behavior of the pellets, which exhibited different behaviors during the combustibility test, with mass losses of approximately 99% for sugarcane bagasse and 78% for passion fruit leaves. This behavior may be attributed to the higher content of inorganic materials in passion fruit leaf residues (14.24%) compared with sugarcane bagasse (2.38%), resulting in a lower proportion of combustible material and, consequently, a higher amount of residual material after combustion. Overall, the agro-industrial residues evaluated in this study demonstrated high potential for pellet production, contributing to waste valorization and the sustainable use of biomass for renewable energy generation.

Keywords: Densification; Solid biofuels; Lignocellulosic residues.

1. Introdução

No Brasil, a elevada disponibilidade de biomassa proveniente dos setores florestal e agroindustrial coloca o país em posição estratégica para o desenvolvimento de sistemas descentralizados de geração de energia, capazes de suprir demandas locais e reduzir custos associados ao transporte de combustíveis convencionais (EPE, 2025). Nesse cenário, o estado de Minas Gerais destaca-se pela expressiva produção agrícola, florestal e agroindustrial, reunindo ampla disponibilidade de resíduos lignocelulósicos oriundos das cadeias sucroenergética, cafeeira, florestal e de grãos, que apresentam elevado potencial para conversão em biocombustíveis sólidos de maior valor agregado (EPE, 2025).

Entre as alternativas disponíveis para o aproveitamento energético da biomassa, os pellets destacam-se como um dos biocombustíveis sólidos mais promissores devido à elevada densidade energética, ao reduzido teor de umidade, à uniformidade dimensional e à facilidade de armazenamento, transporte e alimentação automatizada de sistemas de combustão (Kaliyan & Morey, 2009). O processo de peletização promove a densificação da biomassa lignocelulósica, aumentando significativamente a densidade a granel e a densidade energética em comparação à biomassa in natura, além de melhorar a eficiência logística e operacional ao longo da cadeia de suprimento (Stelte et al., 2012; Whittaker & Shield, 2017).

A utilização de resíduos agroindustriais como matéria-prima para a produção de pellets tem recebido crescente atenção em razão da elevada disponibilidade desses materiais, da possibilidade de reduzir passivos ambientais e do potencial para ampliar a oferta de biocombustíveis sólidos sem competir com a produção de alimentos (Gilvari et al., 2020; Whittaker & Shield, 2017). Diferentes resíduos agrícolas tais como o bagaço de cana de açúcar, a casca de arroz, as folhas de maracujá e a casca de café, têm sido investigados para diferentes formas de valorização energética por meio de processos de densificação e conversão termoquímica. A casca de arroz, por exemplo, embora apresente potencial para peletização,

possui alto teor de constituintes inorgânicos que podem limitar sua eficiência térmica (Dagobeth et al., 2025). Já os resíduos do beneficiamento do café demonstram excelente aptidão para a fabricação de pellets (Winter et al., 2025), enquanto biomassas lignocelulósicas como as folhas de maracujá demandam maior investigação quanto ao seu aproveitamento ideal.

Embora diferentes biomassas agrícolas tenham sido investigadas para a produção de pellets, ainda são escassos estudos comparativos conduzidos sob as mesmas condições experimentais envolvendo resíduos amplamente disponíveis em Minas Gerais, especialmente considerando simultaneamente suas características físicas, químicas e seu desempenho em ensaios de combustibilidade, parâmetro diretamente relacionado à eficiência energética e ao comportamento do combustível durante sua utilização (Gilvari et al., 2020; Whittaker & Shield, 2017).

Nesse contexto, a principal contribuição deste estudo consiste na avaliação comparativa do potencial energético desses cinco materiais por meio da produção e caracterização de pellets obtidos sob as mesmas condições experimentais. Este trabalho tem como objetivo avaliar as propriedades físicas e térmicas de pellets produzidos com resíduos agroindustriais, visando agregar valor a estas biomassas em um material sustentável.

2. Material e métodos

2.1 Obtenção e preparo da matéria-prima

O bagaço de cana de açúcar e a casca de arroz foram obtidos no setor de grandes culturas, já as folhas de maracujá foram provenientes de poda periódica de plantio experimental do setor de fruticultura, enquanto a casca de café (*Coffea arabica*) obtida no setor de cafeicultura, todos pertencentes ao campus-sede da Universidade Federal de Lavras (UFLA). As amostras de biomassa lignocelulósica foram moídas para produzir partículas utilizando um moinho de facas Willey (SL 31, Solab; 1750 rpm e 736 W) equipado com uma peneira de 2,0 mm de abertura, visando melhorar a qualidade da compactação dos pellets.

O teor de umidade (base seca) foi determinado de acordo com a norma EN 14774-1 (2010a). A massa específica aparente foi determinada conforme a norma EN 15103 (2010b), utilizando um béquer de vidro de 2,0 L. Todas as análises foram realizadas em triplicata, e os valores apresentados representam a média de três medições. Posteriormente, os resíduos lignocelulósicos foram secos ao ar em temperatura ambiente (~25 °C) até atingirem o teor de umidade de equilíbrio (~12%).

Os resíduos lignocelulósicos foram moídos em moinho de martelos e, posteriormente, peneirados em peneiras de 40 mesh (0,420 mm) e 60 mesh (0,250 mm) para determinação do

teor de cinzas, sendo a fração retida na peneira de 60 mesh utilizada nas análises, seguindo a norma NBR 13999 (2017).

2.2 Produção dos pellets em escala laboratorial

Os resíduos agroindustriais bagaço de cana de açúcar, casca de arroz, folhas de maracujá e casca de café foram peletizados, separadamente, utilizando uma peletizadora Eng-Maq® 0200v (capacidade de produção de 110 kg h^{-1}) equipada com matriz plana horizontal de 6 mm de diâmetro e 20 mm de espessura, resultando em uma razão de compressão de 3,33. A peletização foi realizada em temperaturas variando de 80 a 95 °C e sob pressão de 29,42 MPa. Para cada composição, foram produzidos 2 kg de pellets. Para fins de comparação, também foram produzidos pellets a partir de serragem de pinus. A madeira de árvores de *Pinus oocarpa* com 28 anos de idade foi coletada no campus da Universidade Federal de Lavras (UFLA), em Lavras, Minas Gerais, Brasil. O preparo das amostras e a caracterização física e química seguiram os mesmos procedimentos adotados para os resíduos agroindustriais. A Figura 1 apresenta uma visão geral esquemática do processo de produção de pellets utilizando tanto os resíduos agroindustriais quanto a madeira de *Pinus*.



Figura 1 – Diagrama esquemático do processo de produção dos pellets.

2.3 Caracterização térmica dos pellets

Testes de combustibilidade dos pellets foram realizados seguindo a metodologia desenvolvida por Setter et al. (2020). Para isso, foi empregada uma câmara de combustão construída com chapas de aço galvanizado e equipada com uma base de alumínio e madeira, um

controlador de temperatura, uma balança com precisão de 0,05 g e uma proteção de alumínio para minimizar a interferência do vento durante a combustão. Foram testadas três amostras de 50 g para cada composição de pellet. A câmara de combustão e a base foram posicionadas sobre a balança, e a massa do pellet foi registrada antes do teste. Em seguida, a estrutura metálica de proteção e o termopar foram instalados. A ignição foi iniciada pela queima de aproximadamente 20 mL de etanol, colocados em uma placa de alumínio posicionada entre a base metálica e a câmara de combustão.

2.4 Análise dos dados

Os dados obtidos para as propriedades físicas e químicas das biomassas lignocelulósicas foram processados e foram reportados de forma consistente como média ± desvio padrão (DP). Para isso, foi empregado o software Microsoft Excel (versão 2019).

3. Resultados e discussão

3.1 Caracterização das biomassas

As propriedades físicas e químicas dos resíduos agroindustriais e da madeira de *Pinus* utilizados para produção dos pellets são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 – Propriedades físicas e químicas das biomassas lignocelulósicas

Biomassa	*Pinus oocarpa*	Bagaço de cana de açúcar	Casca de arroz	Folhas de maracujá	Casca de café
Umidade (%)*	11,27 ± 0,08**	7,16 ± 0,29	10,21 ± 4,31	16,70 ± 0,01	15,19 ± 0,67
Massa específica aparente (kg m^{-3})	244,83 ± 6,52	119,0 ± 11,65	211,83 ± 17,06	186,0 ± 5,40	441,17 ± 21,07
Cinzas (%)	0,35 ± 0,04	2,38 ± 0,11	9,78 ± 0,32	14,24 ± 1,97	7,0 ± 0,08

* base seca. ** desvio padrão.

Os resíduos lignocelulósicos apresentaram diferenças numéricas consideráveis para as propriedades físicas e químicas avaliadas. Os resíduos de folhas de maracujá apresentaram o maior teor de umidade (16,70%), enquanto o material proveniente da cadeia sucroalcooleira resultou no menor teor de umidade (7,16%). É desejável que a biomassa apresente teor de umidade próximo a 12% para eficiente processo de densificação, sendo necessário, portanto, maior correção da umidade para aqueles mais distantes do teor de umidade ideal.

Da mesma forma, a massa específica das biomassas em estudo variou entre 119 e 441,17 kg m^{-3}, para resíduos de bagaço de cana e casca de café, respectivamente. O mesmo foi

verificado para o teor de cinzas, em que as diferentes biomassas em estudo apresentaram valores de constituintes inorgânicos muito distintos, variando entre 0,35% para *Pinus oocarpa* e 14,24% para resíduos de folhas de maracujá.

A presença de água na matéria-prima exerce influência sobre o processo de densificação, desempenhando papel importante nos mecanismos de ligação entre as partículas durante a formação dos pellets (Kaliyan & Morey, 2009), reforçando a importância do controle dessa propriedade antes da compactação. Além disso, a massa específica é relevante para o armazenamento e transporte da biomassa. O valor obtido nesta pesquisa para casca de café (441,17 kg m^{-3}) foi superior aos 215,4 kg m^{-3} registrados por Winter et al. (2025), evidenciando a variabilidade dessa propriedade entre materiais de uma mesma biomassa. Quanto ao teor de cinzas, as folhas de maracujá apresentam o maior valoer (14,24%), seguidas pela casca de arroz (9,78%), resultado próximo aos 13% observados por Arroyo Dagobeth et al (2025), que destacam as limitações de elevados teores de cinzas para a qualidade do combustível.

3.2 Caracterização dos pellets

O comportamento à combustão dos pellets foi avaliado por meio do ensaio de combustibilidade (Figura 2). Esse teste fornece uma avaliação prática da degradação térmica de biocombustíveis sólidos, simulando o comportamento de combustão esperado sob condições operacionais típicas. O teste avalia a caracterização termoquímica ao fornecer informações sobre ignição, cinética de perda de massa, desenvolvimento da chama e estabilidade da combustão.

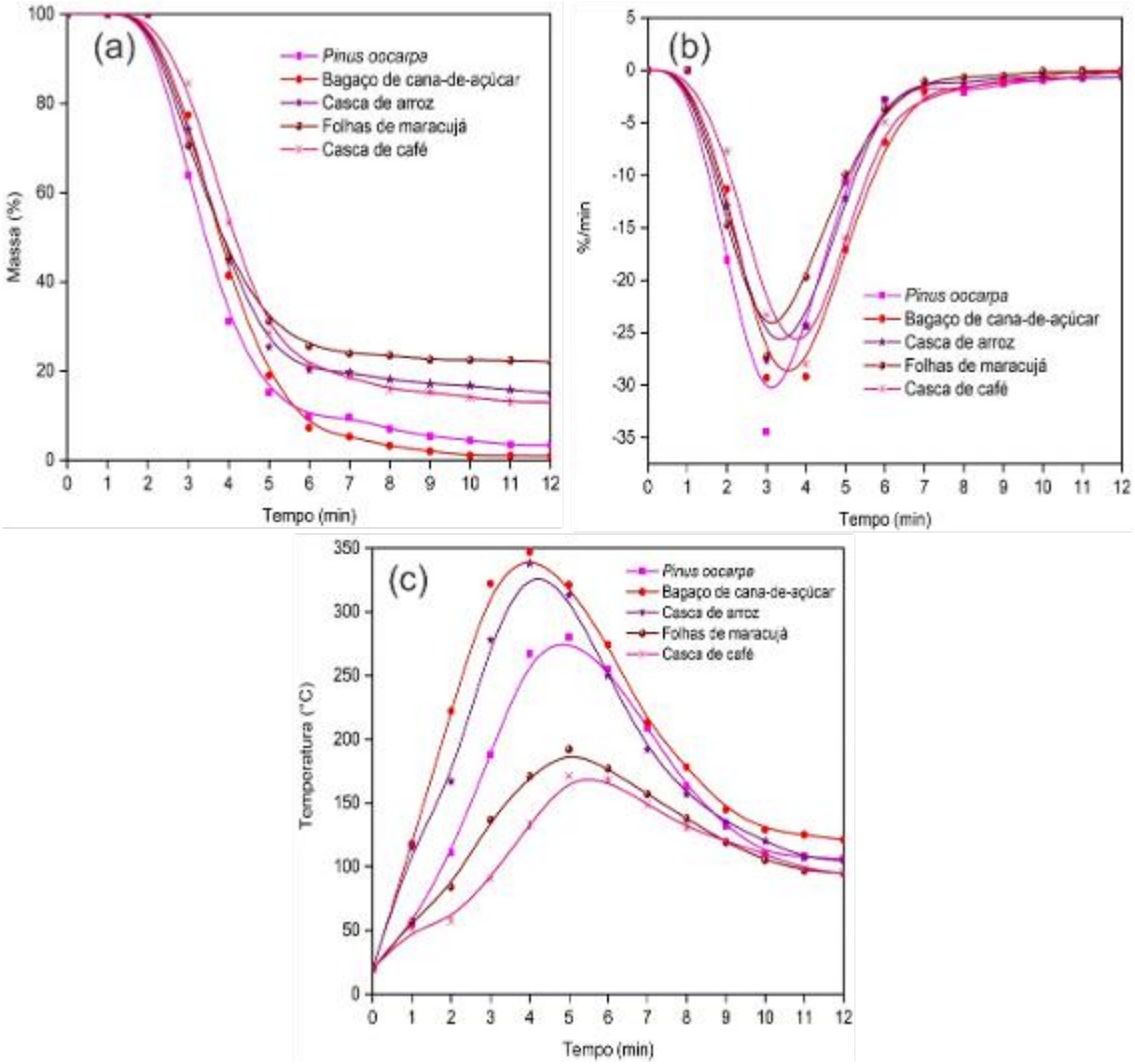


Figura 2 – Comportamento de degradação térmica avaliado pelo teste de combustibilidade: (a) massa, (b) perda de massa por minuto e (c) temperatura em função do tempo para pellets produzidos a partir de diferentes resíduos agroindustriais.

A Figura 2a apresenta as curvas de perda de massa em função do tempo de ensaio para os pellets produzidos com as diferentes biomassas avaliadas, sendo possível observar que nos primeiros minutos de teste ocorre evaporação da água livre, da água adsorvida e parte da água fracamente ligada às paredes celulares, estendendo até a temperatura de aproximadamente 150 °C para algumas biomassas. O comportamento à combustão das biomassas em estudo seguiu o padrão para amostras de bagaço de cana conforme ilustrado por Aniza et al. (2024), com três estágios característicos de perda de massa em função do tempo e temperatura.

Todas as composições avaliadas seguiram uma mesma tendência de rápida perda de massa a partir do segundo minuto de ensaio, conforme verifica-se na Figura 2a. Apesar desse comportamento, as curvas foram diferentes para as biomassas em estudo, em que a composição

química afetou significativamente na resistência à degradação térmica dos pellets produzidos. Aqueles produzidos com resíduos de *Pinus* apresentaram degradação térmica mais rápida comparativamente àqueles produzidos com os resíduos não madeireiros. As maiores perdas de massa para os pellets em função do tempo ocorreram entre 2 e 4 minutos (Figura 2b).

Ao final do ensaio, os pellets de bagaço de cana de açúcar apresentaram perda de massa próxima a 99%, enquanto aqueles produzidos com folhas de maracujá apresentaram aproximadamente 78%, indicando maior resistência à degradação térmica destes últimos. As folhas de maracujá também apresentaram o maior teor de cinzas (14,24%) enquanto o *Pinus*, que apresentou rápida degradação, registrou o menor valor (0,35%) (Tabela 1). Esses resultados indicam uma possível associação entre o teor de constituintes inorgânicos das biomassas e o comportamento observado durante a combustão.

Os elevados teores de cinzas verificados para os resíduos agroindustriais podem ter influenciado na resistência térmica, em que durante o ensaio grande parte da massa inicial da amostra resultou em material contendo carbono fixo e cinzas não consumido. Desta forma, as biomassas com elevados teores de cinzas tiveram seus comportamentos à combustão alterados, bem como a chama apresentou temperatura inferior (Figura 2c) devido a maior quantidade de material incombustível, o que promove alterações nos fenômenos de transferência de calor (Esteves et al., 2023). Entretanto, os altos teores de cinzas limitam o aproveitamento energético da biomassa, pois reduz a eficiência do energética da biomassa, comprometendo a qualidade do combustível, causando problemas operacionais durante a combustão, como a sintetização de cinzas (Royo et al., 2025; Arroyo Dagobeth et al., 2025)

4. Conclusões

As biomassas avaliadas apresentaram variações físico-químicas, associadas a comportamentos distintos dos pellets durante a combustão. Os pellets de bagaço de cana de açúcar apresentaram maior perda de massa, enquanto aqueles produzidos com folhas de maracujá apresentaram maior estabilidade térmica, embora seu alto conteúdo de cinzas restringe o aproveitamento como biocombustível sólido. Assim, conclui-se que o diagnóstico prévio dos atributos da matéria-prima é determinante para direcionar a peletização focada na geração de bioenergia.

5. Agradecimentos

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES). Agradecemos também à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas

Gerais (FAPEMIG) pela bolsa de pós-doutorado (códigos financeiros: APQ-05431-24, bolsa ID FAPEMIG/DPE nº. 103658065/2024, e APD-00296-25).

6. Referências bibliográficas

Aniza, R.; Chen, W-H., Kwon, E. E.; Bach, Q-V.; Hoang, A. T. Lignocellulosic biofuel properties and reactivity analyzed by thermogravimetric analysis (TGA) toward zero carbon scheme: A critical review. Energy Conversion and Management: X, v. 22, 100538, 2024. https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2024.100538

ARROYO DAGOBETH, E. D. et al. Co-Pelletization of Rice Husk and Corncob Residues: Evaluation of Physicochemical Properties and Combustion Performance. Recycling, v. 10, 173, 2025. https://doi.org/10.3390/recycling10050173

Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2017). NBR 13999: Paper, Board, Pulps, and Wood-Determination of Residue (Ash) on Ignition at 525 °C, 2017.

Deutsches Institut Für Normung. (2010a). DIN EN 14774-1: Determination of moisture content – oven dry method –part 1: total moisture – reference method.

Deutsches Institut Für Normung. (2010b). DIN EN 15103: Determination of bulk density.

Empresa de Pesquisa Energética (EPE). (2025). Balanço Energético Nacional 2025. https://www.epe.gov.br/pt

Empresa de Pesquisa Energética (EPE). The Energy Potential of Agricultural and Livestock Residues in Brazil, 2025.

Esteves, B., Sen, U., & Pereira, H. (2023). Influence of Chemical Composition on Heating Value of Biomass: A Review and Bibliometric Analysis. *Energies*, *16*(10), 4226. https://doi.org/10.3390/en16104226

Gilvari, H., de Jong, W., Schott, D. L., & Berghel, J. (2020).
The effect of biomass pellet properties on combustion performance: A review.
Fuel Processing Technology, 199, 106244. https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2019.106244

Kaliyan, N., & Morey, R. V. (2009). Densification characteristics of biomass and corn stover. Fuel Processing Technology, 90(3), 337–347. https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2008.11.001

ROYO, J.; CANALÍS, P.; QUINTANA, D. Ash partitioning in combustion of pelletized residual agricultural biomass. Biomass and Bioenergy, v. 193, 107563, 2025. https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2024.107563?utm_source=chatgpt.com

Setter, C., F. A. Borges, C. R. Cardoso, R. F. Mendes, T. J. P. Oliveira. (2020). Energy quality of pellets produced from coffee residue: Characterization of the products obtained via

slow pyrolysis. Industrial Crops and Products, 154(112731). https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2020.112731

Stelte, W., Holm, J. K., Sanadi, A. R., Barsberg, S., Ahrenfeldt, J., & Henriksen, U. B. (2012). A study of bonding and failure mechanisms in fuel pellets from different biomass resources. Biomass and Bioenergy, 36, 910–918.https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2011.12.003

Whittaker, C., & Shield, I. (2017). Factors affecting wood, energy grass and straw pellet durability – A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 71, 1–11. https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.12.119

WINTER, S. G. et al. Sustainable Solid Biofuel Production from Coffee Byproducts: Characterization and Pelletization of Husk and Parchment. Resources, v. 14, 188, 2025. https://doi.org/10.3390/resources14120188?utm_source=chatgpt.com

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Conversão Termoquímica da Casca de Café via Pirólise: Produção e Caracterização de Biochar com Potencial Energético

Ianca Oliveira Borges[1]; Carine Setter[2]; Jhonatan Sales Satiro[1]; Thiago de Paula Protásio[1]

[1] Universidade Federal de Lavras, Minas Gerais, Brasil
[2] Universidade Federal de Santa Maria, Rio Grande do Sul, Brasil

Resumo: A casca de café destaca-se como um resíduo agroindustrial abundante no Brasil e com potencial para a produção de biochar. Este estudo avaliou o potencial da casca de café como matéria-prima para a produção de biochar por pirólise lenta. A biomassa foi caracterizada quanto à composição estrutural, análise imediata e poder calorífico superior, sendo posteriormente submetida à pirólise a 500 °C. O processo resultou em rendimentos de 38,80% de biochar, 30,60% de bio-óleo e 30,60% de gases não condensáveis. A casca de café apresentou 26,70% de lignina e 25,00% de extrativos. Após a pirólise, o biochar apresentou aumento do teor de carbono fixo (22,57% para 50,67%) e do poder calorífico superior (17,85 para 22,84 MJ kg^{-1}), acompanhado da redução do teor de materiais voláteis (69,28% para 27,55%). As análises por microscopia eletrônica de varredura evidenciaram o desenvolvimento de uma estrutura altamente porosa. Apesar do enriquecimento energético, o biochar apresentou elevado teor de cinzas (8,15%), característica que pode favorecer a formação de escórias e incrustações durante processos de combustão. Ainda assim, os resultados indicam que, nas condições avaliadas, a pirólise promove o enriquecimento energético da casca de café, demonstrando seu potencial para produção de biochar destinado a aplicações energéticas.

Palavras-chave: Resíduo agroindustrial; Biomassa; Valorização energética.

Thermochemical Conversion of Coffee Husk via Pyrolysis: Production and Characterization of Biochar with Energy Potential

Abstract: Coffee husk is an abundant agro-industrial residue in Brazil with considerable potential as a feedstock for biochar production. This study evaluated the potential of coffee husk as a raw material for biochar production through slow pyrolysis. The biomass was characterized in terms of structural composition, proximate analysis, and higher heating value before being subjected to pyrolysis at 500 °C. The process yielded 38.80% biochar, 30.60% bio-oil, and 30.60% non-condensable gases. The coffee husk contained 26.70% lignin and 25.00% extractives. Following pyrolysis, the biochar exhibited an increase in fixed carbon content (from 22.57% to 50.67%) and higher heating value (from 17.85 to 22.84 MJ kg^{-1}), accompanied by a reduction in volatile matter content (from 69.28% to 27.55%). Scanning electron microscopy analyses revealed the development of a highly porous structure. Despite the improved fuel properties, the biochar exhibited a relatively high ash content (8.15%), which may promote slagging and fouling during combustion processes. Nevertheless, the results indicate that, under the conditions evaluated, slow pyrolysis enhances the energy properties of coffee husk, demonstrating its potential as a feedstock for biochar production for energy applications.

Keywords: Agro-industrial residue; Biomass; Energy recovery.

1. Introdução

O acelerado desenvolvimento das atividades antrópicas tem intensificado a degradação ambiental, contribuindo para a perda da biodiversidade e comprometendo a sustentabilidade dos ecossistemas. Paralelamente, o crescimento populacional e a crescente demanda por energia têm ampliado o consumo de combustíveis fósseis, agravando as mudanças climáticas e seus impactos ambientais, econômicos e sociais (ROZBU et al., 2021). Nesse cenário, o desenvolvimento de tecnologias capazes de substituir parcial ou totalmente os combustíveis de origem fóssil por fontes renováveis tem se tornado uma prioridade para a transição energética e para a promoção da economia circular.

Entre as alternativas disponíveis, destaca-se o aproveitamento energético de resíduos lignocelulósicos, especialmente em países com forte vocação agrícola, como o Brasil. O país é o maior produtor e exportador de café do mundo, respondendo por mais de 35% da produção mundial nos últimos cinco anos, com produção média anual próxima de 60 milhões de sacas de 60 kg na safra 2023/2024 (USDA, 2025). Durante o beneficiamento do café são gerados grandes volumes de resíduos sólidos, dos quais a casca de café representa a principal fração, correspondendo a aproximadamente 50% da massa do fruto seco e sendo produzida em proporção próxima de 1 kg para cada quilograma de grão processado (CASTRO et al., 2022). Apesar de sua elevada disponibilidade, esse resíduo ainda é frequentemente destinado a aplicações de baixo valor agregado ou descartado de forma inadequada, evidenciando a necessidade de alternativas que promovam seu aproveitamento sustentável.

A conversão de resíduos lignocelulósicos em materiais de maior valor agregado tem despertado crescente interesse científico e tecnológico. Estima-se que a atividade agrícola mundial gere aproximadamente 181,5 bilhões de toneladas de biomassa residual por ano, das quais apenas uma pequena parcela é efetivamente aproveitada (MUJTABA et al., 2023). Nesse contexto, o biochar tem se destacado como um produto de elevado interesse por aliar a valorização de resíduos à produção de um material com propriedades físico-químicas e energéticas diferenciadas.

O biochar é um material carbonáceo obtido a partir da decomposição térmica de biomassas em condições de ausência ou limitação de oxigênio. Pode ser produzido a partir de diferentes matérias-primas ricas em carbono, incluindo resíduos agrícolas, resíduos florestais e materiais lenhosos. Suas propriedades dependem tanto da composição química da biomassa quanto das condições empregadas durante sua produção, especialmente temperatura, taxa de aquecimento e tempo de residência (ZHU et al., 2022). Em geral, apresenta elevada estabilidade química, estrutura porosa bem desenvolvida e alta área superficial específica, características

que favorecem sua utilização em diferentes aplicações, incluindo uso energético, condicionamento de solos, adsorção de contaminantes e materiais carbonáceos avançados (YANG et al., 2021).

A produção de biochar é realizada principalmente por meio da pirólise, uma das principais rotas de conversão termoquímica da biomassa. Nesse processo, a biomassa é aquecida, geralmente entre 300 e 700 °C, em ambiente com ausência ou limitação de oxigênio, promovendo sua decomposição em três frações principais: biochar, bio-óleo e gases não condensáveis (LEHMANN; JOSEPH, 2015). As características e os rendimentos desses produtos são diretamente influenciados pelas condições operacionais adotadas, como temperatura final, taxa de aquecimento e tempo de residência, que determinam o tipo de pirólise empregado e, consequentemente, as propriedades do biochar obtido.

Do ponto de vista energético, a pirólise promove modificações estruturais na biomassa que resultam no enriquecimento em carbono fixo, redução do teor de materiais voláteis e aumento do poder calorífico do biochar, produzindo um combustível sólido com maior densidade energética que a biomassa original. Além disso, o processo permite o aproveitamento energético das frações líquida e gasosa, aumentando a eficiência global da conversão da biomassa e contribuindo para a sustentabilidade do processo (MATOVIC, 2011; LEE et al., 2020). Essas características tornam o biochar uma alternativa promissora para a valorização energética de resíduos agroindustriais.

Embora diversos estudos tenham investigado a produção de biochar a partir de diferentes biomassas lignocelulósicas, ainda são limitadas as informações sobre o potencial energético do biochar obtido da casca de café sob condições controladas de pirólise lenta, especialmente considerando a relação entre a composição química da biomassa e as propriedades do produto obtido. Nesse contexto, o presente estudo teve como objetivo avaliar o potencial da casca de café como matéria-prima para produção de biochar por meio da pirólise lenta, uma das principais rotas de conversão termoquímica da biomassa. Para isso, foram determinados os rendimentos das frações sólida, líquida e gasosa geradas durante o processo, bem como realizadas as caracterizações químicas, morfológicas e energéticas do biochar produzido.

2. Material e métodos

Caracterização da biomassa

A morfologia da casca de café foi avaliada por microscopia eletrônica de varredura (MEV). As amostras foram montadas em suportes de alumínio utilizando fita de carbono e submetidas à metalização com ouro por 6 s, sem utilização de gás de arraste. As análises foram realizadas em microscópio eletrônico de varredura modelo CLARA – TESCAN. Para as análises químicas estruturais, o resíduo foi caracterizado quanto aos teores de extrativos totais, utilizando a norma T 204 om-97 (TAPPI, 2007). Para a lignina, utilizou-se a norma T 222 om-02 (TAPPI, 2002a). A celulose foi calculada seguindo Kennedy et al. (1987). Para determinar o teor de hemiceluloses, utilizou-se a norma T 211 om-02 (TAPPI, 2002b). Todas as análises químicas foram realizadas em triplicata para o cálculo dos valores médios e do desvio padrão. A análise química imediata foi realizada de acordo com a norma D1762-84 (ASTM, 2013) para determinar os teores de materiais voláteis, cinzas e carbono fixo. O poder calorífico superior (PCS) foi determinado utilizando um calorímetro digital IKA C-200, em conformidade com a norma E711-87 (ASTM, 2023).

Produção do Biochar

Antes da produção do biochar, as cascas de café foram trituradas e moídas, sendo utilizada a fração que passou pela peneira de 40 mesh e ficou retida na de 60 mesh. Essa granulometria foi selecionada por proporcionar maior uniformidade das partículas, reduzindo limitações relacionadas à transferência de calor e favorecendo a homogeneidade da carbonização durante a pirólise. Posteriormente, o material foi seco em estufa de circulação forçada de ar a 100 °C por 24 h, visando à redução da umidade e à padronização das condições experimentais.

A produção do biochar foi realizada em escala laboratorial utilizando uma mufla elétrica (modelo Q318S25T). O processo foi conduzido em triplicata, permitindo a determinação dos desvios padrão dos rendimentos obtidos. Para cada ensaio, a biomassa seca foi acondicionada em uma cápsula metálica de carbonização acoplada a um condensador refrigerado com água, possibilitando a coleta da fração líquida produzida durante o processo.

A pirólise foi conduzida em sistema fechado, com aquecimento iniciado à temperatura ambiente (aproximadamente 25 °C) e taxa de aquecimento de 10 °C min^{-1} até a temperatura final de 500 °C, mantida por 1 h. A taxa de aquecimento adotada caracteriza condições típicas de pirólise lenta, favorecendo a degradação gradual da biomassa e a formação da fração sólida carbonizada. A temperatura final de 500 °C foi selecionada por representar uma condição de equilíbrio entre a obtenção de um biochar com propriedades energéticas aprimoradas e a

eficiência energética do processo. Temperaturas superiores, embora possam promover maior grau de carbonização, demandam maior consumo de energia e tendem a reduzir o rendimento da fração sólida em decorrência da intensificação das reações de degradação térmica. Após o tempo de residência, o biochar permaneceu no interior da mufla até o resfriamento completo à temperatura ambiente.

Os rendimentos gravimétricos do biochar e do bio-óleo foram determinados pela razão entre a massa de cada produto obtido e a massa seca inicial da biomassa, sendo expressos em porcentagem. O rendimento dos gases não condensáveis foi estimado por diferença, considerando a massa inicial da biomassa e os rendimentos das frações sólida e líquida.

Caracterização do biochar

A análise química imediata, poder calorífico e a microscopia eletrônica de varredura (MEV) foram realizadas no biochar produzido a partir da casca de café. Para ambas as análises, foram adotados os mesmos procedimentos e parâmetros metodológicos utilizados para a biomassa in natura.

3. Resultados e discussão

A pirólise lenta da casca de café resultou em rendimento de 38,80% de biochar, enquanto os rendimentos de bio-óleo e gases não condensáveis foram de 30,61% e 30,60%, respectivamente. O elevado rendimento da fração sólida pode ser atribuído à composição lignocelulósica da biomassa, especialmente ao teor de lignina, componente de maior estabilidade térmica e principal precursor da fração carbonizada (LI et al., 2020). Em comparação com outros resíduos agrícolas submetidos à pirólise a 500 °C (Tabela 1), o rendimento obtido foi superior ao observado para casca de café por Setter et al. (2020) e para bagaço de cana (DIVYAGKUMAR et al., 2024), porém inferior ao reportado para película de café por Fernández-Ferreras et al. (2023), evidenciando que a casca de café apresenta desempenho competitivo para a produção de biochar.

Tabela 1 - Comparação dos principais parâmetros de biochars produzidos a partir de resíduos agrícolas em diferentes estudos.

Biomassa	Temperatura de pirólise [°C]	Rendimento [%]	Carbono fixo [%]	Poder calorífico [MJ	Cinzas [%]	Ref.

				kg⁻¹]		
Casca de café	500	38,80	50,67	22,84	21,77	Presente estudo
Película de café	500	50,00	-	20,95	6,70	Fernández-Ferreras et al. (2023)
Casca de café	500	29,11	68.59	26.67	15.14	Setter et al. (2020)
Sabugo de milho	500	-	44,87	21,84	25,77	Soka; Oyekola (2020)
Bagaço de cana	500	35,82	12,47	-	1,57	Divyangkumar et al. (2024)

As propriedades químicas e energéticas da casca de café e do biochar da presente pesquisa estão apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2 - Composição química e propriedades energéticas da casca de café e do biochar.

Análises	**Amostras**	
	In natura	**Biochar**
Poder calorífico [MJ kg^{-1}]	17,85 $^{(0,7)}$	22,84 $^{(1,5)}$
Materiais Voláteis [%]	69,28 $^{(0,38)}$	27,55 $^{(0,31)}$
Carbono fixo [%]	22,57 $^{(0,52)}$	50,67 $^{(1,06)}$
Cinzas [%]	8,15 $^{(0,17)}$	21,77 $^{(0,87)}$
Lignina [%]	26,73 $^{(1,54)}$	-
Celulose [%]	24,89 $^{(2,12)}$	-
Hemiceluloses [%]	20,24 $^{(1,67)}$	-
Total de extrativos [%]	25,02$^{(1,17)}$	-

Desvio padrão entre parênteses.

As alterações promovidas pela pirólise refletiram diretamente nas propriedades energéticas do material (Tabela 2). Em relação à biomassa in natura, observou-se aumento do teor de carbono fixo e do poder calorífico superior, acompanhado por expressiva redução do teor de materiais voláteis, comportamento característico do enriquecimento da matriz carbonácea decorrente da eliminação de compostos oxigenados durante a carbonização (TOMCZYK et al., 2020). Os valores obtidos para carbono fixo e poder calorífico situam-se na mesma faixa daqueles reportados para biochars produzidos a partir de outros resíduos agrícolas

(Tabela 1), indicando que a casca de café produz um combustível sólido com desempenho energético comparável ao de biomassas amplamente estudadas para aplicações termoquímicas.

Entre os parâmetros avaliados, o teor de cinzas foi o que apresentou maior discrepância em relação aos estudos da literatura (Tabela 1). O biochar produzido neste trabalho apresentou teor de cinzas superior ao relatado para biochars de película e casca de café, bem como para bagaço de cana, sendo inferior apenas ao observado para sabugo de milho. Esse comportamento é esperado em processos de pirólise, uma vez que a degradação da matéria orgânica concentra os constituintes minerais na fração sólida remanescente (MUZYKA et al., 2023). Entretanto, diferenças na composição mineral da biomassa, nas condições de cultivo e nas etapas de beneficiamento podem explicar a variabilidade observada entre os estudos.

Embora o aumento do carbono fixo e do poder calorífico confirme o enriquecimento energético promovido pela pirólise, o elevado teor de cinzas constitui a principal limitação do biochar obtido. Do ponto de vista tecnológico, altas concentrações de minerais podem favorecer a formação de escórias, incrustações e depósitos durante a combustão, reduzindo a eficiência da transferência de calor e aumentando a necessidade de manutenção dos equipamentos. Assim, a viabilidade da utilização desse biochar para fins energéticos deve considerar não apenas seu potencial calorífico, mas também sua composição mineral, sendo recomendável avaliar estratégias para minimizar esses efeitos, como a mistura com biomassas de menor teor de cinzas ou a otimização das condições de pirólise.

A Figura 1a apresenta a micrografia da casca de café in natura, evidenciando uma superfície heterogênea e relativamente compacta, constituída por fragmentos fibrosos e partículas aderidas à matriz lignocelulósica, com baixa incidência de poros visíveis. Após a conversão termoquímica, observa-se uma mudança expressiva na estrutura do material (Figura 1b). O biochar apresenta uma superfície mais rugosa, fragmentada e altamente porosa, caracterizada pela presença de numerosos canais e cavidades distribuídos ao longo da matriz carbonosa.

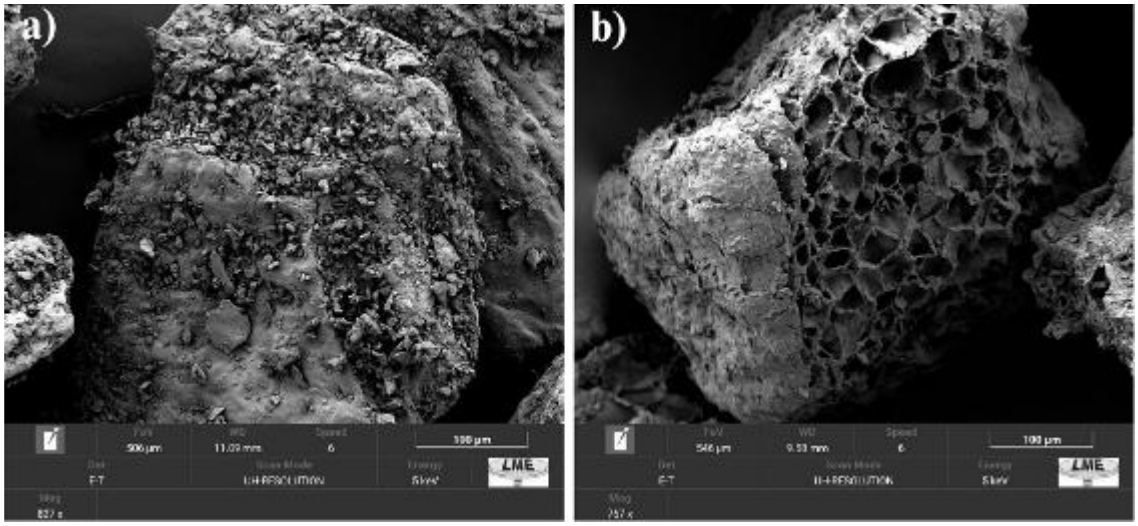


Figura 1 – Micrografias obtidas por microscopia eletrônica de varredura (MEV) da superfície da casca de café, sendo: **a)** in natura e **b)** biochar.

De acordo com Mujtaba et al. (2023), o desenvolvimento dessa estrutura porosa está associado à degradação térmica dos principais constituintes lignocelulósicos, especialmente hemicelulose, celulose e parte da lignina, promovendo a liberação de compostos voláteis e a formação de vazios no material carbonizado. Biomassas mais porosas favorecem a difusão dos gases gerados no processo e facilitam a penetração de calor no interior das partículas, contribuindo para uma decomposição térmica mais eficiente (MUZYKA et al., 2023).

4. Conclusões

A pirólise lenta mostrou-se uma alternativa eficiente para a valorização da casca de café, promovendo a produção de um biochar com maior teor de carbono fixo, maior poder calorífico superior e estrutura porosa, evidenciando o aprimoramento de suas propriedades energéticas em relação à biomassa in natura. Entretanto, estudos futuros são necessários para investigar o efeito de diferentes temperaturas e parâmetros operacionais sobre a qualidade do biochar, bem como validar seu desempenho em sistemas reais de conversão energética, incluindo a avaliação do comportamento de combustão, da formação de escórias e incrustações e da viabilidade técnica e energética do processo.

5. Agradecimentos

Os autores agradecem ao Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia em Tecnologias da Madeira da Amazônia (INCT Madeiras da Amazônia – Processo CNPq 408800/2024-0) e ao Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia em Biorrefinaria de Materiais Lignocelulósicos

(INCT InovaLigno - Processo CNPq 408984/2024-4). Agradecemos, ainda, ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia da Madeira (PPGCTM) e à Universidade Federal de Lavras (UFLA). Os autores também expressam seu agradecimento ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES).

6. Referências bibliográficas

American Society for Testing and Materials. (2013). D1762-84: Standard test method for chemical analysis of wood charcoal. https://doi.org/10.1520/D1762-84R13

American Society for Testing and Materials. (2023). E711-87: Standard test method for gross calorific value of refuse-derived fuel by the bomb calorimeter. https://doi.org/10.1520/E0711-23E01

Castro, A. E., da Silva Martinho, F., Barbosa, M. L., Franca, J. R., Soares, J. B., & Ferreira, G. M. D. (2022). Influence of methyl groups in triphenylmethane dyes on their adsorption on biochars from coffee husks. Water, Air, & Soil Pollution, 233, Article 180. https://doi.org/10.1007/s11270-022-05623-8

Divyangkumar, N., Panwar, N. L., Agrawal, C., Gupta, T., Meena, G. L., & Singh, M. (2024). Cradle-to-gate analyses of biochar produced from agricultural crop residues by vacuum pyrolysis. Clean Energy, 8(6), 1–15. https://doi.org/10.1093/ce/zkae069

Fernández-Ferreras, J., Llano, T., Kochaniec, M. K., & Coz, A. (2023). Slow pyrolysis of specialty coffee residues towards the circular economy in rural areas. Energies, 16, 2300. https://doi.org/10.3390/en16052300

Kennedy, F., Phillips, G. O., & Williams, P. A. (1987). Wood and cellulosics: Industrial utilization, biotechnology, structure and properties. Ellis Horwood.

Lee, M., Lin, Y.-L., Chiueh, P.-T., & Den, W. (2020). Environmental and energy assessment of biomass residues to biochar as fuel: A brief review with recommendations for future bioenergy systems. Journal of Cleaner Production, 251, Article 119714. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119714

Lehmann, J., & Joseph, S. (Eds.). (2015). Biochar for environmental management: Science, technology and implementation (2nd ed.). Routledge. https://doi.org/10.4324/9780203762264

Li, Y., Xing, B., Ding, Y., Han, X., & Wang, S. (2020). A critical review of the production and advanced utilization of biochar via selective pyrolysis of lignocellulosic biomass. Bioresource Technology, 312, 123614. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.123614

Matovic, D. (2011). Biochar as a viable carbon sequestration option: Global and Canadian perspective. Energy, 36(4), 2011–2016. https://doi.org/10.1016/j.energy.2010.09.031

Mujtaba, M., Fraceto, L. F., Fazeli, M., Mukherjee, S., Savassa, S. M., Medeiros, G. A., Pereira, A. E. S., Mancini, S. D., Lipponen, J., & Vilaplana, F. (2023). Lignocellulosic biomass from agricultural waste to the circular economy: A review with focus on biofuels, biocomposites and bioplastics. Journal of Cleaner Production, 402, Article 136815. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.136815

Muzyka, R., Misztal, E., Hrabak, J., Banks, S. W., & Sajdak, M. (2023). Various biomass pyrolysis conditions influence the porosity and pore size distribution of biochar. Energy, 263, Article 126128. https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.126128

Rozbu, M. R., Kabir, A., & Selvakumar, P. M. (2021). Functionalized bio-carbon nanomaterials for environmental utilizations. In Environmental applications of carbon nanomaterials-based devices (Chap. 15). Wiley. https://doi.org/10.1002/9783527830978.ch15

Setter, C., Borges, F. A., Cardoso, C. R., Mendes, R. F., & Oliveira, T. J. P. (2020). Energy quality of pellets produced from coffee residue: Characterization of the products obtained via slow pyrolysis. Industrial Crops and Products, 154, Article 112731. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2020.112731

Soka, O., & Oyekola, O. (2020). A feasibility assessment of the production of char using the slow pyrolysis process. Heliyon, 6(7), e04346. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e04346

Technical Association of the Pulp and Paper Industry. (2002a). T 222 om-02: Acid-insoluble lignin in wood pulp. TAPPI.

Technical Association of the Pulp and Paper Industry. (2002b). T 211 om-02: Ash in wood, pulp, paper and paperboard: Combustion at 525 °C. TAPPI.

Technical Association of the Pulp and Paper Industry. (2007). T 204 om-97: Solvent extractives of wood and pulp. TAPPI.

Tomczyk, A., Sokołowska, Z., & Boguta, P. (2020). Biochar physicochemical properties: pyrolysis temperature and feedstock kind effects. Reviews in Environmental Science and Biotechnology, 19, 191–215. https://doi.org/10.1007/s11157-020-09523-3

United States Department of Agriculture, Foreign Agricultural Service. (2025). Coffee: World markets and trade. https://apps.fas.usda.gov/psdonline/circulars/coffee.pdf

Wang, H., Wang, X., Cui, Y., Xue, Z., & Ba, Y. (2018). Slow pyrolysis polygeneration of bamboo (Phyllostachys pubescens): Product yield prediction and biochar formation mechanism. Bioresource Technology, 263, 444–449. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.05.040

Yang, T., Zhong, J., Liu, J., Yuan, Y., Yang, D., Mao, Q., Li, X., & Guo, Z. (2021). A general strategy for antimony-based alloy nanocomposite embedded in Swiss-cheese-like nitrogen-doped porous carbon for energy storage. Advanced Functional Materials, 31(13), Article 2009433. https://doi.org/10.1002/adfm.202009433

Zhu, X., He, M., Sun, Y., Xu, Z., Wan, Z., Hou, D., Alessi, D. S., & Tsang, D. C. W. (2022). Insights into the adsorption of pharmaceuticals and personal care products (PPCPs) on biochar and activated carbon with the aid of machine learning. Journal of Hazardous Materials, 423, Article 127060. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.127060

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Dados da produção de carvão vegetal do Brasil entre 1994 e 2024

Kyvia Pontes Teixeira das Chagas[1]; Stephanni Ingrid de Souza Silva[1]

[1] Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais, Universidade Federal do Rio Grande do Norte.

Resumo: O carvão vegetal proveniente da extração vegetal desempenha importante papel na economia florestal. Nesse contexto, o presente estudo teve como objetivo analisar a evolução da produção de carvão vegetal oriunda da extração vegetal no Brasil entre 1994 e 2024, por meio dos dados disponibilizados pelo IBGE. Observou-se elevada variabilidade espacial da produção, com destaque para Minas Gerais, Mato Grosso do Sul, Pará, Maranhão, Bahia e Goiás, que apresentaram as maiores médias de produção ao longo do período analisado. A análise temporal evidenciou uma tendência geral de redução da produção extrativista de carvão vegetal, embora alguns estados tenham apresentado oscilações e períodos de crescimento. O pico nacional de produção ocorreu em 2005, com aproximadamente 2,97 milhões de toneladas, enquanto o menor valor foi registrado em 2018, com cerca de 338 mil toneladas. Os resultados reforçam a necessidade de monitoramento contínuo da produção extrativista.

Palavras-chave: Extrativismo vegetal; Economia florestal; Produtos florestais.

.

Vegetal charcoal production in Brazil from 1994 to 2024

Abstract: Charcoal produced from native forest extraction plays an important role in the forest sector economy. In this context, the present study aimed to analyze the evolution of charcoal production derived from native forest extraction in Brazil between 1994 and 2024 using data provided by the Brazilian Institute of Geography and Statistics (IBGE). A high degree of spatial variability in production was observed, with the states of Minas Gerais, Mato Grosso do Sul, Pará, Maranhão, Bahia, and Goiás showing the highest average production throughout the study period. Temporal analysis revealed an overall declining trend in extractive charcoal production, although some states exhibited fluctuations and periods of growth. National production peaked in 2005 at approximately 2.97 million tons, while the lowest production was recorded in 2018, at around 338 thousand tons. These findings highlight the need for continuous monitoring of extractive charcoal production.

Keywords: Forest extraction; Forest economy; Forest products

1. Introdução

O carvão vegetal é historicamente conhecido como um dos principais subprodutos florestais, sendo amplamente utilizado como fonte de energia renovável, desempenhando

um papel estratégico em diversos setores da economia brasileira (Brito, 1993). Sua utilização é amplamente difundida na indústria siderúrgica, especialmente na produção de ferro-gusa e aço, além de atender às demandas dos setores doméstico, comercial e agroindustrial (Vital & Pinto, 2009). Sabe-se que, em comparação aos combustíveis fósseis, o carvão vegetal apresenta

potencial para reduzir as emissões de gases de efeito estufa quando proveniente de fontes manejadas de forma sustentável. Entretanto, sua produção pode estar associada tanto ao cultivo de florestas plantadas quanto à exploração de formações florestais nativas, o que torna indispensável o monitoramento da origem desse recurso (Oliveira et al., 2013).

Assim, a produção de carvão vegetal oriunda da extração vegetal insere-se no contexto do extrativismo florestal, atividade caracterizada pela obtenção de produtos provenientes de ecossistemas naturais, sem o estabelecimento de cultivos florestais. No Brasil, o extrativismo vegetal representa uma importante fonte de matéria-prima e de geração de renda para a população de diferentes regiões (Oliveira et al., 2023). Contudo, ao longo das últimas décadas, a exploração dos recursos florestais sofreu alterações significativas. É possível mencionar que o avanço da silvicultura comercial, a intensificação da fiscalização ambiental, a criação de unidades de conservação e a implementação de instrumentos legais alteraram a forma como o extrativismo tradicionalmente ocorria (Dittmar, 2023). Nesse cenário, a análise histórica da produção de carvão vegetal proveniente do extrativismo permite compreender as transformações ocorridas na utilização dos recursos florestais brasileiros.

Nesse sentido, a cadeia produtiva do carvão vegetal possui relevância para o desenvolvimento regional e nacional, contribuindo para a geração de emprego, renda e abastecimento energético de diversos segmentos produtivos (Pedro et al., 2026). Historicamente, a produção baseada na extração vegetal apresentou elevada participação na oferta de carvão no país. Entretanto, nas últimas décadas, observa-se um aumento dos investimentos em reflorestamento, pela maior competitividade da silvicultura e pelo fortalecimento das exigências ambientais. Assim, compreender a evolução da produção extrativa de carvão vegetal torna-se fundamental para avaliar as mudanças estruturais ocorridas no setor florestal brasileiro (Santos et al., 2023).

Apesar de sua importância socioeconômica, a exploração de madeira nativa destinada à produção de carvão vegetal pode representar uma ameaça à conservação da

Biodiversidade, quando realizada de forma não sustentável, visto que a supressão da vegetação natural promove a fragmentação dos habitats, reduz a disponibilidade de recursos para a fauna e a flora, comprometendo os serviços ecossistêmicos. Embora o aprimoramento da legislação ambiental e a ampliação das áreas protegidas tenham contribuído para reduzir a pressão sobre as florestas nativas, o acompanhamento da produção extrativista permanece essencial para

subsidiar políticas públicas de conservação, manejo florestal sustentável e uso racional dos recursos naturais.

Diante desse contexto, o presente estudo teve como objetivo analisar a evolução da produção de carvão vegetal proveniente da extração vegetal no Brasil, no período de 1994 a 2024, utilizando dados da Pesquisa da Produção da Extração Vegetal e da Silvicultura (PEVS), disponibilizados pelo Sistema IBGE de Recuperação Automática (SIDRA).

2. Material e métodos

O presente estudo foi realizado a partir da coleta de dados no Sistema IBGE de Recuperação Automática (SIDRA), utilizando as informações disponibilizadas pela Pesquisa da Produção da Extração Vegetal e da Silvicultura (PEVS), desenvolvida anualmente pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) (IBGE, 2026). Os dados disponibilizados englobam a quantidade produzida e o valor da produção dos principais produtos da extração vegetal e da silvicultura em todo o território nacional.

Nesse cenário, para o presente estudo foram selecionados os dados referentes à quantidade produzida de carvão vegetal oriundo do extrativismo vegetal, abrangendo a série de dados entre os anos de 1994 e 2024. Os dados foram extraídos diretamente da plataforma SIDRA, organizados e analisados em Microsoft Excel.

3. Resultados e discussão

Para possibilitar uma visualização mais detalhada, os dados foram avaliados por região e estado do Brasil (Tabela 1). Na região Nordeste foi observado que Alagoas é o estado com menor produção extrativista de carvão vegetal, com média de 618 toneladas no intervalo de 1994 a 2024. Na região Sudeste, o estado com menor produção foi o Rio de Janeiro, com 68 toneladas. No Centro-Oeste foi o estado de Mato Grosso, com 20.950 toneladas. No Norte foi o estado de Rondônia, com 380 toneladas. Já na região Sul, o estado do Rio Grande do Sul teve a menor produção, com 890 toneladas.

Tabela 1 – Produção média, mínima e máxima de carvão vegetal em toneladas por região e por estado do Brasil no intervalo de 1994 a 2024. Fonte (IBGE, 2026).

Região /	Estado	Média	Máximo	Mínimo
Nordeste	AL	618	3.628	5
	BA	103.481	799.230	20.022
	CE	12.034	35.151	6.966

	MA	263.029	736.979	91.649
	PB	2.149	6.547	735
	PE	8.466	14.403	6.209
	PI	61.186	181.825	5.687
	RN	2.917	8.649	1.737
	SE	858	4.403	18
Sudeste	**ES**	5.745	73.203	4
	MG	274.396	1.005.114	485
	RJ	68	212	8
	SP	3.056	11.157	340
Centro-Oeste	**GO**	104.467	335.715	281
	MT	20.950	77.821	2.681
	MS	196.492	602.158	37.742
Norte	**AC**	2.010	2.665	1.341
	AP	763	1.400	369
	AM	2.703	5.721	558
	PA	196.468	786.701	13.145
	RA	407	543	64
	RO	380	1.635	0
	TO	15.033	106.718	597
Sul	**PR**	56.032	186.398	6.256
	RS	890	1.965	169
	SC	6.127	27.935	62

Analisando os valores médios de produção, apenas seis estados tiveram produção acima de 100.000 toneladas, sendo estes: Bahia, Maranhão, Minas Gerais, Goiás, Mato Grosso do Sul e Pará, com destaque para Minas Gerais, que teve o maior valor de produção. Historicamente, esses estados apresentam dados elevados para a produção de carvão, demonstrando que o padrão vem sendo mantido ao longo dos anos (Simioni et al., 2017).

Os dados também foram organizados em escala anual, para que seja possível entender a sequência temporal da produção (Tabela 2). Na região Nordeste, todos os estados apresentaram produtividade dentro do intervalo de tempo analisado, apesar da produção decair com o passar dos anos na maioria dos estados. Apenas a Bahia, Maranhão e Piauí tiveram valores aumentando conforme o passar das décadas. No Sudeste não foi possível observar um padrão, visto que alguns estados apresentaram anos sem produtividade e os demais oscilaram, com Minas Gerais tendo um padrão decrescente de produção. Para o Centro-Oeste o padrão foi decrescente para o estado de Goiás, enquanto o Mato Grosso e o Mato Grosso do Sul tiveram aumento e queda na produção ao longo do tempo. Na região Norte, Rondônia foi o estado que apresentou mais anos sem produtividade e o Pará foi o estado mais produtivo, mesmo oscilando

no padrão de produtividade. Na região Sul apenas o Paraná apresentou um crescimento na produção, mas logo em seguida também foi observada uma redução.

Tabela 2 – Produção de carvão vegetal em toneladas por região e por estado do Brasil. Fonte (IBGE, 2026).

Região / Estado	Nordeste									Sudeste			
	AL	BA	CE	MA	PB	PE	PI	RN	SE	ES	MG	RJ	SP
1994	3.628	40.852	33.965	189.292	6.547	14.403	5.687	8.649	4.403	8.242	1.005.114	157	11.157
1995	3.392	34.435	35.151	189.348	5.397	12.631	6.971	5.592	3.167	11.313	885.551	212	10.768
1996	3.262	29.066	15.657	139.138	5.942	10.171	21.377	4.481	1.668	73.203	648.150	193	9.576
1997	1.636	24.590	11.782	136.928	5.496	6.845	21.300	4.053	1.536	2.836	607.730	-	8.414
1998	1.564	21.833	12.314	134.670	4.802	6.879	20.409	3.733	1.422	409	462.774	-	4.983
1999	1.363	20.022	11.366	132.523	4.348	7.262	19.322	3.520	1.372	485	430.196	27	1241
2000	1.107	20.270	11.384	148.721	3.536	7.511	18.196	3.308	1.285	434	413.319	24	1.153
2001	1.049	63.132	11.211	208.142	2.958	6.209	17.377	3.101	1.169	272	382.298	30	851
2002	624	25.468	11.390	259.900	2.547	9.333	18.061	3.059	1.094	51	446.902	30	852
2003	460	31.160	11.667	474.441	2.074	9.053	16.550	2.742	1.111	241	306.281	8	1.115
2004	156	230.436	11.696	430.651	1.714	8.746	16.563	2.561	1.120	1.196	434.013	25	1.510
2005	111	799.230	11.630	502.527	1.792	8.590	26.374	2.484	1.126	1.021	308.354	25	1.802
2006	105	363.135	11.642	477.639	1.717	9.304	41.828	2.253	1.174	904	263.664	124	1.298
2007	107	55.127	11.571	736.979	1.599	10.529	149.232	2.165	1.115	5.492	419.802	-	777
2008	92	159.402	11.499	530.133	1.367	9.083	169.664	2091	1.017	2.636	399.278	-	660
2009	89	143.531	11.340	474.536	1.230	8.812	55.566	2.000	916	279	282.199	25	631
2010	79	131.156	11.113	335.982	1.163	8.899	181.825	1.958	811	124	207.008	-	450
2011	76	115.385	11.180	339.773	981	9.016	137.729	1.923	477	4	156.510	-	480
2012	66	106.629	11.001	346.277	915	8.751	116.468	1.820	292	6	115.687	-	-
2013	59	102.000	11.328	316.445	779	8.284	112.695	1.876	54	-	101.045	...	340
2014	33	101.714	11220	282.588	736	8.099	145.795	1.776	45	-	67.459	...	-
2015	32	102.994	10.771	229.318	735	7.355	154.855	1.818	35	-	48.291	...	-
2016	8	100.490	10583	160.851	799	7.079	72.834	1.746	26	-	42.440	-	-
2017	9	53.078	7.399	131.663	794	7.112	64.919	1.737	24	-	21.539	-	-
2018	6	48.761	6.966	107.125	925	7.799	46.995	1.801	23	-	12.377	52	-
2019	5	48.317	7.118	97.777	941	7.420	46.677	2.592	22	-	6.204	52	-
2020	5	45.659	6.966	103.129	966	6.808	40.416	2.392	21	-	6.272	52	-
2021	6	43.037	7.613	142.555	918	7.027	53.411	3.127	20	-	10.598	52	-
2022	14	48.879	8.033	127.018	946	7.366	30.828	3.291	19	-	11.141	-	-
2023	14	48.301	8.494	91.649	968	8.277	25.128	3.437	18	-	485	-	-
2024	15	49.826	7.998	176.192	984	7.805	41.718	3.334	18	-	3.586	-	-

Região / Estado	Centro-Oeste			Norte							Sul		
	GO	MT	MS	AC	AP	AM	PA	RA	RO	TO	PR	RS	SC
1994	211.708	4.544	155.496	1.647	410	558	92.459	-	368	597	57.508	1.455	27.935
1995	206.362	3.816	209.839	1.341	411	614	89.722	...	549	598	73.756	1.399	12.819
1996	139.383	4.243	165.347	2.287	435	3.512	119.339	484	288	3.027	45.326	1.917	13.893

1997	124.823	2.996	112.422	2.301	421	3.805	485.454	479	288	2.190	69.244	1.965	11.300
1998	103.247	2.681	61.328	2.185	403	4.081	347.792	497	291	2.095	71.854	1.879	9.908
1999	93.452	3.670	75.760	2.133	414	4.134	380.552	511	301	2.029	70.938	1.889	12.294
2000	116.689	4.594	111.071	2.105	399	4.241	470.604	519	233	1.218	72.378	1.865	13.017
2001	131.345	5.797	129.056	2.037	372	4.622	668.798	499	412	1.166	73.479	1.740	12.197
2002	150.159	8.065	154.604	2.118	387	4.826	754.247	467	328	1.173	89.094	1.549	9.050
2003	246.154	9.247	213.302	2.226	369	4.877	786.701	480	308	9.638	86.867	1.469	8.665
2004	335.715	13.901	516.798	1.743	436	4.965	13.145	495	-	11.533	136.462	1.431	8.940
2005	320.636	35.494	558.688	1.744	451	5.022	202.618	542	-	20.503	151.824	1.046	8.767
2006	285.793	41.824	602.158	1.698	463	5.122	216.017	543	-	20.191	148.267	984	7.884
2007	227.572	40.636	428.874	1.736	435	5.362	217.668	535	-	19.106	186.398	732	6.874
2008	158.312	54.701	416.712	1.802	477	5.721	99.513	491	-	21.828	169.933	692	4.885
2009	133.028	76.812	290.901	1.824	515	2.978	99.065	499	-	22.138	25.820	659	4.386
2010	111.069	77.821	286.023	1.777	594	2.212	100.728	504	-	10.135	27.220	626	3.719
2011	52.040	51.353	359.314	2.665	729	2.108	73.598	501	59	9.611	22.640	479	2.561
2012	25.928	55.352	259.616	2.027	829	1.534	58.392	534	44	22.587	21.983	539	2.417
2013	14.930	31.319	206.312	1.864	961	1.439	54.647	521	0	15.026	21.841	383	2.109
2014	24.598	18.105	172.312	2.000	977	1.430	54.265	499	0	106.718	19.093	309	1.290
2015	5.186	14.147	100.072	2.469	1.042	1.348	26.918	425	0	70.156	18.381	261	656
2016	3.746	9.723	63.117	2.572	1.140	1.278	24.348	472	-	30.411	9.862	287	468
2017	2.936	8.872	64.990	2.264	1.222	1.259	23.318	-	-	28.499	9.610	448	269
2018	1.578	11.463	56.921	2.108	1.278	987	16.576	-	-	6.316	7.742	365	590
2019	2.476	11.290	55.229	2.069	1.359	940	64.060	64	256	8.522	8.155	237	574
2020	4.726	10.217	49.280	2.056	1.383	954	72.279	72	5	5.064	9.175	237	608
2021	3.522	9.384	60.666	2.070	1.355	937	74.113	77	-	6.681	9.603	193	780
2022	542	11.430	62.679	1.923	1.400	935	139.485	89	1.635	3.169	9.879	201	779
2023	281	8.800	37.742	1.787	1.354	949	129.647	96	1.375	2.737	6.407	188	240
2024	544	7.144	54.630	1.740	1.230	1.040	134.444	100	869	1.370	6.256	169	62

De modo geral, é possível descrever que os valores não apresentam um padrão pré-definido conforme a região. Na realidade, essa produtividade sofre influência de diversos aspectos, principalmente vinculados às características locais (Simioni et al., 2017). Para que seja possível entender o efeito, é necessário que sejam analisados aspectos mais pontuais, com localidades mais específicas e com os fatores conhecidos, visto que a dimensão territorial exerce um efeito representativo no resultado (Neves et al., 2011).

Ao longo dos anos analisados, foi possível observar que a produção sempre apresentou valores superiores a 300.000 toneladas de carvão vegetal (Figura 1). No intervalo temporal, o ano com menor produtividade foi o de 2018, com aproximadamente 338.000 toneladas. O pico de produção foi observado em 2005, com 2.972.405 toneladas. O valor médio de produção nesse intervalo temporal foi de 1.337.526 toneladas.

Figura 1 – Quantidade produzida de carvão vegetal na extração vegetal de 1994 a 2024. Fonte: (IBGE, 2026)

4. Conclusões

Por meio dos dados observados, foi possível perceber que a produção de carvão vegetal proveniente da extração vegetal sofreu alterações entre 1994 e 2024, tendendo a uma redução da produção nacional, embora com diferenças marcantes entre estados e regiões. Minas Gerais foi o principal produtor ao longo da série histórica, enquanto estados das regiões Norte e Nordeste, como Pará, Maranhão e Bahia, também apresentaram elevada representatividade na produção extrativista.

O sistema PEVS/SIDRA constitui uma importante ferramenta para compreender a dinâmica do uso dos recursos florestais, podendo ser utilizado como um apoio na ação de políticas públicas voltadas ao manejo sustentável, contribuindo para uma compreensão mais abrangente dos fatores que influenciam a produção de carvão vegetal no país.

5. Agradecimentos

Os autores agradecem à Universidade Federal do Rio Grande do Norte e à Escola Agrícola de Jundiaí pelo incentivo à pesquisa. Além disso, o presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

6. Referências bibliográficas

Brito, J. O. (1993). Reflexões sobre a qualidade do carvão vegetal para uso siderúrgico. Piracicaba: IPEF.

Dittmar, H. (2023). Crimes ambientais na cadeia produtiva do carvão vegetal nativo brasileiro. RECIMA21 - Revista Científica Multidisciplinar - ISSN 2675-6218, 4(12), e4124684-e4124684.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. (2024). Sistema IBGE de Recuperação Automática (SIDRA): Pesquisa da Produção da Extração Vegetal e da Silvicultura (PEVS) – Quadros Brasil 2024. https://sidra.ibge.gov.br/pesquisa/pevs/quadros/brasil/2024

Neves, T. A., de Paula Protásio, T., Couto, A. M., Trugilho, P. F., Silva, V. O., & Vieira, C. M. M. (2011). Avaliação de clones de Eucalyptus em diferentes locais visando à produção de carvão vegetal. Pesquisa Florestal Brasileira, 31(68), 319-319.

Oliveira, A. C., Carneiro, A. D. C. O., Pereira, B. L. C., Vital, B. R., Carvalho, A. M. M. L., Trugilho, P. F., & Damásio, R. A. P. (2013). Otimização da produção do carvão vegetal por meio do controle de temperaturas de carbonização. Revista Árvore, 37, 557-566.

Oliveira, M. E. Q., Silva, A. J., Jr., Carneiro, A. D. C. O., & Nobre, J. R. C. (2023). Analysis of the charcoal production situation in Brazil and in the state of Pará: Análise da conjuntura da produção de carvão vegetal no Brasil e no estado do Pará. Clium Editions, 23(21), 89-107.

Pedro, P. M. J., Kussumua, S. J. F., Nkolongo, M. A. S., & Malengue, A. S. (2026). Avaliação do impacto socioambiental da produção de carvão vegetal na comunidade de cachindongo-cuima (HUAMBO). Revista Científica da Universidade José Eduardo dos Santos, 6(1).

Santos, A. J., Jr., Amorim, G. A., Pereira, A. K. S., Carmona, I. N., Silva, K. C. A., & Dias, A. F., Jr. (2023). Espécies nativas em florestas plantadas como fonte de matéria-prima para a produção de carvão vegetal. Série Técnica IPEF, 26(48).

Simioni, F. J., Moreira, J. M. M. Á. P., Fachinello, A. L., Buschinelli, C. C. D. A., & Matsuura, M. I. D. S. F. (2017). Evolução e concentração da produção de lenha e carvão vege-tal da silvicultura no Brasil. Ciência Florestal, 27, 731-742.

Vital, M. H. F., & Pinto, M. A. C. (2009). Condições para a sustentabilidade da produção de carvão vegetal para fabricação de ferro-gusa no Brasil.

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Eco-anatomia e inteligência artificial aplicadas à rastreabilidade de carvão de manguezais da Amazônia brasileira

Madson Lucas Galvão[1]; Kaick Coelho de Sousa[2]; Luiz Eduardo de Lima Melo[2]; Iedo Souza Santos[3]; Marcus Emanuel Barroncas Fernandes[1]

[1] Laboratório de Ecologia de Manguezal–LAMA, Instituto de Estudos Costeiros–IECOS, Universidade Federal do Pará–UFPA, Bragança, Pará 68600-000, Brasil
[2] Laboratório de Ciência e Tecnologia da Madeira, Universidade do Estado do Pará–UEPA, Marabá, Pará 68503-120, Brasil
[3] Programa de Pós-Graduação em Tecnologia, Recursos Naturais e Sustentabilidade na Amazônia, Departamento de Tecnologia e Recursos Naturais, Universidade do Estado do Pará–UEPA, Belém, Pará 66095-015, Brasil

Resumo: O carvão vegetal produzido a partir de espécies de manguezal apresenta elevado potencial energético, porém sua identificação taxonômica após a carbonização constitui um desafio para ações de fiscalização e rastreabilidade da origem da matéria-prima. Este estudo teve como objetivo desenvolver e avaliar uma abordagem baseada em visão computacional e inteligência artificial para discriminar espécies de carvão de manguezais da costa amazônica brasileira. Foram utilizadas amostras de *Avicennia germinans*, *Laguncularia racemosa* e *Rhizophora mangle*, cujas imagens anatômicas foram obtidas por microscopia eletrônica de varredura. Após o pré-processamento das imagens, foram extraídos descritores anatômicos quantitativos relacionados à organização dos vasos e descritores de textura derivados da Matriz de Coocorrência de Níveis de Cinza (GLCM), empregados na classificação das espécies por meio de Support Vector Machine (SVM). A análise multivariada evidenciou diferenças entre as espécies, associadas principalmente à organização dos vasos e aos padrões de textura. Os dois primeiros componentes da Análise de Componentes Principais (PCA) explicaram 65,25% da variabilidade total dos dados. No conjunto de teste, o modelo SVM apresentou acurácia de 80,0%, com precisão média de 80,56%, revocação média de 80,00% e F1-score médio de 79,80%. *Rhizophora mangle* apresentou 100% de precisão, revocação e F1-score, enquanto os principais erros de classificação ocorreram entre *A. germinans* e *L. racemosa*. Os resultados demonstram que a integração entre a anatomia do carvão, a visão computacional e o aprendizado de máquina apresentam potencial para a discriminação automatizada de espécies e para o desenvolvimento de ferramentas de apoio à rastreabilidade do carvão vegetal proveniente de manguezais amazônicos.

Palavras-chave: Inteligência Artificial; Visão Computacional; Rastreabilidade.

Eco-anatomy and artificial intelligence applied to the traceability of mangrove charcoal from the Brazilian Amazon

Abstract: Charcoal produced from mangrove species possesses high energy potential; however, identifying the species after carbonization poses a challenge for enforcement and raw material traceability. This study aimed to develop and evaluate an approach based on computer vision and artificial intelligence to distinguish between mangrove charcoal species from the Brazilian Amazon coast. Samples of *Avicennia germinans*, *Laguncularia racemosa*, and *Rhizophora mangle* were used, with anatomical images obtained via scanning electron microscopy. Following image preprocessing, quantitative anatomical descriptors related to

vessel organization and texture descriptors derived from the Gray-Level Co-occurrence Matrix (GLCM) were extracted and used to classify the species via Support Vector Machine (SVM). Multivariate analysis revealed differences among the species, primarily associated with vessel organization and texture patterns. The first two components of the Principal Component Analysis (PCA) explained 65.25% of the total data variability. On the test set, the SVM model achieved an accuracy of 80.0%, with a mean precision of 80.56%, mean recall of 80.00%, and mean F1-score of 79.80%. *Rhizophora mangle* showed 100% precision, recall, and F1-score, while the main classification errors occurred between *A. germinans* and *L. racemosa*. The results demonstrate that integrating charcoal anatomy, computer vision, and machine learning holds potential for automated species discrimination and for developing tools to support the traceability of charcoal derived from Amazonian mangroves.

Keywords: Artificial Intelligence; Computer Vision; Traceability.

1. Introdução

Os manguezais constituem ecossistemas costeiros de elevada produtividade biológica, distribuídos em regiões tropicais e subtropicais, desempenhando funções essenciais para a manutenção da biodiversidade, proteção da linha de costa, ciclagem de nutrientes e sequestro de carbono (Alongi, 2014, 2025; Tomlinson, 2016). O Brasil abriga a segunda maior área contínua de manguezais do planeta, concentrando mais de 80% dessa cobertura ao longo da costa amazônica, especialmente entre os estados do Pará e Maranhão, onde se encontra a maior faixa contínua de manguezais do planeta (Diniz et al., 2019; Hayashi et al., 2019). Além da importância ecológica, esses ambientes sustentam comunidades tradicionais que dependem diretamente dos recursos florestais para atividades como construção civil, fabricação de currais de pesca, embarcações e principalmente produção de lenha e carvão vegetal (Galvão et al., 2024, 2025).

Entre as espécies arbóreas mais utilizadas para fins energéticos destacam-se *Rhizophora mangle* L., *Avicennia germinans* (L.) L. e *Laguncularia racemosa* (L.) C.F. Gaertn., devido à elevada disponibilidade de madeira e às suas características energéticas (Galvão et al., 2024). Entretanto, após o processo de carbonização, a identificação taxonômica do carvão torna-se significativamente mais difícil, limitando ações de fiscalização ambiental e rastreabilidade da origem da matéria-prima (Muñiz et al., 2012). Essa limitação favorece a comercialização de carvão proveniente de extrações irregulares, especialmente em áreas protegidas, onde o uso dos recursos madeireiros é regulamentado por instrumentos legais e planos de manejo.

A anatomia da madeira e do carvão vegetal representa uma das ferramentas mais confiáveis para a identificação de espécies florestais, uma vez que diversas características anatômicas permanecem preservadas após a carbonização (Perdigão et al., 2020). Contudo, os

métodos convencionais dependem da análise realizada por especialistas, tornando o processo lento e pouco escalável para programas de monitoramento e controle. Nesse contexto, o avanço das técnicas de visão computacional e inteligência artificial tem possibilitado o desenvolvimento de sistemas automatizados capazes de reconhecer padrões anatômicos e texturais com elevada precisão, ampliando as possibilidades de aplicação dessas tecnologias na ciência da madeira e na rastreabilidade de produtos florestais (Hwang & Sugiyama, 2021).

Apesar dos avanços na identificação automatizada de madeiras por meio de visão computacional e aprendizado de máquina, a aplicação dessas ferramentas ao carvão vegetal apresenta um desafio adicional: o processo de carbonização modifica propriedades físicas e morfológicas da madeira, reduzindo a disponibilidade de caracteres tradicionalmente utilizados na identificação taxonômica. Nesse contexto, a identificação de espécies de carvão depende da capacidade de reconhecer e quantificar padrões anatômicos que permanecem preservados após a carbonização. Características relacionadas à organização dos vasos, como número, área, diâmetro, circularidade e distância entre vasos, podem ser convertidas em variáveis quantitativas por meio do processamento digital de imagens. De forma complementar, descritores de textura podem capturar diferenças na distribuição espacial dos níveis de cinza associadas à organização conjunta de vasos, raios, parênquima e demais estruturas anatômicas presentes nas imagens.

A utilização combinada dessas informações apresenta uma vantagem metodológica em relação à análise exclusivamente visual, pois transforma características anatômicas observáveis em variáveis mensuráveis e reprodutíveis, que podem ser integradas a modelos de classificação. Essa abordagem é particularmente relevante para o carvão de espécies de manguezal, cuja identificação após a carbonização precisa ser suficientemente objetiva e replicável para apoiar processos de fiscalização e rastreabilidade da matéria-prima. Assim, mais do que suprir a ausência de estudos específicos, a proposta deste trabalho busca avaliar se características anatômicas preservadas no carvão podem ser quantitativamente representadas por descritores de imagem e utilizadas para discriminar espécies por aprendizado de máquina.

Dessa forma, este trabalho teve como objetivo desenvolver e avaliar uma abordagem baseada em visão computacional e inteligência artificial para a discriminação de *A. germinans*, *L. racemosa* e *R. mangle* a partir de imagens anatômicas do carvão vegetal. Para isso, foram integrados descritores anatômicos quantitativos relacionados à organização dos vasos e descritores de textura derivados da Matriz de Coocorrência de Níveis de Cinza (GLCM), posteriormente utilizados na classificação das espécies por meio de Support Vector Machine

(SVM). A abordagem foi concebida como uma etapa inicial para avaliar a capacidade desses atributos de representar diferenças interespecíficas preservadas após a carbonização e, consequentemente, seu potencial de aplicação em sistemas automatizados de identificação e rastreabilidade de carvão vegetal.

2. Material e métodos

2.1. Coleta do material e produção do carvão

Foram selecionadas três espécies arbóreas de manguezal amplamente distribuídas na costa amazônica brasileira: *A. germinans*, *L. racemosa* e *R. mangle*. Cinco árvores de cada espécie foram coletadas, adotando-se como critério indivíduos com Diâmetro à Altura do Peito (DAP) próximo ao valor mediano da população. A coleta foi realizada mediante autorização do Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade (SISBIO nº 77770-1).

De cada árvore foi retirada uma seção do tronco para obtenção de corpos de prova com dimensões de 1,5 × 1,5 × 3,0 cm. A carbonização foi realizada em forno elétrico, com taxa de aquecimento de 1,67 °C min^{-1} até a temperatura final de 450 °C, mantendo-se nessa temperatura por 30 minutos, totalizando aproximadamente quatro horas de processo.

A coleta das amostras, a produção do carvão vegetal e a caracterização anatômica inicial seguiram a metodologia descrita por Sousa (2024), servindo de base para a obtenção do conjunto de imagens utilizado nas análises de visão computacional e de inteligência artificial deste estudo.

2.2. Aquisição e processamento das imagens

Após a carbonização, as amostras foram fraturadas manualmente e analisadas em microscópio eletrônico de varredura (MEV), obtendo-se imagens das seções transversais, tangenciais e radiais do carvão vegetal. Todas as imagens foram padronizadas para resolução de 512 × 512 pixels e submetidas a etapas de pré-processamento utilizando técnicas de visão computacional. Foram aplicados realce local de contraste por meio do algoritmo Contrast Limited Adaptive Histogram Equalization (CLAHE), filtragem gaussiana para redução de ruídos e segmentação automática pelo método de Otsu, seguida de operações morfológicas de abertura e fechamento para refinamento das estruturas anatômicas.

As imagens anatômicas obtidas por microscopia eletrônica de varredura foram provenientes da coleção produzida por Sousa (2024), que realizou a descrição microscópica do carvão vegetal das três espécies de manguezal. Neste estudo, essas imagens constituíram a base para o processamento digital, extração de descritores ecoanatômicos e desenvolvimento dos modelos de inteligência artificial.

2.3. Extração dos descritores ecoanatômicos e de textura

A extração das variáveis foi realizada por meio de rotinas desenvolvidas na biblioteca OpenCV. Foram obtidos descritores ecoanatômicos relacionados à organização dos vasos, incluindo número de poros, área média, densidade, diâmetro médio, coeficiente de variação do diâmetro, circularidade e distância entre vasos. Adicionalmente, foram calculados descritores de textura utilizando a Matriz de Coocorrência de Níveis de Cinza (Gray-Level Co-occurrence Matrix – GLCM), contemplando contraste, homogeneidade, energia, correlação, dissimilaridade, momento angular secundário (ASM) e entropia.

2.4. Análise estatística e inteligência artificial

Os descritores extraídos foram padronizados pelo método z-score utilizando StandardScaler. O conjunto de imagens foi dividido em 70% para treinamento e 30% para teste, utilizando amostragem estratificada por espécie e random_state = 42. No conjunto de treinamento, foram aplicadas transformações de aumento de dados, incluindo a imagem original, espelhamento horizontal e rotação de 90°, enquanto as imagens do conjunto de teste foram mantidas sem transformações.

A classificação foi realizada por meio do algoritmo Support Vector Machine (SVM), utilizando kernel de função de base radial (RBF). Os hiperparâmetros C e γ foram otimizados por busca em grade (GridSearchCV), considerando C = 1, 10 e 100 e γ = scale, 0,1 e 0,01, com validação cruzada de cinco folds no conjunto de treinamento. O melhor modelo foi posteriormente aplicado ao conjunto de teste independente.

O desempenho da classificação foi avaliado por acurácia, precisão, revocação, F1-score e matriz de confusão. Adicionalmente, foi calculada a média do desempenho obtido na validação cruzada de cinco folds do conjunto de treinamento. A PCA foi aplicada ao conjunto completo de descritores padronizados exclusivamente para visualização da estrutura multivariada dos dados e identificação dos principais eixos de variação entre as espécies.

3. Resultados e discussão

3.1 Caracterização ecoanatômica de referência

A caracterização ecoanatômica empregada neste estudo foi baseada na descrição anatômica microscópica do carvão vegetal realizada por Sousa (2024), utilizada como referência para a identificação das estruturas anatômicas e para a validação dos descritores extraídos automaticamente pelo sistema de visão computacional. Como a fonte de referência utilizada corresponde a um trabalho acadêmico institucional e não foi identificada, no momento, uma versão integral publicamente acessível em repositório digital, sua utilização neste estudo

deve ser entendida como referência da coleção anatômica produzida previamente, e não como uma base de dados pública.

As imagens obtidas por microscopia eletrônica de varredura evidenciaram que as três espécies de manguezal preservaram importantes características anatômicas após o processo de carbonização, possibilitando sua diferenciação taxonômica. Entre as espécies avaliadas, *A. germinans* apresentou variantes cambiais com floema incluso concêntrico, característica considerada diagnóstica da espécie. *Laguncularia racemosa* destacou-se pela predominância de raios unisseriados e parênquima axial vasicêntrico, losango-aliforme e confluente, enquanto *R. mangle* apresentou placas de perfuração escalariformes, pontuações raiovasculares escalariformes e cristais prismáticos em células dos raios procumbentes, além de organização mais uniforme dos vasos. Essas características permaneceram preservadas após a carbonização, demonstrando que a anatomia microscópica do carvão constitui uma base consistente para estudos de identificação taxonômica e rastreabilidade florestal.

3.2 Extração de descritores e separação das espécies

Os descritores ecoanatômicos e de textura foram obtidos automaticamente a partir das imagens anatômicas por meio de técnicas de visão computacional. A distribuição dessas variáveis revelou diferenças entre as três espécies avaliadas, evidenciando que atributos relacionados aos vasos e aos padrões texturais foram capazes de representar quantitativamente as particularidades anatômicas observadas nas imagens microscópicas (Figura 1).

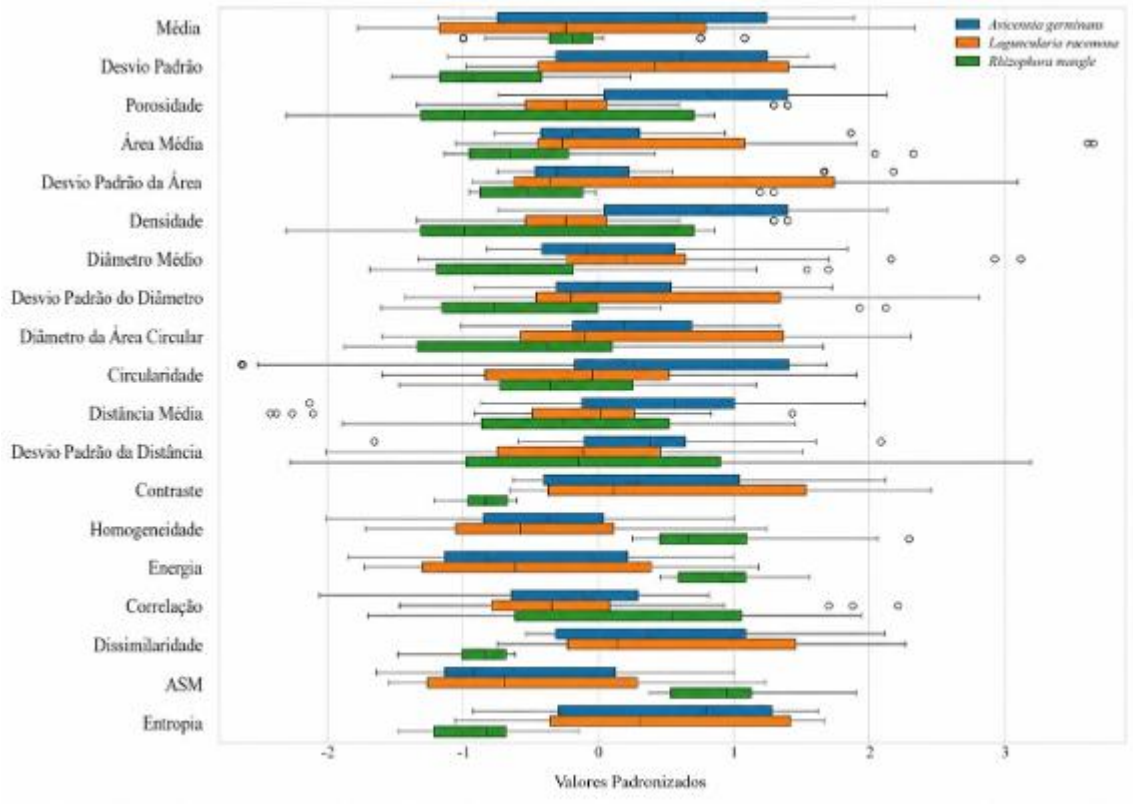


Figura 1 – Distribuição dos descritores ecoanatômicos e de textura das espécies de carvão de manguezal.

Os descritores de vasos representam diretamente características morfométricas da estrutura anatômica, como frequência, área, diâmetro, circularidade e distância entre vasos. Dessa forma, diferenças na organização e na dimensão dos elementos vasculares entre as espécies podem ser traduzidas em diferenças quantitativas nos descritores extraídos. Os descritores de textura, por sua vez, representam a distribuição espacial dos níveis de cinza na imagem. O contraste e a dissimilaridade estão associados à magnitude das diferenças entre regiões adjacentes, enquanto homogeneidade e energia/ASM refletem padrões mais uniformes e a concentração de determinadas combinações de níveis de cinza. A entropia representa o grau de complexidade ou heterogeneidade do padrão textural. Assim, esses parâmetros não correspondem diretamente a estruturas anatômicas individuais, mas constituem representações quantitativas dos padrões espaciais resultantes da distribuição de vasos, raios, parênquima e demais elementos anatômicos presentes nas imagens.

A Análise de Componentes Principais (PCA) confirmou a existência de diferenciação multivariada entre as espécies, demonstrando agrupamentos distintos para *A. germinans*, *L. racemosa* e *R. mangle* (Figura 2). Os dois primeiros componentes principais explicaram 65,25% da variabilidade total dos dados, sendo 47,11% atribuídos ao primeiro componente e 18,14% ao

segundo. Embora essa proporção permita visualizar uma parcela substancial da variabilidade, aproximadamente 34,75% permaneceram distribuídos entre os demais componentes. Portanto, a separação observada no plano formado por PC1 e PC2 deve ser interpretada como uma representação parcial da estrutura multivariada dos dados, e não como a totalidade da variabilidade existente.

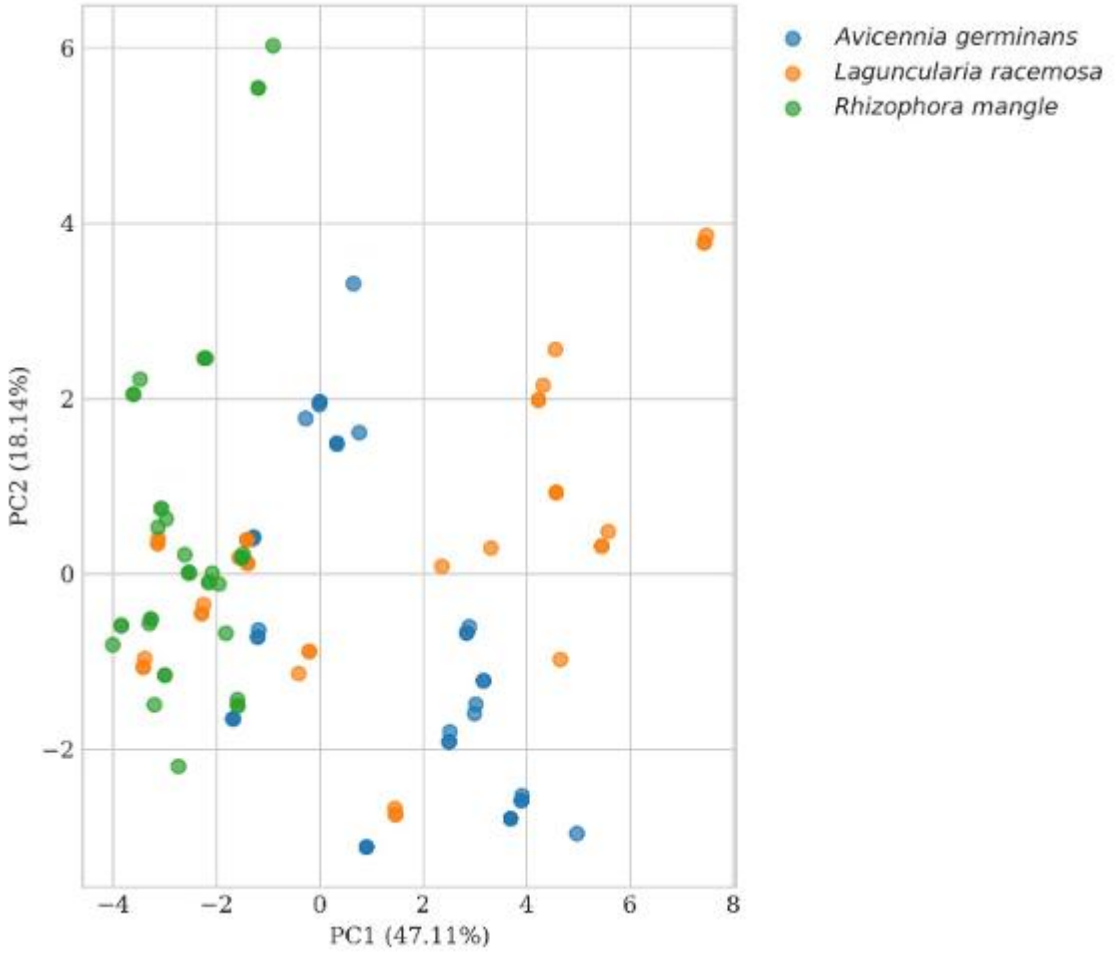


Figura 2 – Análise de Componentes Principais (PCA) dos descritores ecoanatômicos e de textura das espécies de carvão vegetal.

Os descritores de homogeneidade, energia e momento angular secundário (ASM) foram os que mais contribuíram para diferenciar *R. mangle*. Já o contraste, a entropia e as variáveis relacionadas aos vasos apresentaram maior associação com *A. germinans*. *Laguncularia racemosa* ocupou uma posição intermediária, refletindo a combinação das características anatômicas e texturais identificadas nas imagens.

A relação entre os descritores anatômicos e os atributos de textura mostra que as diferenças estruturais preservadas após a carbonização podem ser analisadas por meio de variáveis morfométricas e texturais de forma integrada. Essa complementaridade é importante

porque características como a frequência, o diâmetro e a distribuição dos vasos descrevem a organização anatômica, enquanto os descritores GLCM registram a disposição espacial e o grau de heterogeneidade dos padrões de intensidade nas imagens. Dessa forma, a integração desses dois conjuntos de variáveis amplia a caracterização quantitativa das diferenças anatômicas entre as espécies e oferece uma base consistente para o desenvolvimento de modelos de classificação automática

3.3 Classificação automática das espécies

A matriz de confusão obtida para o algoritmo Support Vector Machine (SVM) apresentou 12 classificações corretas entre as 15 observações do conjunto de validação, correspondendo a uma acurácia geral de 80,0% (Figura 3). Para *A. germinans*, foram obtidas quatro classificações corretas e uma classificação incorreta como *L. racemosa*, resultando em precisão de 66,67%, revocação de 80,00% e F1-score de 72,73%. Para *L. racemosa*, foram obtidas três classificações corretas e duas incorretamente atribuídas a *A. germinans*, correspondendo a uma precisão de 75,00%, revocação de 60,00% e F1-score de 66,67%. *Rhizophora mangle* apresentou cinco classificações corretas e nenhuma classificação incorreta, alcançando precisão, revocação e F1-score de 100,00%.

Considerando conjuntamente as três classes, a precisão média foi de 80,56%, a revocação média de 80,00% e o F1-score médio de 79,80%. Os erros de classificação ocorreram exclusivamente entre *A. germinans* e *L. racemosa*, enquanto nenhuma observação de *R. mangle* foi confundida com as demais espécies. Esse padrão indica que o classificador foi particularmente eficiente na identificação de *R. mangle*, enquanto a distinção entre *A. germinans* e *L. racemosa* apresentou maior sobreposição nos descritores utilizados.

O modelo foi treinado utilizando 70% das amostras e validado com os 30% restantes, conforme o protocolo estabelecido no processamento computacional. O conjunto representado na matriz de confusão contém cinco observações de validação para cada espécie. Apesar do desempenho geral de 80,0%, a avaliação deve ser interpretada considerando o tamanho relativamente reduzido do conjunto de validação e a ausência de comparação sistemática com outros algoritmos de classificação. Assim, os resultados demonstram o potencial do SVM para a discriminação das espécies estudadas, mas não permitem afirmar que esse algoritmo seja superior a outros classificadores.

A escolha do SVM deve ser entendida, portanto, como uma abordagem inicial para avaliar a capacidade dos descritores ecoanatômicos e de textura em separar as espécies. O emprego do kernel RBF permite representar fronteiras de decisão não lineares, o que é adequado

diante da combinação de variáveis morfométricas e texturais. Estudos futuros deverão ampliar o conjunto amostral e comparar o desempenho do SVM com outros algoritmos, como Random Forest, k-Nearest Neighbors e métodos baseados em redes neurais, além de utilizar protocolos de validação cruzada para obter estimativas mais robustas do desempenho preditivo.

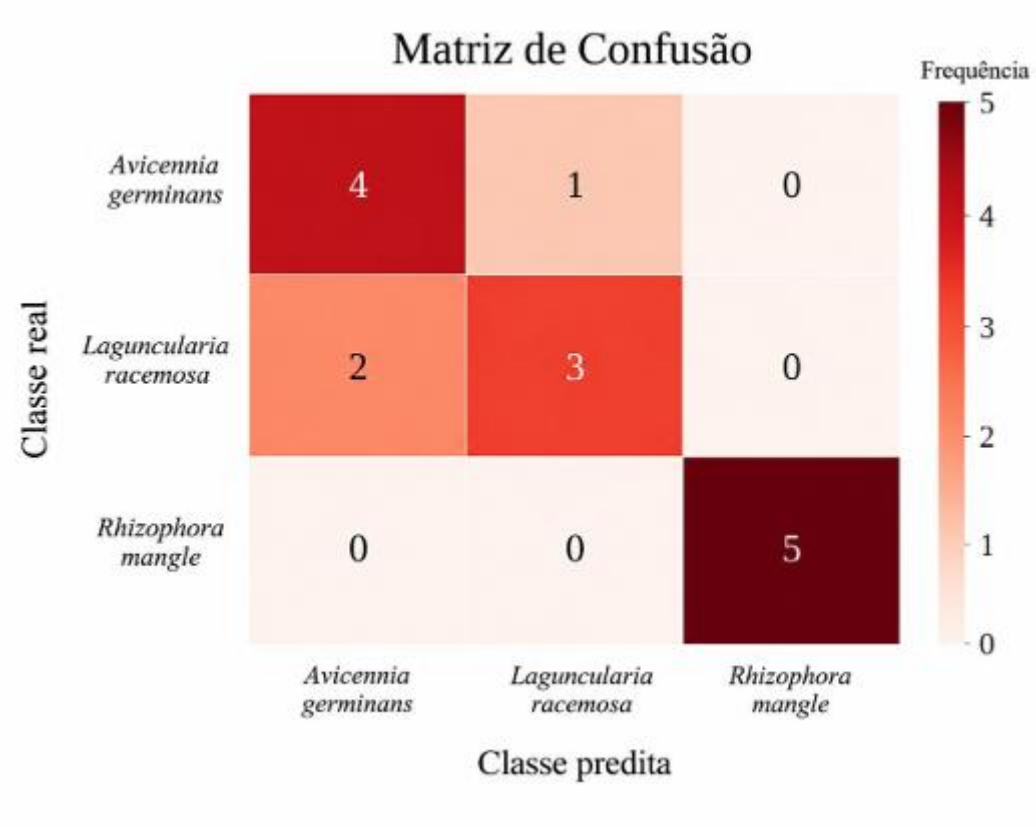


Figura 3 – Matriz de confusão do algoritmo Support Vector Machine (SVM) para classificação das espécies de carvão de manguezal.**Conclusões**

A caracterização ecoanatômica do carvão vegetal demonstrou que as estruturas anatômicas das espécies *A. germinans*, *L. racemosa* e *R. mangle* permaneceram preservadas após a carbonização, constituindo uma base para a extração de descritores quantitativos por técnicas de visão computacional.

Os descritores ecoanatômicos e de textura permitiram representar diferenças estruturais entre as espécies e contribuíram para sua separação nas análises multivariadas. A PCA demonstrou separação dos grupos no espaço formado pelos dois primeiros componentes, que juntos explicaram 65,25% da variância total, indicando, entretanto, que parte relevante da variabilidade permaneceu distribuída nos componentes subsequentes.

O algoritmo Support Vector Machine apresentou acurácia de 80,0% no conjunto de validação. A precisão, revocação e F1-score médios foram de 80,56%, 80,00% e 79,80%,

respectivamente. *Rhizophora mangle* apresentou 100% de desempenho nas três métricas, enquanto os principais erros ocorreram na distinção entre *A. germinans* e *L. racemosa*. Esses resultados demonstram o potencial dos descritores ecoanatômicos e texturais para a discriminação automática de carvões das espécies arbóreas de mangue.

Entretanto, considerando o tamanho do conjunto de validação e a ausência de comparação com outros algoritmos de classificação, os resultados devem ser interpretados como uma avaliação inicial da aplicabilidade do SVM. Estudos posteriores deverão ampliar o número de amostras, aplicar estratégias de validação cruzada e comparar diferentes algoritmos de aprendizado de máquina, permitindo avaliar a robustez e a capacidade de generalização da abordagem proposta.

Dessa forma, a integração entre anatomia do carvão, visão computacional e aprendizado de máquina apresenta potencial para aplicações em rastreabilidade de produtos florestais, monitoramento ambiental e fiscalização da exploração de recursos madeireiros em ecossistemas de manguezal.

4. Agradecimentos

Agradecemos ao Laboratório de Ecologia de Manguezal (LAMA) – Universidade Federal do Pará – Bragança pela logística necessária para a realização do trabalho. Ao Laboratório Multiusuário de Engenharia Florestal (LAMEF) e ao Laboratório de Ciência e Tecnologia da Madeira (LCTM) – Universidade do Estado do Pará – Paragominas e Marabá, respectivamente. Agradecemos também ao projeto Mangues da Amazônia (Programa Petrobras Socioambiental) pelo apoio à pesquisa.

5. Referências bibliográficas

Alongi, D. M. (2014). Carbon cycling and storage in mangrove forests. *Annual Review of Marine Science*, *6*. https://doi.org/10.1146/annurev-marine-010213-135020

Alongi, D. M. (2025). Global Meta-Analysis of Mangrove Primary Production: Implications for Carbon Cycling in Mangrove and Other Coastal Ecosystems. *Forests*, *16*(5). https://doi.org/10.3390/f16050747

Diniz, C., Cortinhas, L., Nerino, G., Rodrigues, J., Sadeck, L., Adami, M., & Souza-Filho, P. W. M. (2019). Brazilian mangrove status: Three decades of satellite data analysis. *Remote Sensing*, *11*(7). https://doi.org/10.3390/rs11070808

Galvão, M. L. (2026). *treino.py for traceability of mangrove charcoal*. https://doi.org/10.6084/m9.figshare.32408343.v2

Galvão, M. L., Nobre, J. R. C., Balboni, B. M., Santos, I. S., & Fernandes, M. E. B. (2025). Assessment of suitability of mangrove wood for different uses. *Journal of Wood Science*, *71*(1). https://doi.org/10.1186/s10086-025-02180-6

Galvão, M. L., Rodrigues, T. N. M., Santos, I. S., & Fernandes, M. E. B. (2024). Traditional ecological knowledge of mangrove wood use on the Brazilian Amazon coast. *Ethnobiology and Conservation*, *13*. https://doi.org/10.15451/ec2024-01-13.03-1-19

Hayashi, S. N., Souza-Filho, P. W. M., Nascimento Jr., W. R., & Fernandes, M. E. B. (2019). The effect of anthropogenic drivers on spatial patterns of mangrove land use on the Amazon coast. *PLOS ONE*, *14*(6), e0217754-. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0217754

Hwang, S. W., & Sugiyama, J. (2021). Computer vision-based wood identification and its expansion and contribution potentials in wood science: A review. In *Plant Methods* (Vol. 17, Number 1). https://doi.org/10.1186/s13007-021-00746-1

Muñiz, G. I. B., Nisgoski, S., Shardosin, F. Z., & França, R. F. (2012). Anatomia do carvão de espécies florestais. *Cerne*, *18*, 471–477.

Perdigão, C. R. V., Júnior, M. M. B., Gonçalves, T. A. P., Souza Araujo, C., Mori, F. A., Barbosa, A. C. M. C., Souza, F. I. B., Motta, J. P., & de Lima Melo, L. E. (2020). Forestry control in the Brazilian Amazon I: wood and charcoal anatomy of three endangered species. *IAWA Journal*, *41*(4), 490–509.

Sousa, K. C. (2024). Descrição anatômica microscópica do carvão vegetal de três espécies do ecossistema manguezal [Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade do Estado do Pará].

Tomlinson, P. B. (2016). The Botany of Mangroves - 2nd edition. *The Botany of Mangroves*, *2*.

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Efeito da carbonização hidrotérmica na cinética de decomposição térmica do hidrocarvão de casca de arroz

Gabriel Pereira Chediak [1], Pedro Venâncio Wate [1], Gustavo Augusto Senna do Nascimento [1], Natália Maira Braga Oliveira [2], Thiago de Paula Protásio [1], Tiago José Pires de Oliveira [2]

[1] Universidade Federal de Lavras, Departamento de Ciências Florestais, CEP 37200-000, Lavras, Minas Gerais, Brasil.
[2] Universidade Federal de Lavras, Departamento de Engenharia Química e de Materiais, 37200-000, Lavras, Minas Gerais, Brasil.

Resumo: A carbonização hidrotérmica (HTC) é um pré-tratamento termoquímico capaz de modificar as propriedades estruturais da biomassa. Neste trabalho, avaliou-se o efeito da HTC sobre a cinética de decomposição térmica do hidrocarvão de casca de arroz. A biomassa foi submetida à HTC nas temperaturas de 180, 200 e 220 °C durante 60 min, sendo posteriormente analisada por termogravimetria (TGA). A energia de ativação aparente foi determinada pelos métodos isoconversionais de Friedman, Kissinger–Akahira–Sunose, Ozawa–Flynn–Wall, Starink e Vyazovkin. Os valores médios de energia de ativação variaram de 171,1 a 199,3 kJ mol^{-1} para a biomassa *in natura* e de 165,8 a 185,8 kJ mol^{-1} para os hidrocarvões, sendo o tratamento a 180 °C o que apresentou a menor energia de ativação (165,8 ± 9,8 kJ mol^{-1}). Os resultados demonstram que a HTC diminui a energia de ativação da biomassa, indicando que os hidrocarvões exigem menos energia para iniciar a reação e apresentam melhor desempenho de queima.

Palavras-chave: Análise termogravimétrica; Energia de ativação; Métodos isoconversionais.

Effect of hydrothermal carbonization on the thermal decomposition kinetics of rice husk hydrochar

Abstract: Hydrothermal carbonization (HTC) is a thermochemical pretreatment capable of modifying the structural properties of biomass. In this work, the effect of HTC on the thermal decomposition kinetics of rice husk hydrochars was evaluated. Biomass was subjected to HTC at temperatures of 180, 200 e 220 °C for 60 min, and subsequently analyzed by thermogravimetry (TGA). The apparent activation energy was determined by the Friedman, Kissinger–Akahira–Sunose, Ozawa–Flynn–Wall, Starink, and Vyazovkin isoconversional methods. The average activation energy values ranged from 171.1 to 199.3 kJ mol^{-1} for the biomass *in natura* and from 165.8 to 185.8 kJ mol^{-1} for the hydrochars. The treatment at 180 °C showed the lowest activation energy (165.8 ± 9.8 kJ mol^{-1}). The results demonstrate that HTC reduces the activation energy of the biomass, indicating that the hydrochars require less energy to initiate the reaction and exhibit better combustion performance.

Keywords: Thermogravimetric analysis; Activation energy; Isoconversional methods.

1. Introdução

Dentre as diversas rotas disponíveis para geração de bioenergia, a carbonização hidrotérmica (HTC) é um processo termoquímico que utiliza temperaturas relativamente baixas (geralmente entre 180 e 260 ºC), sob pressão autógena e utilizando água como solvente subcrítico. O produto sólido resultante da carbonização hidrotérmica é considerado rico em carbono e denominado hidrocarvão (ou *hidrochar*) (Ding *et al.*, 2023). A principal vantagem da HTC em comparação com a pirólise convencional é a possibilidade de utilizar matérias-primas com alto teor de umidade, eliminando a operação prévia de secagem, considerando o papel de reagente, solvente e catalisador desempenhado pela água (Cavali *et al.*, 2023). Além disso, o processo ocorre em temperaturas normalmente inferiores, resultando em uma maior eficiência energética e com uma menor geração de subprodutos gasosos (Liang *et al.*, 2022).

A fim de compreender a degradação térmica do hidrocarvão, a análise termogravimétrica (TGA) permite o monitoramento da perda de massa do material em função da temperatura (Aniza *et al.*, 2024). Através dos dados obtidos pelo emprego dessa técnica, é possível utilizar modelos isoconversionais (como os métodos de Friedman, Kissinger-Akahira-Sunose, Ozawa-Flynn-Wall, Starink e Vyazovkin) para estimar parâmetros cinéticos como a energia de ativação (Ea) requerida para a decomposição térmica do hidrocarvão, sem a necessidade de assumir um modelo de reação prévio (Nawaz, Kumar, 2023). A energia de ativação é definida como a energia mínima necessária para desencadear uma reação química. Valores elevados de Ea indicam que a reação ocorre de maneira mais lenta, exigindo maiores temperaturas de operação e tempos de residência mais prolongados. Em contrapartida, valores menores representam combustíveis mais reativos. Espera-se que o tratamento hidrotérmico reduza a energia de ativação do hidrocarvão em comparação à biomassa in natura por meio de modificações estruturais que reduzem os teores de oxigênio e de cinzas no material (da Rocha *et al.*, 2024).

Considerando a influência do tratamento na cinética de decomposição térmica, o presente trabalho tem por objetivo investigar o efeito da carbonização hidrotérmica nos parâmetros cinéticos da casca de arroz, através da avaliação da energia de ativação da matéria-prima *in natura* e dos hidrocarvões produzidos. O comportamento térmico do hidrocarvão foi avaliado por meio de análises termogravimétricas em múltiplas taxas de aquecimento e quantificação da energia de ativação foi realizada através da aplicação dos métodos de Friedman, Kissinger-Akahira-Sunose, Ozawa-Flynn-Wall, Starink e Vyazovkin, visando compreender o papel da HTC na conversão termoquímica do material. O estudo do efeito da carbonização hidrotérmica na cinética de decomposição térmica de hidrocarvões é essencial

para o dimensionamento, projeto e controle de reatores em escala comercial, garantindo viabilidade econômica e operacional em processos de geração de energia. Além disso, o conhecimento dos parâmetros cinéticos permite a previsão de parâmetros termodinâmicos como entalpia (ΔH), entropia (ΔS) e energia livre de Gibbs (ΔG), facilitando a análise de eficiência do processo.

2. Material e métodos

As cascas de arroz foram coletadas em uma descascadora local na cidade de Lavras, Minas Gerais. As reações hidrotérmicas foram realizadas em um reator, modelo Biofoco RUPMO 300 mL de aço inoxidável. Para analisar o efeito de diferentes condições de operação na biomassa, os experimentos foram realizados em diferentes temperaturas (180 °C, 200 °C e 220 ºC) e o tempo de reação foi de 60 minutos. Usou-se uma proporção de 1:4 com 22,4 g de biomassa e 200 mL de volume de água. A pressão dentro do reator é autógena e monitorada por transdutores de pressão.

Para a caracterização físico-química, as frações granulométricas entre 40 e 60 *mesh* da biomassa *in natura* e dos hidrocarvões foram utilizadas. Todas as determinações analíticas foram conduzidas em triplicata. A análise imediata, compreendendo umidade, matéria volátil, teor de cinza e carbono fixo, foi realizada conforme a norma ASTM D1762-84 (ASTM, 2021). O poder calorífico superior (PCS) foi determinado por meio de um calorímetro digital IKA C-200, em conformidade com a norma ASTM E711-23e1 (ASTM, 2023).

As análises termogravimétricas (TGA) foram conduzidas em um analisador Shimadzu DTG-60H, sob atmosfera inerte de nitrogênio com pureza de 99,999%. Aproximadamente 4 mg de amostra, com tamanho de partícula inferior a 200 mesh, foram inicialmente aquecidos até 105 °C a uma taxa de 50 °C.min-1, permanecendo nessa temperatura por 30 min para remoção da umidade residual. Posteriormente, a temperatura foi elevada até 900 °C, empregando-se taxas de aquecimento de 2.5, 5, 10 e 20 °C.min-1. Os dados de perda de massa (curva TG e DTG) foram continuamente registrados para a obtenção dos perfis de degradação térmica. Todos os ensaios foram realizados em triplicata. Para cada condição experimental, os dados foram corrigidos com base na linha de base previamente estabelecida, conforme a metodologias descritas por (Tibola *et al.*, 2022). O ensaio termogravimétrico também foi realizado para as cascas de arroz e para os hidrocarvões gerados.

A cinética de decomposição térmica da casca de arroz e dos hidrocarvões produzidos por carbonização hidrotérmica foi avaliada por meio de análises termogravimétricas não isotérmicas (TGA), realizadas em diferentes taxas de aquecimento (2,5; 10 e 20 °C min^{-1}) sob

atmosfera inerte de nitrogênio. A conversão mássica (α) foi calculada a partir das curvas termogravimétricas utilizando a Equação 1.

$$\alpha = \frac{m_0 - m_t}{m_o - m_f} \quad (1)$$

em que $m_0$corresponde à massa inicial da amostra, m_tà massa na temperatura Te m_fà massa final após a decomposição térmica.

A energia de ativação aparente (Ea) foi determinada por métodos isoconversionais, que permitem estimar os parâmetros cinéticos sem assumir previamente um modelo de reação. Foram aplicados os métodos diferenciais de Friedman (FDM) e os métodos integrais de Kissinger–Akahira–Sunose (KAS), Ozawa–Flynn–Wall (OFW), Starink (STK) e Vyazovkin (VYK).

Os cálculos foram realizados para diferentes níveis de conversão (α), compreendidos entre aproximadamente 0,10 e 0,90, sendo considerados apenas os valores que apresentaram coeficiente de determinação (R^2) satisfatório. Para cada método foi construída a regressão linear correspondente, obtendo-se a energia de ativação a partir da inclinação da reta, conforme as respectivas equações cinéticas descritas na literatura.

Os valores médios de energia de ativação foram calculados para cada amostra utilizando todas as conversões válidas obtidas por cada método. O número de pontos experimentais empregados no cálculo da média variou conforme o intervalo de conversão que apresentou ajuste linear adequado, sendo representado pelo parâmetro n na Tabela 2. Assim, por exemplo, para a biomassa *in natura* foram utilizados 13 valores de conversão no método de Friedman e 14 valores nos métodos KAS, OFW e Starink, enquanto para os hidrocarvões esse número variou entre 7 e 15 valores, dependendo da estabilidade do ajuste linear de cada tratamento. A utilização de diferentes métodos isoconversionais possibilitou avaliar a consistência dos parâmetros cinéticos obtidos e reduzir as incertezas associadas à aplicação de um único modelo matemático.

3. Resultados e discussão

Os valores encontrados com a realização dos ensaios de caracterização físico-químicas das cascas de arroz e dos hidrocarvões encontram-se apresentados na Tabela 1. A análise imediata mostrou que a carbonização hidrotérmica reduziu significativamente a umidade da casca de arroz, atingindo valores inferiores a 5%, o que favorece sua estabilidade e aplicação energética. Observou-se também a redução do teor de materiais voláteis, de 73,33% na biomassa *in natura* para 63,39% a 220 °C, acompanhada pelo aumento relativo do carbono fixo.

Essas transformações resultam da degradação de frações termicamente instáveis e da formação de compostos orgânicos na fase líquida, promovendo alterações favoráveis nas propriedades energéticas e na valorização da biomassa (Naranjo *et al.*, 2023).

Tabela 1 – Caracterização da biomassa *in natura* e dos hidrocarvões produzidos

	Casca de arroz	**Hidrocarvão**		
		180 °C	**200 °C**	**220 °C**
PCS (MJ kg^{-1})	17,20	17,49	17,99	18,65
Umidade (%)	10,38	4,45	4,12	4,72
Material volátil (%)	73,33	70,39	69,05	63,39
Carbono fixo (%)	16,35	12,13	15,31	19,79
Cinzas (%)	14,05	14,53	15,64	16,82

Fonte: Autores (2026)

A observação da Tabela 1 permite notar um aumento do teor de cinzas dos hidrocarvões em comparação com a biomassa *in natura*. Esse comportamento é coerente com a natureza mineral da casca de arroz e com o efeito da HTC sobre a composição da fração sólida. A casca de arroz apresenta naturalmente elevado conteúdo de minerais, especialmente sílica (SiO_2). Durante o tratamento térmico, parte dos componentes orgânicos mais reativos, principalmente frações de hemicelulose e celulose, sofre hidrólise, desidratação, descarboxilação e solubilização, enquanto uma parcela significativa da fração mineral permanece no sólido. Dessa forma, a redução da massa de matéria orgânica pode provocar uma concentração relativa dos componentes inorgânicos, resultando em aumento do teor percentual de cinzas no hidrocarvão (Zulkornain *et al*., 2022).

Embora o aumento das cinzas seja normalmente desfavorável para a utilização direta da biomassa como combustível, já que a fração mineral pode provocar problemas de deposição, incrustação e formação de escória, o aumento das cinzas ocorreu simultaneamente a uma elevação do poder calorífico superior de 17,20 para 18,65 MJ kg^{-1}, correspondendo a um aumento de aproximadamente 8,4%.

A análise termogravimétrica (TGA/DTG) evidencia que a carbonização hidrotérmica (HTC) altera significativamente a cinética de decomposição da casca de arroz, deslocando o comportamento do material de um regime dominado por polissacarídeos para um regime controlado por estruturas aromáticas. A biomassa *in natura* apresenta pico de decomposição mais intenso e estreito no Estágio II (250-380 °C), típico da degradação de celulose e hemiceluloses, por enquanto os hidrocarvões exibem picos mais largos e deslocados, com △T

ampliado, indicando menor reatividade térmica e maior resistência à decomposição. Esse comportamento está associando à formação de estruturas carbonosas mais condensadas durante a HTC, que requerem maior energia para decomposição térmica (Oliveira *et al.*, 2015). As curvas termogravimétricas encontram-se expostas na Figura 1.

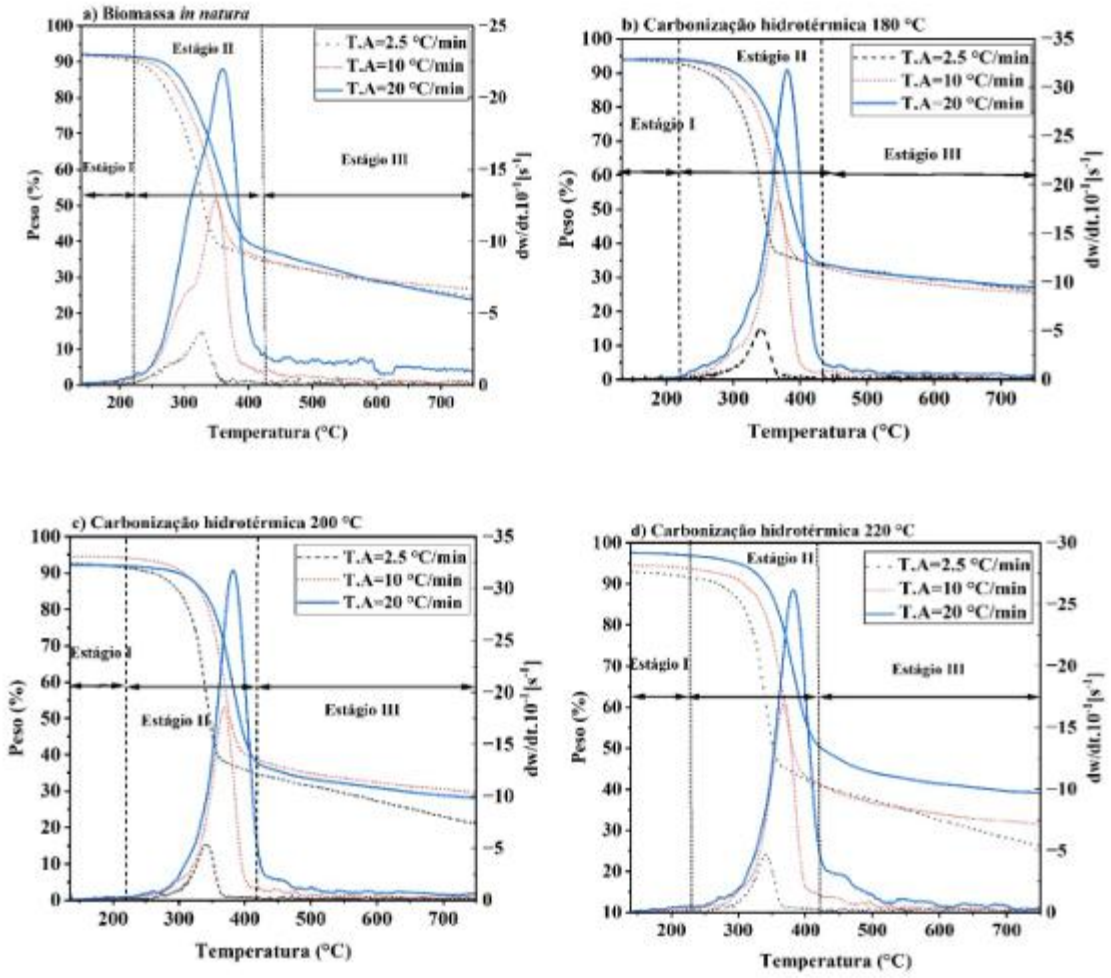


Figura 1 – Curvas termogravimétricas (TG) e termogravimétricas diferenciais (DTG) da casca de arroz *in natura* (a) e dos hidrocarvões obtidos por carbonização hidrotérmica a 180 °C (b), 200 °C (c) e 220 °C (d)

Fonte: Autores (2026)

A celulose na biomassa bruta se decompõe via transglicosilação, formando anidroaçúcares em torno do pico de DTG. Entretanto, a HTC promove hidrólise e despolimerização prévia dessas cadeias, reduzindo drasticamente a formação desses intermediários. Esse redirecionamento das rotas químicas é consistente com estudos recentes que mostram que a HTC altera a estrutura da celulose e favorece reações competitivas de fragmentação e desidratação (Carvalho *et al.*, 2017).

Por outro lado, o aumento relativo da lignina e da aromaticidade estrutural explica o crescimento da fração fenólica. A lignina apresenta decomposição ampla (200-800 °C), refletida no Estágio III das curvas TGA, e sua degradação ocorre via clivagem de ligações β–O–4, formando fenóis como guaiacóis e siringóis. Estudos recentes demostram que a HTC favorece a condensação aromática e aumenta a contribuição da lignina nas rotas de pirólise, promovendo maior formação de compostos fenólicos estáveis (Wu *et al.*, 2025). Já a Tabela 2 exibe os valores calculados de Energia de Ativação para cada uma das amostras em análise, bem como os modelos isoconversionais aplicados.

Tabela 2 – Resultados de Energia de Ativação (kJ/mol)

Amostra	Friedman	KAS	OFW	Starink	Vyazovkin
Biomassa	183,21 ± 14,15 (n=13)	171,06 ± 12,35 (n=14)	171,92 ± 11,94 (n=14)	171,13 ± 12,35 (n=14)	199,25 ± 58,74
HTC 180	178,22 ± 21,43 (n=15)	165,84 ± 9,81 (n=15)	167,39 ± 9,58 (n=15)	166,12 ± 9,81 (n=15)	166,12 ± 9,81
HTC 200	181,90 ± 15,31 (n=12)	174,42 ± 9,04 (n=13)	175,59 ± 8,86 (n=13)	174,70 ± 9,05 (n=13)	174,70 ± 9,05
HTC 220	185,40 ± 14,89 (n=11)	185,18 ± 7,86 (n=12)	185,79 ± 7,17 (n=12)	185,45 ± 7,84 (n=13)	185,45 ± 7,84
HTC 240	185,40 ± 10,63 (n=7)	182,51 ± 7,47 (n=8)	183,15 ± 6,84 (n=8)	182,77 ± 7,45 (n=8)	182,77 ± 7,45

Fonte: Autores (2026)

A carbonização hidrotérmica (HTC) promoveu alterações significativas na cinética de decomposição térmica da biomassa, refletidas nos valores de energia de ativação (Ea). De modo geral, os métodos integrais (KAS, OFW, Starink e Vyazovkin) apresentaram resultados muito próximos entre si, enquanto o método diferencial de Friedman forneceu valores mais elevados e com maior dispersão. Os métodos diferenciais são mais sensíveis aos ruídos experimentais, uma vez que utilizam a derivada da conversão, ao contrário dos métodos integrais, considerados mais robustos (Sahoo *et al.*, 2021). Os resultados apresentados na Tabela 2 foram calculados considerando a faixa de conversão entre 0,05 e 0,95. Foram utilizados apenas os pontos que apresentaram $R^2 \geq 0,95$, sendo descartados aqueles com menor coeficiente de determinação

devido ao baixo ajuste das regressões. O número de pontos de conversão efetivamente utilizados no cálculo da energia de ativação em cada método está indicado entre parênteses como (n).

A biomassa in natura apresentou os maiores valores de energia de ativação (171,06–199,25 kJ·mol^{-1}), devido à complexidade da decomposição simultânea de hemicelulose, celulose e lignina (Kumar *et al.*, 2020). A HTC a 180 °C reduziu a Ea, provavelmente em razão da degradação parcial das hemiceluloses, da hidrólise de grupos oxigenados e da reorganização da matriz lignocelulósica (Wang *et al.*, 2018). Entretanto, o aumento da temperatura de HTC para 200–240 °C elevou gradualmente a Ea, associado ao enriquecimento em lignina, à formação de estruturas aromáticas mais condensadas e às alterações na fração mineral (Kumar *et al.*, 2020; Cavali *et al.*, 2023). Apesar disso, os hidrocarvões permaneceram, em geral, menos resistentes à decomposição que a biomassa *in natura*. Dessa forma, em processos de combustão, o hidrocarvão pode apresentar maior facilidade de ignição e conversão, favorecendo a liberação de energia em condições menos severas.

4. Conclusões

Os resultados evidenciam que a carbonização hidrotérmica modifica significativamente a cinética da decomposição térmica da biomassa lignocelulósica. O tratamento a 180 °C promoveu redução da energia de ativação, enquanto os tratamentos a 200 e 220 °C aumentaram gradualmente a Ea dos hidrocarvões. Os métodos integrais apresentaram elevada concordância entre si e menor dispersão dos resultados, demonstrando maior robustez para a determinação da energia de ativação. Portanto, a severidade da carbonização hidrotérmica exerce influência direta sobre a cinética de decomposição térmica da casca de arroz, fornecendo informações relevantes para o dimensionamento e a otimização de processos termoquímicos envolvendo hidrocarvão como combustível sólido.

5. Agradecimentos

Os autores agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) pelo apoio e financiamento que contribuíram para a realização deste trabalho, ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia da Madeira (PPGCTM) e à Universidade Federal de Lavras (UFLA) pelo suporte institucional e pela infraestrutura disponibilizada para o desenvolvimento da pesquisa.

6. Referências bibliográficas

American Society for Testing and Materials. (2021). ASTM D1762-84: Standard Test Method for Chemical Analysis of Wood Charcoal. https://store.astm.org/d1762-84r21.html

American Society for Testing and Materials. (2023). ASTM E711-23e1: Standard Test Method for Gross Calorific Value of Refuse-Derived Fuel by the Bomb Calorimeter. https://store.astm.org/e0711-23e01.html

Aniza, R., Chen, W.-H., Kwon, E. E., Bach, Q.-V., & Anh Tuan Hoang. (2024). Lignocellulosic biofuel properties and reactivity analyzed by thermogravimetric analysis (TGA) toward zero carbon scheme - A critical review. Energy Conversion and Management: X, 100538–100538. https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2024.100538.

Carvalho, W. S.; Santana Júnior, J. A.; Oliveira, T. J. P.; Ataíde, C. H. (2017). Fast pyrolysis of sweet sorghum bagasse in a fluidized bed reactor: Product characterization and comparison with vapors generated in analytical pyrolysis. Energy, v. 131, p. 186–197. https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.05.058.

Cavali, M., Libardi Junior, N., de Sena, J. D., Woiciechowski, A. L., Soccol, C. R., Belli Filho, P., Bayard, R., Benbelkacem, H., & de Castilhos Junior, A. B. (2023). A review on hydrothermal carbonization of potential biomass wastes, characterization and environmental applications of hydrochar, and biorefinery perspectives of the process. Science of The Total Environment, 857, 159627. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.159627.

da Rocha, J. J. M., Júnior, J. A. S., Sousa, N. G., Cardoso, C. R., Moreto, J. A., & de Oliveira, T. J. P. (2024). Exploring Corymbia torelliana hydrochar combustion kinetics through thermogravimetric analysis, peak deconvolution and reaction profile modelling. Environmental Science and Pollution Research, 31(45), 56482–56498. https://doi.org/10.1007/s11356-024-34887-2.

Ding, Y., Li, D., Lv, M., Yuan, L., Zhang, J., Qin, S., Wang, B., Cui, X., Guo, C., & Zhao, P. (2023). Influence of process water recirculation on hydrothermal carbonization of rice husk at different temperatures. Journal of Environmental Chemical Engineering, 11(2), 109364. https://doi.org/10.1016/j.jece.2023.109364.

Kumar, M.; Mishra, P. K.; Upadhyay, S. N. (2020). Thermal degradation of rice husk: effect of pre-treatment on kinetic and thermodynamic parameters. Fuel, v. 268, p. 117164. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.117164

Liang, W., Wang, G., Xu, R., Ning, X., Zhang, J., Guo, X., Ye, L., Li, J., Jiang, C., Wang, P., & Wang, C. (2022). Hydrothermal carbonization of forest waste into solid fuel: Mechanism and combustion behavior. Energy, 246, 123343. https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.123343.

Naranjo, J.; Juiña, E.; Loyo, C.; Romero, M.; Vizuete, K.; Debut, A.; Ponce, S.; Murillo, H. (2023). Preparation of Adsorbent Materials from Rice Husk via Hydrothermal Carbonization: Optimization of Operating Conditions and Alkali Activation. Resources, v. 12, n. 12, p. 145. https://doi.org/10.3390/resources12120145.

Nawaz, A., & Kumar, P. (2023). Impact of temperature severity on hydrothermal carbonization: Fuel properties, kinetic and thermodynamic parameters. Fuel, 336, 127166. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.127166.

Oliveira, T. J. P. (2015). Pirólise rápida de casca de soja: desenvolvimento do reator de leito fluidizado, análise do bio-óleo produzido e do vapor obtido na pirólise analítica (Tese de Doutorado). Universidade Federal de Uberlândia.

Sahoo, A.; Kumar, S.; Mohanty, K. (2021). Kinetic and thermodynamic analysis of Putranjiva roxburghii (putranjiva) and Cassia fistula (amaltas) non-edible oilseeds using thermogravimetric analyzer. Renewable Energy, v. 165, p. 261–277. https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.11.011.

Wang, T.; Zhai, Y.; Zhu, Y.; Li, C.; Zeng, G. (2018). A review of the hydrothermal carbonization of biomass waste for hydrochar formation: process conditions, fundamentals, and physicochemical properties. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 90, p. 223–247. https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.03.071.

Wu, S.; Wang, Q.; Luk, H. M.; Wu, D.; Lu, Q.; Pan, S.; Bai, J.; Cui, D.; Zhang, X. (2025). Recent advances on hydrothermal carbonization of biomass for carbon-negative materials: From mechanistic insights to functional applications. Industrial Crops and Products, [s. l.], v. 237, p. 122142. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2025.122142.

Zulkornain, M. F., Shamsuddin, A. H., Normanbhay, S., Md Saad, J., & Ahmad Zamri, M. F. M. (2022). Optimization of rice husk hydrochar via microwave-assisted hydrothermal carbonization: Fuel properties and combustion kinetics. *Bioresource Technology Reports*, *17*, 100888. https://doi.org/10.1016/j.biteb.2021.100888

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Efeito da temperatura de pirólise e do tipo de biomassa nas propriedades físico-químicas do biochar

Merlindo Jacinto Manjate[1,2]; Fabíola Martins Delatorre[1]; Juliana Terezinha Santos da Cruz[1]; Tayná Rebonato Oliveira[1]; Paulo Renato Souza de Oliveira[1]; Allana Katiussya Silva Pereira[3]; Iara Nobre Carmona[1]; Ananías Francisco Dias Júnior[1]

[1] Universidade Federal do Espírito Santo (UFES), Departamento de Ciências Florestais e da Madeira. CEP 29550-000, Jerônimo Monteiro, ES, Brasil.
[2] Universidade Lúrio (UniLúrio), Faculdade de Ciências Agrárias, CEP 3300, Campus Unango, Distrito de Sanga, Niassa, Moçambique.
[3] Universidade Federal do Recôncavo da Bahia (UFRB), Centro de Ciências Agrárias, Ambientais e Biológicas (CCAAB), CEP 44.380-000, Cruz das Almas, Bahia, Brasil.

Resumo: A produção de biochar a partir de resíduos agroindustriais representa uma alternativa sustentável para a valorização de biomassas lignocelulósicas e para aplicações agrícolas. Este estudo teve como objetivo avaliar o efeito da temperatura de pirólise e do tipo de biomassa nas propriedades físico-químicas de biochars produzidos a partir de casca de coco verde (*Cocos nucifera* L.) e casca de café arábica (*Coffea arabica* L.). O experimento foi conduzido em delineamento inteiramente casualizado, em esquema fatorial 2 × 3, com três temperaturas de pirólise (300, 600 e 900 °C) e três repetições. Foram determinados os rendimentos de biochar, líquido pirolenhoso e gases não condensáveis, além dos teores de materiais voláteis, cinzas e carbono fixo. A elevação da temperatura reduziu o rendimento de biochar e o teor de materiais voláteis, enquanto aumentou os teores de carbono fixo e cinzas em ambas as biomassas. A casca de coco verde produziu biochars com maiores teores de carbono fixo, enquanto a casca de café apresentou maiores teores de cinzas. Conclui-se que a temperatura de pirólise e o tipo de biomassa influenciam as características do biochar, e que a seleção da biomassa e da temperatura permite modular suas propriedades de acordo com a finalidade pretendida.

Palavras-chave: Carbonização; Resíduos agroindustriais; Carbono fixo.

Effect of pyrolysis temperature and biomass type on the physicochemical properties of biochar

Abstract: The production of biochar from agro-industrial waste represents a sustainable alternative for the valorization of lignocellulosic biomass and for agricultural applications. This study aimed to evaluate the effect of pyrolysis temperature and biomass type on the physicochemical properties of biochars produced from green coconut husk (*Cocos nucifera* L.) and Arabica coffee husk (*Coffea arabica* L.). The experiment was conducted in a completely randomized design, in a 2 × 3 factorial scheme, with three pyrolysis temperatures (300, 600, and 900 °C) and three repetitions. The yields of biochar, pyroligneous liquid, and non-condensable gases were determined, as well as the contents of volatile matter, ash, and fixed carbon. The increase in temperature reduced the yield of biochar and the content of volatile matter, while increasing the fixed carbon and ash content in both biomasses. Green coconut husk produced biochars with higher fixed carbon content, while coffee husk showed higher ash content. It is concluded that pyrolysis temperature and biomass type influence the characteristics of biochar, and that the selection of biomass and temperature allows its properties to be tailored according to the intended purpose.

Keywords: Carbonization; Agroindustrial residues; Fixed carbon.

1. Introdução

A crescente geração de resíduos agroindustriais tem estimulado a busca por alternativas sustentáveis para o aproveitamento de biomassas lignocelulósicas, transformando resíduos em materiais de maior valor agregado. Nesse contexto, o biochar destaca-se como um material carbonáceo obtido pela pirólise da biomassa em condições limitadas de oxigênio, apresentando propriedades como elevada estabilidade do carbono, retenção de nutrientes e potencial de melhoria das características do solo, tornando-se promissor para aplicações agrícolas e ambientais (Liu et al., 2023; Tomczyk et al., 2020).

As propriedades do biochar são influenciadas pela composição da biomassa e pelas condições de produção, especialmente pela temperatura de pirólise. O aumento da temperatura promove a redução de compostos voláteis, o aumento do carbono fixo e a concentração da fração mineral, favorecendo maior estabilidade do material. Além disso, características da biomassa, como os teores de lignina, celulose, hemicelulose e minerais, interferem diretamente na degradação térmica e nas propriedades finais do biochar (Liu et al., 2023; Tomczyk et al., 2020; Zhao et al., 2017). Entretanto, ainda são necessários estudos que avaliem a interação entre esses fatores em resíduos agroindustriais específicos, como a casca de coco verde e a casca de café. O Brasil destaca-se entre os maiores produtores mundiais dessas culturas, gerando anualmente cerca de 7 milhões de toneladas de resíduos de casca de coco verde (Barros & Salvador, 2025) e aproximadamente 6 milhões de toneladas de casca de café (Silva et al., 2024). O descarte inadequado desses materiais representa um problema ambiental, mas também evidencia seu elevado potencial como matéria-prima para a produção de biochar e outros produtos de valor agregado. A casca de coco verde apresenta elevada resistência à degradação natural devido à sua estrutura fibrosa e ao conteúdo de lignina em alta concentração (Lomelí-Ramírez et al., 2018), enquanto a casca de café apresenta composição química diferenciada, com maior presença de componentes minerais e compostos orgânicos capazes de influenciar o processo de pirólise e as características do biochar produzido (Veiga et al., 2017). Assim, a conversão desses resíduos em biochar representa uma alternativa sustentável para sua valorização, promovendo o aproveitamento de subprodutos agroindustriais e contribuindo para a economia circular.

Diante desse cenário, A hipótese deste estudo é que a temperatura de pirólise e o tipo de biomassa, bem como a interação entre esses fatores, influenciam os rendimentos dos produtos da pirólise e as propriedades dos biochars produzido. Assim, o objetivo deste estudo foi investigar o impacto da temperatura de pirólise em diferentes biomassas residuais, visando subsidiar a produção de biochar com características adequadas a diferentes aplicações.

2. Material e métodos

2.1 Coleta das biomassas

As biomassas utilizadas neste estudo foram casca de coco verde (*Cocos nucifera* L.) e casca de café arábica (*Coffea arabica* L.), coletadas no município de Jerônimo Monteiro, Espírito Santo, Brasil, localizado nas coordenadas geográficas 20°47′20″ S de latitude e 41°23′42″ O de longitude. Após a coleta, os materiais foram submetidos à secagem natural e, posteriormente, à secagem em estufa a 103 ± 2 °C por 24 horas, visando reduzir a umidade e padronizar as condições das biomassas antes do processo de pirólise. Após a secagem em estufa, as amostras foram pesadas e utilizadas no processo de pirólise.

2.2 Produção e caracterização do biochar

O experimento foi conduzido em delineamento inteiramente casualizado, em esquema fatorial 2 × 3, constituído por dois tipos de biomassa, casca de coco verde (*C. nucifera* L.) e casca de café arábica (*C. arabica* L.), e três temperaturas de pirólise (300, 600 e 900 °C), com três repetições por tratamento, totalizando 18 unidades experimentais. As pirólises foram realizadas em forno elétrico tipo mufla, acoplado a um reator de leito fixo em aço inox e equipado com sistema de condensação de gases. O processo foi conduzido com taxa de aquecimento de 5 °C min^{-1} até as temperaturas finais estabelecidas, mantendo-se tempo de residência de 1 hora em cada condição de pirólise.

Ao final de cada ensaio de pirólise, foram determinados os rendimentos gravimétricos de biochar e de líquido pirolenhoso. O rendimento gravimétrico de biochar, expresso em base seca, foi calculado pela razão entre a massa seca de biochar produzida e a massa de biomassa após a secagem em estufa a 103 ± 2 °C por 24 h (Equação 1).

(1)

onde:

- RB = rendimento gravimétrico de biochar (%);
- = massa seca do biochar (g);

- = massa seca inicial da biomassa (g).

O rendimento do líquido pirolenhoso foi determinado pela razão entre a massa do liquido pirolenhoso coletado e a massa seca inicial da biomassa (Equação 2).

(2)

Onde:

- RLP = rendimento do líquido pirolenhoso (%);
- = a massa do líquido pirolenhoso coletado (g).

O rendimento em gases não condensáveis foi determinado de forma indireta, por meio da diferença entre 100% e a soma dos rendimentos dos demais produtos. Para a caracterização, os biochars foram moídos e peneirados, utilizando-se a fração retida entre as peneiras de 40 e 60 mesh. A composição química imediata dos biochars foi determinada conforme a norma ASTM D1762-84 (ASTM, 2021), incluindo os teores de umidade, materiais voláteis, cinzas e carbono fixo. O teor de umidade foi determinado em base úmida, enquanto os teores de materiais voláteis e cinzas foram determinados em base seca. O teor de carbono fixo foi obtido por diferença, em base seca, a partir dos teores de materiais voláteis e cinzas.

2.3 Análise de dados

Os dados foram submetidos à verificação dos pressupostos da análise de variância por meio dos testes de normalidade dos resíduos (Shapiro-Wilk) e homogeneidade das variâncias (Bartlett). Atendidos esses pressupostos, realizou-se a análise de variância (ANOVA) em delineamento inteiramente casualizado, considerando o esquema fatorial 2 × 3, com dois tipos de biomassa, casca de coco verde (*Cocos nucifera* L.) e casca de café arábica (*Coffea arabica* L.) e três temperaturas de pirólise (300, 600 e 900 °C). Quando constatados efeitos significativos ($p \leq 0,05$), procedeu-se ao desdobramento da interação e comparação de médias pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. As análises estatísticas foram realizadas utilizando o software R, versão 4.5.3.

3. Resultados e discussão

3.1 Rendimentos dos produtos da pirólise

A análise de variância demonstrou que o rendimento de biochar (RB) foi influenciado pela biomassa, temperatura de pirólise e pela interação entre esses fatores ($p < 0,05$) (Figura 1A).

O rendimento de líquido pirolenhoso (RLP) e dos gases não condensáveis (RGNC) foram significativamente influenciados pela biomassa ($p < 0,05$) e pela temperatura de

pirólise ($p < 0,001$), enquanto a interação entre esses fatores não foi significativa ($p > 0,05$) (Figura 1B).

Figura 1 - Rendimento de biochar (RB) (A) e rendimentos de líquido pirolenhoso (RLP) e gases não condensáveis (RGNC) (B) obtidos durante a pirólise da casca de coco verde (CCV) e da casca de café (CC). Na Figura A, letras minúsculas comparam as biomassas e letras maiúsculas comparam as temperaturas; na Figura B, letras diferentes indicam diferenças significativas entre os níveis dos fatores (Tukey, $p < 0,05$).

O rendimento de biochar diminuiu significativamente com o aumento da temperatura de pirólise em ambas as biomassas. A 300 °C, a casca de coco verde apresentou rendimento significativamente superior ao da casca de café, com valores de 63,11% e 61,26%, respectivamente. Na casca de coco verde, o rendimento reduziu significativamente de 63,11% a 300 °C para 36,01% a 600 °C e 34,15% a 900 °C. Para a casca de café, também foi observada redução significativa com o aumento da temperatura, passando de 61,26% a 300 °C para 37,92% a 600 °C e 34,38% a 900 °C. Entre as biomassas, foram observadas diferenças significativas nas temperaturas de 300 e 600 °C, enquanto a 900 °C não houve diferença estatística entre a casca de coco verde e a casca de café, apesar dos valores de rendimento terem sido numericamente próximos (34,15 e 34,38%, respectivamente). A redução do rendimento de biochar com o aumento da temperatura é atribuída à intensificação da degradação térmica dos componentes lignocelulósicos da biomassa, favorecendo a liberação de compostos voláteis e reduzindo a fração sólida remanescente (Wang et al., 2024). Embora a casca de coco verde apresente, em geral, maior teor de lignina, variando entre 23 e 45% (Lomelí-Ramírez et al., 2018), enquanto a casca de café apresenta valores entre 29 e 33% (De Carvalho Oliveira et al., 2018; Veiga et al., 2017), os rendimentos observados a 600 °C foram numericamente superiores para a casca de café. Entretanto, essa diferença deve ser interpretada considerando a significância estatística, uma vez que a 900 °C os rendimentos das duas biomassas foram estatisticamente semelhantes. Esses resultados evidenciam que o rendimento de biochar não depende exclusivamente do teor de lignina, sendo também influenciado pela composição mineral da biomassa, pelo teor de materiais voláteis e pelas interações entre esses constituintes durante a pirólise. Biomassas com maior conteúdo mineral podem alterar a cinética de degradação térmica e influenciar a distribuição dos produtos da pirólise, refletindo-se no rendimento final de biochar (Tomczyk et al., 2020). A casca de coco

verde apresentou rendimento médio de líquido pirolenhoso significativamente superior ao da casca de café, com valores de 31,13% e 29,00%, respectivamente. Em relação à temperatura de pirólise, os maiores rendimentos foram observados a 600 °C (35,04%) e 900 °C (34,34%), sem diferença estatística entre essas temperaturas e ambos superiores ao rendimento obtido a 300 °C (20,82%). Isso ocorre porque o aumento da temperatura favorece a formação desses vapores condensáveis; entretanto, acima de 600 °C, reações secundárias de craqueamento convertem parte desses compostos em gases não condensáveis, limitando o aumento do rendimento do líquido pirolenhoso (Liu et al., 2023), o que explica a ausência de diferença significativa entre 600 e 900 °C. O rendimento médio de gases não condensáveis foi superior para a casca de café (26,48%) em comparação à casca de coco verde (24,45%). Além disso, observou-se aumento progressivo dessa fração com a elevação da temperatura, passando de 17,00% a 300 °C para 27,99% a 600 °C e atingindo 31,40% a 900 °C, com diferenças significativas entre todas as temperaturas. Esse comportamento confirma que temperaturas mais elevadas intensificam as reações de degradação térmica e de craqueamento secundário dos vapores gerados durante a pirólise, promovendo maior formação de gases não condensáveis em detrimento do biochar e do líquido pirolenhoso (Liu et al., 2023; Oliveira et al., 2025).

3.2 Análise imediata do biochar

A análise de variância demonstrou que os teores de umidade (Figura 2A), materiais voláteis (Figura 2B), cinzas (Figura 2C) e carbono fixo (Figura 2D) foram significativamente influenciados pela biomassa, pela temperatura de pirólise e pela interação entre esses fatores ($p < 0,05$).

Figura 2 - Teores de umidade (A), materiais voláteis (B), cinzas (C) e carbono fixo (D). Barras representam as médias ± desvio-padrão. Letras minúsculas diferentes indicam diferenças entre as biomassas em cada temperatura, enquanto letras maiúsculas diferentes indicam diferenças entre as temperaturas dentro de cada biomassa (Tukey, $p < 0,05$).

O teor de umidade apresentou interação significativa entre biomassa e temperatura de pirólise. Em todas as temperaturas avaliadas, a casca de café apresentou maiores teores de umidade que a casca de coco verde. A 300 °C, os valores foram de 9,52% para a casca de café e 6,11% para a casca de coco verde. A 600 °C, o teor de umidade da casca de café reduziu para 8,60%, enquanto o da casca de coco verde aumentou para 6,97%. Essa redução está

associada à eliminação progressiva de grupos funcionais oxigenados hidrofílicos durante a pirólise, tornando a superfície do biochar menos polar e, consequentemente, menos suscetível à retenção de água (Bao et al., 2021). Entretanto, a 900 °C, observou-se aumento do teor de umidade para 13,12% na casca de café e 10,58% na casca de coco verde. Esse comportamento pode ser explicado pelo maior desenvolvimento da estrutura porosa do biochar em temperaturas elevadas, caracterizada por aumento da área superficial específica e do volume de poros, favorecendo a adsorção de umidade após a exposição ao ambiente (Li & Tan, 2021). Essas características são importantes para aplicações agrícolas, pois podem aumentar a capacidade de retenção de água no solo e contribuir para a melhoria de suas propriedades físicas (Li & Tan, 2021).

A composição química imediata do biochar foi significativamente influenciada pela interação entre a biomassa e a temperatura de pirólise. Independentemente da matéria-prima, o aumento da temperatura promoveu redução acentuada do teor de materiais voláteis e aumento dos teores de carbono fixo e cinzas. Na casca de coco verde, os materiais voláteis reduziram de 51,16% para 13,94% e 11,87%, enquanto na casca de café diminuíram de 45,95% para 19,93% e 14,34%, nas temperaturas de 300, 600 e 900 °C, respectivamente. Em sentido oposto, o teor de carbono fixo aumentou de 45,51% para 78,53% e 79,55% na casca de coco verde e de 45,94% para 64,23% e 68,75% na casca de café. A redução dos materiais voláteis e o aumento do carbono fixo refletem a intensificação da degradação térmica da hemicelulose, da celulose e das frações menos condensadas da lignina, promovendo a liberação de compostos voláteis e a concentração da matriz carbonosa remanescente (Sakhiya et al., 2021).

O teor de cinzas também aumentou com a elevação da temperatura, passando de 3,33% para 7,53% e 8,57% na casca de coco verde e de 8,11% para 15,84% e 16,91% na casca de café. Esse comportamento resulta da concentração relativa dos elementos minerais presentes na biomassa, uma vez que a degradação e volatilização da fração orgânica reduzem a massa total do material e elevam proporcionalmente a fração inorgânica remanescente (Veiga et al., 2017; Zhao et al., 2017). Os maiores teores de cinzas observados na casca de café evidenciam sua maior concentração de constituintes minerais, os quais podem contribuir para o fornecimento de nutrientes e para a elevação do pH do solo, favorecendo a melhoria da fertilidade e a correção da acidez (Anyebe et al., 2025; Asirifi et al., 2025). De maneira geral, o aumento da temperatura de pirólise promoveu a produção de biochars com menor teor de materiais voláteis, maior teor de carbono fixo e maior conteúdo mineral, características que

aumentam sua estabilidade química e potencial para sequestro de carbono e melhoria das propriedades do solo (Adhikari et al., 2024; Anyebe et al., 2025).

4. Conclusões

A temperatura de pirólise e o tipo de biomassa influenciaram significativamente os rendimentos dos produtos e a composição química imediata dos biochars. O aumento da temperatura reduziu o rendimento de biochar e o teor de materiais voláteis, enquanto elevou os teores de carbono fixo e cinzas. Os biochars da casca de coco verde apresentaram, em geral, maior teor de carbono fixo, enquanto aqueles produzidos com casca de café apresentaram maior fração mineral. Os resultados demonstram que a seleção da biomassa e da temperatura permite modular as características do biochar de acordo com a finalidade pretendida.

5. Agradecimentos

Os autores agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES – Código de financiamento 001), Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq - Chamada Universal nº. 18/2021, Chamada Bolsa de Produtividade em Desenvolvimento Tecnológico e Extensão Inovadora nº. 08/2022, Apoio a Projetos Internacionais de Pesquisa Científica, Tecnológica e de Inovação nº. 14/2023, Conhecimento Brasil – Rede de Colaboração nº. 22/2024, Apoio a Projetos Internacionais de Pesquisa Científica, Tecnológica e de Inovação nº. 16/2024).

6. Referências bibliográficas

Adhikari, S., Moon, E., Paz-Ferreiro, J., & Timms, W. (2024). Comparative analysis of biochar carbon stability methods and implications for carbon credits. *Science of The Total Environment*, *914*, 169607. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.169607

Anyebe, O., Sadiq, F. K., Manono, B. O., & Matsika, T. A. (2025). Biochar Characteristics and Application: Effects on Soil Ecosystem Services and Nutrient Dynamics for Enhanced Crop Yields. *Nitrogen*, *6*(2), 31. https://doi.org/10.3390/nitrogen6020031

Asirifi, I., Makarowsky, L., Heinze, S., Herre, M., Werner, S., Frimpong, K. A., Pierburg, R., & Marschner, B. (2025). Biochar and Kitchen Stove Ash for Improving Nutrient Availability and Microbial Functions of Tropical Acidic Soil. *Soil Systems*, *9*(2), 49. https://doi.org/10.3390/soilsystems9020049

American Society for Testing and Materials - ASTM. (2021), D1762-84(2021): Standard Test Method for Chemical Analysis of Wood Charcoal. Disponível em: https://www.astm.org/d1762-84r21.html

Bao, X., Li, M., Niu, R., Lu, J., Panigrahi, S., Garg, A., & Berretta, C. (2021). Hygroscopic Water Retention and Physio-Chemical Properties of Three In-House Produced Biochars from Different Feedstock Types: Implications on Substrate Amendment in Green Infrastructure. *Water*, *13*(19), 2613. https://doi.org/10.3390/w13192613

Barros, M. V., & Salvador, R. (2025). Strategies for sustainable reuse of green coconut biomass in a Southern Brazilian coastal region: Perspectives from a circular economy. *Procedia CIRP*, *135*, 1058–1063. https://doi.org/10.1016/j.procir.2024.12.108

De Carvalho Oliveira, F., Srinivas, K., Helms, G. L., Isern, N. G., Cort, J. R., Gonçalves, A. R., & Ahring, B. K. (2018). Characterization of coffee (Coffea arabica) husk lignin and degradation products obtained after oxygen and alkali addition. *Bioresource Technology*, *257*, 172–180. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.01.041

Li, H., & Tan, Z. (2021). Preparation of high water-retaining biochar and its mechanism of alleviating drought stress in the soil and plant system. *Biochar*, *3*(4), 579–590. https://doi.org/10.1007/s42773-021-00107-0

Liu, J., Chen, X., Chen, W., Xia, M., Chen, Y., Chen, H., Zeng, K., & Yang, H. (2023). Biomass pyrolysis mechanism for carbon-based high-value products. *Proceedings of the Combustion Institute*, *39*(3), 3157–3181. https://doi.org/10.1016/j.proci.2022.09.063

Lomelí-Ramírez, M. G., Anda, R. R., Satyanarayana, K. G., Bolzon De Muniz, G. I., & Iwakiri, S. (2018). Comparative Study of the Characteristics of Green and Brown Coconut Fibers for the Development of Green Composites. *BioResources*, *13*(1), 1637–1660. https://doi.org/10.15376/biores.13.1.1637-1660

Oliveira, T. R., Da Silva, Á. M., Cupertino, G. F. M., Delatorre, F. M., Amorim, G. A., De Souza, M. P., Brito, J. O., & Dias Júnior, A. F. (2025). Influence of Pyrolysis Temperature on Critical Variables Related to Charcoal Spontaneous Combustion. *Bioresources and Bioproducts*, *1*(2), 6. https://doi.org/10.3390/bioresourbioprod1020006

Sakhiya, A. K., Anand, A., Aier, I., Vijay, V. K., & Kaushal, P. (2021). Suitability of rice straw for biochar production through slow pyrolysis: Product characterization and thermodynamic analysis. *Bioresource Technology Reports*, *15*, 100818. https://doi.org/10.1016/j.biteb.2021.100818

Silva, I. G. C. B., Antonio, A. D. S., Carvalho, E. M. D., Dos Santos, G. R. C., Pereira, H. M. G., & Veiga Junior, V. F. D. (2024). Method optimization for the extraction of chlorogenic acids from coffee parchment: An ecofriendly alternative. *Food Chemistry*, *458*, 139842. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2024.139842

Tomczyk, A., Sokołowska, Z., & Boguta, P. (2020). Biochar physicochemical properties: Pyrolysis temperature and feedstock kind effects. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, *19*(1), 191–215. https://doi.org/10.1007/s11157-020-09523-3

Veiga, T. R. L. A., Lima, J. T., Dessimoni, A. L. de A., Pego, M. F. F., Soares, J. R., & Trugilho, P. F. (2017). Different plant biomass characterizations for biochar production. *Cerne*, *23*(4), 529–536. https://doi.org/10.1590/01047760201723042373

Wang, Y., Xu, L., Li, J., Ren, Z., Liu, W., Ai, Y., Zhou, Y., Li, Q., Zhang, B., Guo, N., Qu, J., & Zhang, Y. (2024). Multi-output neural network model for predicting biochar yield and composition. *Science of The Total Environment*, *945*, 173942. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.173942

Zhao, S.-X., Ta, N., & Wang, X.-D. (2017). Effect of Temperature on the Structural and Physicochemical Properties of Biochar with Apple Tree Branches as Feedstock Material. *Energies*, *10*(9), 1293. https://doi.org/10.3390/en10091293

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Efeito da temperatura de pirólise nas características do biochar de resíduos de bambu (*Bambusa vulgaris*)

Atanásio Félix[1,2]; Merlindo Jacinto Manjate[1,3]; Joy Aduralere Ogunsuyi[1]; Paulo Renato Souza de Oliveira[1]; Sabrina Soares Da Silva[1]; Fabíola Martins Delatorre[1]; Juliana Terezinha Santos da Cruz[1]; Ananías Francisco Dias Júnior[1].

[1] Universidade Federal do Espírito Santo (UFES), Departamento de Ciências Florestais e da Madeira. CEP 29550-000, Jerônimo Monteiro, ES, Brasil.
[2] Instituto de Investigação Agrária de Moçambique (IIAM), Delegação Regional Noroeste (DRNe), Posto Agrário de Mutuáli, CEP: 09-12-04, Malema, Nampula, Moçambique.
[3] Universidade Lúrio (UniLúrio), Faculdade de Ciências Agrárias, CEP 3300, Campus Unango, Distrito de Sanga, Niassa, Moçambique.

Resumo: O biochar apresenta elevado potencial para aplicações agrícolas devido à sua capacidade de melhorar as propriedades físicas, químicas e biológicas do solo. A presente pesquisa avaliou o efeito de três temperaturas de pirólise (300, 600 e 900 °C) nas características do biochar produzido a partir de resíduos de bambu coletados no município de Jerônimo Monteiro, Brasil. As pirólises foram realizadas em forno elétrico tipo mufla, equipado com sistema de condensação de gases, a uma taxa de aquecimento de 5 °C min^{-1} e tempo de residência de 1h. O experimento foi conduzido em um DIC, com três tratamentos e três repetições. Todas as análises estatísticas foram conduzidas no software R, e os efeitos avaliados apresentaram significância estatística. O aumento da temperatura de pirólise (300–900 °C) resultou na diminuição do rendimento de biochar (61,37–26,04%) e do teor de materiais voláteis (58,42–7,59%), bem como no aumento do rendimento de líquido pirolenhoso (15,60–45,75%), do rendimento de gases não condensáveis (23,02–28,20%), do teor de cinzas (2,02–6,14%) e do teor de carbono fixo (39,56–86,28%), evidenciando maior grau de carbonização da biomassa em temperaturas mais elevadas.

Palavras-chave: Biomassa lignocelulósica; Rendimento gravimétrico; Análise imediata.

Effect of pyrolysis temperature on the characteristics of biochar from Bamboo (*Bambusa vulgaris*) residues

Abstract: Biochar has great potential for agricultural applications due to its ability to improve the physical, chemical, and biological properties of soil. This study evaluated the effect of three pyrolysis temperatures (300, 600, and 900 °C) on the characteristics of biochar produced from bamboo residues collected in the municipality of Jerônimo Monteiro, Brazil. Pyrolysis was carried out in an electric muffle furnace equipped with a gas condensation system, using a heating rate of 5 °C min^{-1} and a residence time of 1 h. The experiment was conducted in a completely randomized design (CRD), with three treatments and three replicates. All statistical analyses were conducted using R software, and the evaluated effects were statistically significant. Increasing the pyrolysis temperature (300–900 °C) resulted in a decrease in biochar yield (61.37–26.04%) and volatile matter content (58.42–7.59%), as well as an increase in pyroligneous liquid yield (15.60–45.75%), non-condensable gas yield (23.02–28.20%), ash content (2.02–6.14%), and fixed carbon content (39.56–86.28%), indicating a higher degree of biomass carbonization at elevated temperatures.

Keywords: Lignocellulosic biomass; Gravimetric yield; Proximate analysis.

Introdução

A crescente demanda por fontes renováveis de energia e por alternativas sustentáveis para o aproveitamento de resíduos lignocelulósicos tem impulsionado o desenvolvimento de tecnologias capazes de agregar valor à materiais de origem vegetal (Supapo et al., 2022). O biochar é um produto originário da pirólise e que se destaca por ser um potencial para suprir esta demanda, uma vez que utiliza a biomassa como matéria-prima.

O biochar apresenta elevado potencial para aplicações agrícolas devido à sua capacidade de melhorar as propriedades físicas, químicas e biológicas do solo. Sua estrutura porosa favorece a retenção de água e nutrientes, contribuindo para a fertilidade do solo e a atividade microbiana (Waheed et al., 2025). A pirólise promove a conversão termoquímica da biomassa em produtos sólidos, líquidos e gasosos, possibilitando o aproveitamento energético e a obtenção de materiais com propriedades específicas para diferentes aplicações (Supapo, 2022; Talwar et al., 2025).

A espécie *Bambusa vulgaris* Schrad. ex J.C. Wendl. apresenta grande potencial para a produção de biomassa devido à sua alta capacidade de renovação e adaptação a diferentes condições ambientais. Além da utilização em construções, artesanato e produção de celulose, o processamento do bambu gera quantidades significativas de resíduos que podem ser aproveitados por meio da conversão termoquímica, contribuindo para a redução de impactos ambientais e para o desenvolvimento de sistemas produtivos mais sustentáveis (Ahmad, 2025; Fobane et al., 2024). Para Biswas et al. (2022), o seu alto teor de fibras, os baixos custos de manutenção e a ampla diversidade genética favorecem sua utilização como matéria-prima para a produção de biochar. Entretanto, os mesmos autores evidenciam que a magnitude dessas mudanças varia conforme a espécie vegetal e as condições de processamento empregadas, reiterando a necessidade de investigações específicas para cada matéria-prima.

Neste contexto, a hipótese central do trabalho é que a elevação da temperatura de pirólise promove a clivagem térmica das ligações químicas da biomassa e intensifica as reações de craqueamento secundário dos compostos voláteis e alcatrões, favorecendo a formação de gases leves e reduzindo o rendimento de biochar. Entretanto, espera-se que exista uma temperatura ótima de pirólise capaz de proporcionar um equilíbrio entre o rendimento e as características físico-químicas desejáveis do biochar.

Com base nessa hipótese, este trabalho teve como objetivo avaliar o impacto da temperatura de pirólise nas características do biochar produzido a partir de resíduos de *B.*

vulgaris, analisando os rendimentos dos produtos da pirólise e as alterações na composição química imediata do material.

1. Material e métodos

2.1 Coleta e preparação do material

Os resíduos de bambu utilizados neste estudo foram coletados no município de Jerônimo Monteiro, Espírito Santo, Brasil, localizado nas coordenadas geográficas 20°47′20″ S de latitude e 41°23′42″ O de longitude. Após a coleta, o material foi fragmentado em pedaços de aproximadamente 4 cm, lavados com água corrente para a remoção de impurezas superficiais e, posteriormente, submetidos à secagem em estufa a 105 ± 2 °C por 24 horas, com o objetivo de reduzir o teor de umidade do material antes do processo de pirólise.

2.2 Produção e caracterização do biochar

O experimento foi conduzido em delineamento inteiramente casualizado (DIC), com três tratamentos correspondentes às temperaturas de pirólise (300, 600 e 900 °C) e três repetições (pirólises), totalizando nove unidades experimentais. As pirólises foram realizadas em forno elétrico tipo mufla, equipado com sistema de condensação de gases. O processo foi conduzido a uma taxa de aquecimento de 5 °C min^{-1} até as temperaturas finais estabelecidas, mantendo-se tempo de residência de 1 hora em cada condição de pirólise. Após cada ensaio, foram determinados os rendimentos gravimétricos de biochar, liquido pirolenhoso e, por diferença, de gases não condensáveis (Equações 1, 2 e 3).

$$RB(\%) = \frac{M_{BC}}{M_B} \times 100 \quad (1)$$

Onde: RB = rendimento gravimétrico de biochar (%); M_{BC}= massa seca de biochar obtida (g); M_B= massa seca inicial da biomassa (g).

$$RLP(\%) = \frac{M_{LP}}{M_B} \times 100 \quad (2)$$

Onde: RLP= rendimento gravimétrico de líquido pirolenhoso (%); M_{LP}= massa do líquido pirolenhoso condensado (g).

$$RGNC(\%) = 100 - (RB + RLP \quad (3)$$

Onde: RGNC = rendimento gravimétrico dos gases não condensáveis (%)

Para a caracterização do biochar, as amostras foram moídas e peneiradas, sendo utilizado o material retido entre as peneiras de 40 e 60 *mesh*. Em seguida, as amostras foram submetidas à secagem em estufa a 103 ± 2 °C, visando à remoção da umidade residual.

A análise da composição imediata do biochar foi realizada com cinco determinações analíticas para cada amostra obtida em cada tratamento do experimento principal, conforme a norma ASTM D1762-84 (ASTM, 2021), para determinação dos teores de materiais voláteis, cinzas e carbono fixo.

A morfologia das amostras de biochar foi avaliada por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV). As amostras com granulometria de 60 *mesh* foram fixadas em suportes metálicos com fita de carbono condutiva e metalizadas com ouro em sistema Balzers Union SCD 030. As análises foram realizadas em microscópio eletrônico de varredura modelo JSM-IT200 (JEOL, Tóquio, Japão), operando a uma voltagem de aceleração de 10 kV.

2.3 Análise de dados

A análise estatística dos dados foi realizada por meio de análise de variância (ANOVA), em delineamento inteiramente casualizado (DIC), considerando a temperatura de pirólise como fator de tratamento (300, 600 e 900 °C) no experimento principal. Inicialmente, os pressupostos da ANOVA foram verificados. A normalidade dos dados foi avaliada pelo teste de Shapiro-Wilk, enquanto a homogeneidade das variâncias foi testada pelo teste de Bartlett. O atendimento a esses pressupostos foi considerado condição necessária para a aplicação das análises inferenciais. As variáveis resposta analisadas incluíram o rendimento de biochar, liquido pirolenhoso e gases não condensáveis, bem como os teores de materiais voláteis, cinzas e carbono fixo. Quando observadas diferenças significativas entre os tratamentos ($p \leq 0,05$), as médias foram analisadas e procedeu-se ao ajuste de modelos de regressão para descrever o comportamento das variáveis em função da temperatura de pirólise, sendo testados modelos lineares e quadráticos, conforme o melhor ajuste aos dados. Todas as análises estatísticas foram conduzidas no *software R (R Core Team).*

2. Resultados e discussão

Os resultados demonstram que a temperatura de pirólise influenciou significativamente os rendimentos dos produtos sólido (biochar), líquido pirolenhoso e gases não condensáveis, além de afetar a composição química imediata do biochar produzido. Conforme apresentado na Figura 1A, o rendimento de biochar diminuiu à medida que a temperatura de pirólise aumentou. O maior rendimento foi obtido a 300 °C, correspondendo a 61,37%, enquanto o menor valor foi

observado a 900 °C, com 26,04%. Esse comportamento evidencia uma relação inversa entre a temperatura de pirólise e o rendimento de biochar, indicando que temperaturas mais elevadas intensificam a degradação térmica da biomassa, promovendo maior liberação de compostos voláteis e, consequentemente, reduzindo a fração sólida produzida.

No estudo de Wang et al. (2024), que investigaram a evolução das propriedades físico-químicas do biochar de bambu durante a pirólise em diferentes temperaturas, é possível verificar que na faixa de 350 para 500º C o rendimento do biochar de bambu foi fortemente influenciado pela temperatura de pirólise, apresentando uma redução acentuada à medida que a temperatura aumentou, evidenciando que a degradação térmica dos componentes lignocelulósicos promove intensa liberação de compostos voláteis. Acima de 500 °C, entretanto, os autores observaram que o rendimento permaneceu praticamente estável, apresentando pouca variação até 1000 °C, indicando que a maior parte da desvolatilização já havia ocorrido.

Figura 1 - Rendimento dos produtos da pirólise de bambu. A: rendimento do biochar (RB); B: rendimento em líquido pirolenhoso (RLP); C: Rendimento em gases não condensáveis (RGNC).

Há evidências consistentes de que o rendimento de biochar diminui à medida que a temperatura de pirólise aumenta. Essa relação tem sido observada de forma recorrente em uma ampla variedade de tipos de biomassa e em diferentes condições experimentais (Baghel et al., 2021; Xie et al., 2021; Zhang et al., 2022).

Esta tendência tem sido observada em estudos com diferentes sistemas de pirólise de bambu. Adeniyi et al. (2022) obtiveram rendimento de biochar de aproximadamente 38% a 340 °C, evidenciando que o avanço da carbonização reduz a quantidade de material sólido remanescente. Em temperaturas mais elevadas, Aier et al. (2024) registraram rendimentos entre 23 e 27% na faixa de 500 a 600 °C, reforçando que o aumento da temperatura favorece a conversão da biomassa em produtos líquidos e gasosos em detrimento da formação de biochar.

Em relação ao rendimento de líquido pirolenhoso (Figura 1B), os resultados evidenciam que o aumento da temperatura de pirólise promoveu incremento no rendimento dessa fração. Estudos com outras biomassas relatam que o rendimento de líquidos pode atingir um máximo em temperaturas intermediárias, reduzindo-se posteriormente em decorrência do craqueamento secundário dos vapores (Trada et al., 2022), fenômeno que não foi registrado no presente estudo. Para Abhijeet et al. (2019) a distribuição dos produtos da pirólise é fortemente

dependente da natureza da biomassa e das condições operacionais do processo, como composição química, taxa de aquecimento, tempo de residência e eficiência do sistema de condensação.

O mesmo fenômeno verifica-se para os gases não condensáveis (Figura 1C), cujo rendimento aumentou com a elevação da temperatura de pirólise. Em temperaturas mais elevadas, ocorre uma decomposição mais completa da biomassa, acompanhada da intensificação das reações secundárias de craqueamento dos vapores e alcatrões gerados durante o processo (Kim et al., 2020).

As análises das propriedades químicas do biochar revelam variações significativas entre os biochars produzidos a diferentes temperaturas de pirólise, para os teores de materiais voláteis, cinzas e carbono fixo (Figura 2A, 2B e 2C). A temperatura de pirólise influenciou significativamente a composição química imediata do biochar, refletindo diretamente em seu potencial para aplicações agrícolas. O teor de materiais voláteis (TMV) reduziu de 58,42% a 300 °C para 16,19% a 600 °C e 7,59% a 900 °C, indicando maior grau de carbonização com o aumento da temperatura. Em contrapartida, o teor de cinzas (TCZ) aumentou de 2,02% para 4,41% e 6,14% nas temperaturas de 300, 600 e 900 °C, respectivamente. O teor de carbono fixo (CF) apresentou aumento expressivo, passando de 39,56% a 300 °C para 79,41% a 600 °C e 86,28% a 900 °C.

Figura 2 - Propriedades químicas do biochar produzido a partir de resíduos de bambu em diferentes temperaturas de pirólise (300, 600 e 900 °C). Teor de materiais voláteis (A); Teor de cinzas (B); Carbono fixo (C).

Em geral, à medida que a temperatura final de pirólise aumenta, ocorre uma redução do teor de materiais voláteis no biochar, acompanhada pelo aumento dos teores de carbono fixo e de cinzas. Esse comportamento decorre da decomposição térmica dos componentes orgânicos da biomassa, que são volatilizados e liberados na forma de gases em temperaturas mais elevadas, resultando em um resíduo sólido progressivamente mais rico em carbono. Essa tendência tem sido observada em diferentes tipos de biomassa, indicando que a relação entre o aumento da temperatura de pirólise, a diminuição dos voláteis e o enriquecimento em carbono é um fenômeno amplamente consistente (Babinszki et al., 2024; Imwinkelried et al., 2024).

3. Conclusões

Como resultados deste estudo, no qual as características do biochar de resíduos de bambu são avaliadas a 300, 600 e 900 ºC, o seguinte pode ser dito:

Embora a temperatura de 300 °C proporcione maior rendimento em massa de biochar, o material apresenta menor grau de carbonização, evidenciado pelo menor teor de carbono fixo e maior teor de materiais voláteis, indicando uma desvolatilização menos intensa da biomassa. Na temperatura de 900 °C, pode-se verificar maior enriquecimento relativo em carbono fixo e redução dos materiais voláteis, mas observa-se redução expressiva do rendimento em relação a 300 °C e aumento do teor de cinzas, o que pode reduzir a eficiência de recuperação da fração sólida e elevar a demanda energética do processo.

Dessa forma, com base nas propriedades determinadas neste estudo, a temperatura de 600 °C apresenta-se como um compromisso favorável entre rendimento de biochar e grau de carbonização, indicando potencial para a produção de biochar de resíduos de bambu. Essa temperatura, favorece a carbonização da biomassa, resultando em maior teor de carbono fixo e menor teor de materiais voláteis, características associadas à maior estabilidade do biochar. Neste sentido, pesquisas futuras podem concentrar-se em avaliar propriedades específicas, como área superficial, pH, contaminantes, entre outras, visando à definição da temperatura mais adequada para a produção de biochar destinado a aplicações agrícolas e ambientais.

4. Agradecimentos

Agradecimentos a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES – Código de financiamento 001), Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq - Chamada Universal nº. 18/2021, Chamada Bolsa de Produtividade em Desenvolvimento Tecnológico e Extensão Inovadora nº. 08/2022, Apoio a Projetos Internacionais de Pesquisa Científica, Tecnológica e de Inovação nº. 14/2023, Conhecimento Brasil – Rede de Colaboração nº. 22/2024, Apoio a Projetos Internacionais de Pesquisa Científica, Tecnológica e de Inovação nº. 16/2024).

5. Referências bibliográficas

Abhijeet, P., Swagathnath, G., Rangabhashiyam, S., Rajkumar, M. A., & Balasubramanian, P. (2019). Prediction of pyrolytic product composition and yield for various grass biomass feedstocks. *Biomass Conversion and Biorefinery*. https://doi.org/10.1007/s13399-019-00475-5.

Adeniyi, A. G., Adeyanju, C. A., Iwuozor, K. O., Odeyemi, S. O., Emenike, E. C., Ogunniyi, S., & Te-Erebe, D. k. (2022). Retort carbonization of bamboo (Bambusa vulgaris) waste for thermal energy recovery. *Clean Technologies and Environmental Policy*. https://doi.org/10.1007/s10098-022-02415-w.

Ahmad, Z., Kumari, R., Mir, B., Saeed, T., Firdaus, F., Vijayakanth, V., Keerthana, K., Ramakrishnan, M., & Wei, Q. (2025). Bamboo for the Future: From Traditional Use to Industry 5.0 Applications. *Plants*, *14*(19), 32. https://doi.org/https://doi.org/10.3390/plants14193019.

Aier, I., Kakati, U., Vijay, V. K., & Kaushal, P. (2024). Estimation of recycled bamboo availability and investigation of its potential utilization after value-addition through dual fuel cookstoves. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, *68*. https://doi.org/10.1016/j.seta.2024.103852.

ASTM International. (2021). *ASTM D1762-84(2021): Standard Test Method for Chemical Analysis of Wood Charcoal*. https://doi.org/10.1520/D1762-84R21.

Babinszki, B., Sándor Czirok, I., Johnson, R., Sebestyén, Z., Jakab, E., Wang, L., Turn, S., Skreiberg, Ø., & Czégény, Z. (2024). Volatile matter characterization of birch biochar produced under pressurized conditions. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, *149*, 10915–10926. https://doi.org/10.1007/s10973-024-13381-4.

Baghel, P., Sakhiya, A. K., & Kaushal, P. (2021). Influence of temperature on slow pyrolysis of Prosopis Juliflora: An experimental and thermodynamic approach. *Renewable Energy*. https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.12.053.

Biswas, S., Rahaman, T., Gupta, P., Mitra, R., Dutta, S., Kharlyngdoh, E., Guha, S., Ganguly, J., Pal, A., & Das, M. (2022). Cellulose and lignin profiling in seven, economically important bamboo species of India by anatomical, biochemical, FTIR spectroscopy and thermogravimetric analysis. *Biomass and Bioenergy*, *158*. https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2022.106362.

Fobane, J. L., Bussard, A. C. M., Zekeng, J. C., Chimi, P. M., & Mbolo, M. M. (2024). Uses, Structures, and Biomass of Some Stands of Bambusa Vulgaris Schrad, ex J.C. Wendl in the Center Region of Cameroon. *Forestist*, *74*(1), 53–61. https://doi.org/10.5152/forestist.2023.23013.

Imwinkelried, G., Bonetto, L., Saux, C., & Blanco, M. B. (2024). High-value products from chickpea residues by thermal pyrolysis and its environmental impacts. *Biomass and Bioenergy*. https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2024.107584.

Kim, S., Lee, N., & Lee, J. (2020). Polymers Pyrolysis for Nylon 6 Monomer Recovery from Teabag Waste. *Polimers*, 10. https://doi.org/10.3390/polym12112695.

Supapo, K. R. M., Lozano, L., Tabañag, I. D. F., & Querikiol, E. M. (2022). A Backcasting Analysis toward a 100% Renewable Energy Transition by 2040 for Off-Grid Islands. *Energies*, 20. https://doi.org/10.3390/en15134794.

Talwar, P., Agudelo, M. A., & Nanda, S. (2025). Pyrolysis Process, Reactors, Products, and Applications: A Review. In *Energies* (Vol. 18, Number 11). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). https://doi.org/10.3390/en18112979.

Trada, A., Chaudhary, A., Patel, D., & Upadhyay, D. S. (2022). An alternative fuel production from sawdust through batch-type pyrolysis reactor: Fuel properties and thermodynamic analysis. *Process Safety and Environmental Protection*. https://doi.org/10.1016/j.psep.2022.09.023.

Waheed, A., Xu, H., Qiao, X., Aili, A., Yiremaikebayi, Y., Haitao, D., & Muhammad, M. (2025). Biochar in sustainable agriculture and Climate Mitigation: Mechanisms, challenges, and applications in the circular bioeconomy. *Biomass and Bioenergy*, *193*. https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2024.107531.

Wang, J., Li, Z., Li, Y., Wang, Z., Liu, Z., & Ma, J. (2024). Evolution and correlation of the physiochemical properties of bamboo char under successive pyrolysis process. *Biochar*, *6*(1), 33. https://doi.org/10.1007/s42773-024-00321-6.

Xie, R., Zhu, Y., Zhang, H., Zhang, P., & Han, L. (2021). Effects and mechanism of pyrolysis temperature on physicochemical properties of corn stalk pellet biochar based on combined characterization approach of microcomputed tomography and chemical analysis. *Bioresource Technology*, *329*, 124907. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.124907.

Zhang, B., Bian, Y., Zhang, S., Hu, H., Jia, X., Wang, X., Chen, J., Cheng, C., Jia, X., Wu, Z., & Zhu, L. (2022). How Biochar Derived from Pond Cypress (Taxodium Ascendens) Evolved with Pyrolysis Temperature and Time and Their End Efficacy Evaluation. *Res. Public Health*, *19*, 11205. https://doi.org/10.3390/ijerph191811205.

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Efeito da temperatura de pirólise no rendimento de biocarvão das cascas de *Zeyheria tuberculosa* e *Genipa americana*

Gabriel Matos Diniz[1]; Vinicius Resende de Castro[1]; Angélica de Cássia Oliveira Carneiro[1]; Evanderson Luis Capelete Evangelista[1]; Wiliam Colatino Martins[1]; Ana Julia Alves Pereira[1]

[1]Departamento de Engenharia Florestal, Universidade Federal de Viçosa (UFV), Viçosa/MG, Brasil – gabriel.m.diniz@ufv.br

Resumo: O aproveitamento de cascas residuais do processamento madeireiro por meio da conversão termoquímica representa uma alternativa para a valorização de resíduos florestais na bioeconomia circular. Este estudo teve como objetivo avaliar o efeito da temperatura final de pirólise sobre os rendimentos gravimétricos dos produtos obtidos a partir das cascas de ipê-felpudo (*Zeyheria tuberculosa*) e jenipapo (*Genipa americana*). As cascas foram secas a 103 ± 2 ºC até massa constante e submetidas à pirólise em forno mufla nas temperaturas de 450, 550 e 650 °C, com tempo de residência de 1 hora e três repetições por tratamento. Os dados foram submetidos à análise de variância, e os rendimentos gravimétricos foram determinados por diferença de massa. O aumento da temperatura reduziu significativamente o rendimento de biocarvão para ambas as espécies, de 51,60 para 38,84% no ipê-felpudo e de 37,67 para 30,74% no jenipapo. Em contrapartida, os gases não condensáveis aumentaram de 13,24 para 28,14% e de 23,73 para 28,21%, respectivamente. Os gases condensáveis apresentaram comportamento distinto entre as espécies, atingindo máximos de 38,97% a 550 °C no ipê-felpudo e de 41,06% a 650 °C no jenipapo. O ipê-felpudo apresentou maior rendimento em biocarvão em todas as temperaturas, indicando maior estabilidade térmica, enquanto o jenipapo destacou-se pela maior formação de frações condensáveis líquidas. Conclui-se que a temperatura de pirólise influencia a distribuição dos produtos, evidenciando potenciais distintos de aproveitamento termoquímico dessas biomassas.

Palavras-chaves: Biomassa residual; Biorrefinaria; Bioenergia

Effect of pyrolysis temperature on the biochar yield from barks of *Zeyheria tuberculosa* and *Genipa americana*

Abstract: The utilization of residual bark from wood processing through thermochemical conversion represents an alternative for adding value to forest residues within the circular bioeconomy. This study aimed to evaluate the effect of final pyrolysis temperature on the gravimetric yields of products obtained from the bark of *Zeyheria tuberculosa* and *Genipa americana*. The bark samples were dried at 103 ± 2 °C until a constant mass was achieved and then pyrolyzed in a muffle furnace at 450, 550, and 650 °C, with a residence time of 1 h and three replicates per treatment. The data were subjected to analysis of variance, and gravimetric yields were determined based on mass differences. Increasing the temperature significantly reduced biochar yield for both species, from 51.60% to 38.84% for *Z. tuberculosa* and from 37.67% to 30.74% for *G. americana*. In contrast, non-condensable gas yields increased from 13.24% to 28.14% and from 23.73% to 28.21%, respectively. Condensable gases exhibited different patterns between the species, reaching maximum yields of 38.97% at 550 °C for *Z. tuberculosa* and 41.06% at 650 °C for *G. americana*. *Zeyheria tuberculosa* exhibited a higher biochar yield at all temperatures, indicating greater thermal stability, whereas *G. americana* showed greater formation of liquid condensable fractions. It was concluded that pyrolysis temperature influences product distribution, highlighting the distinct potential of these biomasses for thermochemical utilization.

Keywords: Residual biomass; Biorefinery; Bioenergy.

1. Introdução

A crescente demanda por fontes renováveis de energia e por materiais ecoeficientes tem impulsionado o desenvolvimento de pesquisas voltadas ao aproveitamento de biomassas residuais no cenário nacional, ao mesmo tempo em que estimula o estabelecimento de plantios florestais com espécies nativas, sobretudo aqueles associados à restauração ecológica e à remoção de carbono atmosférico. O reflorestamento figura entre as rotas naturais de mitigação climática de maior potencial de custo-efetividade globalmente (Griscom et al., 2017).

Entretanto, a viabilidade econômica desses empreendimentos não se sustenta exclusivamente na comercialização de créditos de carbono: o manejo florestal, por meio de desbastes e da exploração programada, também disponibiliza matéria-prima para o processamento industrial em serrarias, que convertem a madeira em produtos de maior valor agregado. Esse processamento, no entanto, é intrinsecamente gerador de resíduos, estima-se que o rendimento médio em madeira serrada obtido a partir de toras varie entre 25% e 74%, com

média próxima de 52%, sendo o restante do volume convertido em resíduos como costaneiras, aparas, serragem e casca, esta última respondendo por parcela expressiva do material não aproveitado no desdobro (Yang & Jenkins, 2008).

Dentre esses resíduos, as cascas destacam-se por seu volume expressivo e por, frequentemente, serem destinadas à queima direta de baixa eficiência energética ou ao descarte inadequado, configurando simultaneamente um desafio ambiental e uma oportunidade econômica ainda subutilizada. A variabilidade composicional e as propriedades energéticas dos resíduos de serraria, influenciadas por fatores como espécie, local de origem e tipo de resíduo (serragem, cavacos, casca), reforçam a necessidade de caracterização específica para orientar seu aproveitamento (Dudziec et al., 2023). Espécies do gênero *Eucalyptus*, amplamente cultivadas para atender às demandas de celulose, papel e madeira, geram quantidades substanciais de resíduos lenhosos com potencial reconhecido para conversão energética por diferentes rotas termoquímicas, como torrefação, carbonização hidrotérmica e pirólise lenta (Salcedo-Puerto et al., 2026).

Nesse contexto, a pirólise se apresenta como uma rota termoquímica promissora para a conversão de resíduos lignocelulósicos em frações sólida, líquida e gasosa de maior valor agregado (Marafon et al., 2020). Contudo, ainda são escassos os estudos que avaliam o comportamento termodegradativo de cascas de espécies nativas da Mata Atlântica cultivadas em plantios voltados simultaneamente à restauração florestal e à produção de madeira, o que limita o conhecimento sobre o potencial de reaproveitamento dessa biomassa residual.

Diante disso, este trabalho teve como objetivo avaliar e comparar o rendimento dos produtos da pirólise (biocarvão, frações condensáveis e gases não-condensáveis) das cascas de ipê-felpudo (*Z. tuberculosa*) e jenipapo (*G. americana*), submetidas a três temperaturas finais de processo (450 °C, 550 °C e 650 °C), visando determinar o potencial de reaproveitamento energético e tecnológico dessas biomassas.

2. Material e métodos

2.1 Coleta e preparo da biomassa

O estudo foi conduzido no Laboratório de Propriedades da Madeira (LPM) da Universidade Federal de Viçosa (UFV), utilizando cascas residuais de duas espécies arbóreas nativas provenientes de plantios comerciais da empresa Symbiosis Investimentos. Foram utilizadas cascas de ipê-felpudo (*Z. tuberculosa*) e jenipapo (*G. americana*), separadas manualmente do lenho com o auxílio de formão e martelo. Posteriormente, as cascas foram

limpas para a remoção de impurezas superficiais e, em seguida, fragmentadas manualmente em pedações irregulares com dimensões predominantemente compreendidas entre 5 e 8 cm, visando garantir maior uniformidade na transferência de calor durante o processo. Para a padronização da umidade, as amostras foram secas em estufa de circulação forçada de ar a 103 ± 2°C até atingirem massa constante. Após a secagem, as amostras apresentaram teor de umidade entre 0,5% e 0,8% antes da pirólise.

2.2 Processo de pirólise e balanço de massa

Os ensaios de pirólise foram realizados utilizando três repetições para cada temperatura (450 °C, 550 °C e 650 °C). Em cada ensaio, as amostras previamente secas foram acondicionadas no interior de um reator cilíndrico de aço inoxidável, com capacidade de 2000 $cm^{3,}$ hermeticamente fechado para garantir uma atmosfera com restrição de oxigênio. O reator foi inserido em um forno mufla (modelo GP Científica-2000) e acoplado a um sistema de condensação para a recuperação da fração líquida.

Após atingir a temperatura de pirólise, o material permaneceu em residência térmica por 1 hora. Ao término da pirólise, o forno foi desligado e o reator removido, permanecendo em resfriamento à temperatura ambiente por 24 horas. Para acelerar a dissipação de calor e minimizar a oxidação do material, uma manta de algodão umedecida foi aplicada sobre as paredes externas do reator. Após o resfriamento, o biocarvão e a fração líquida condensada foram quantificadas por meio de pesagem em balança analítica. O processo de pirólise, desde a matéria-prima até a obtenção do biocarvão, está ilustrado na Figura 1.



Figura 1 – Representação esquemática do processo de pirólise

O rendimento gravimétrico de cada produto foi determinado em porcentagem, com base na massa da biomassa anidra inicial, de acordo com as Equações 1, 2 e 3:

$$RGC = \frac{(Mc)}{(Mcs)} \times 100 \qquad (1)$$

Em que: RGC é o rendimento em carvão vegetal (%); Mc é a massa de carvão produzido (g) e Mcs é a massa de casca seca utilizada (g).

$$RGGC = \frac{(Mgc)}{(Mcs)} \times 100 \qquad (2)$$

Em que: RGGC é o rendimento em gases condensáveis (%); Mgc é a massa de gases condensáveis produzido (g) e Mcs é a massa de casca seca utilizada (g).

$$RGNC = 100 - RGC - RGGC \qquad (3)$$

Em que: RGNC é o rendimento em gases não condensáveis (%).

3. Resultados e discussão

Os rendimentos gravimétricos médios dos produtos da pirólise (biocarvão, gases condensáveis e gases não condensáveis) obtidos para as cascas de ipê-felpudo (*Z. tuberculosa*) e jenipapo (*G. americana*) nas três temperaturas avaliadas estão apresentados nas figuras 2 e 3.

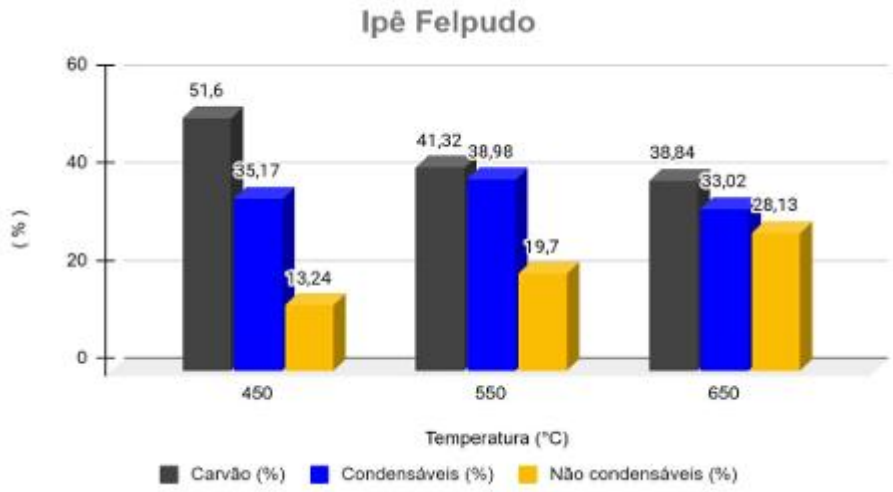


Figura 2 – Rendimento gravimétrico médio dos produtos da pirólise (biocarvão, gases condensáveis e não condensáveis) de cascas residuais de ipê-felpudo (*Z. tuberculosa*) em função da temperatura final de carbonização.

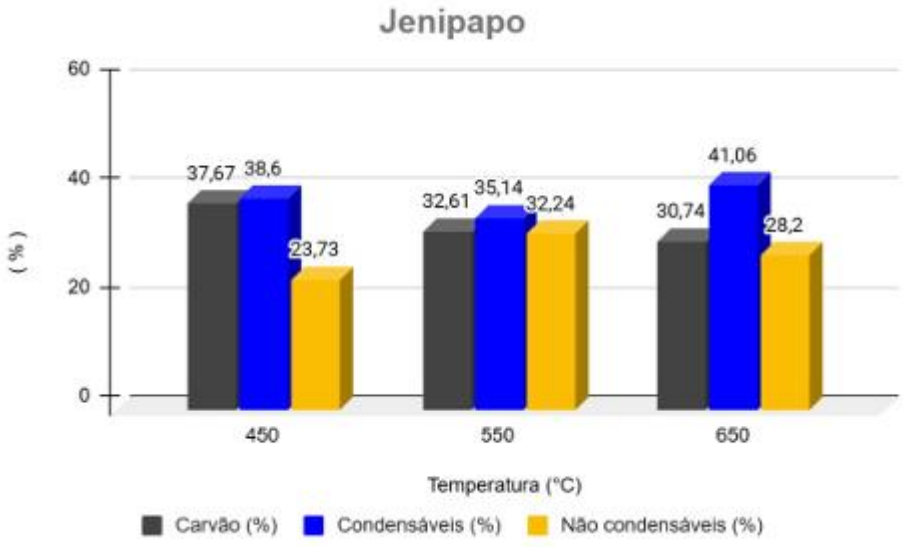


Figura 3 - Rendimento gravimétrico médio dos produtos da pirólise (biocarvão, gases condensáveis e não condensáveis) de cascas residuais de jenipapo (*G. americana*) em função da temperatura final de carbonização

Para as duas espécies estudadas, observou-se uma redução contínua no rendimento em biocarvão com o aumento da temperatura de 450 °C para 650 °C. No ipê-felpudo, o rendimento decresceu de 51,60% para 38,84%, enquanto no jenipapo a redução foi de 37,67% para 30,74%. Esse comportamento decorre da maior intensidade de degradação térmica dos componentes da biomassa sob temperaturas mais elevadas, o que reduz a fração sólida e eleva a formação de voláteis (Andrade et al., 2023).

Em contrapartida, o rendimento em gases não condensáveis (RGNC) aumentou de forma expressiva com a elevação da temperatura para ambas as espécies, passando de 13,24% para 28,14% no ipê-felpudo e de 23,73% para 28,21% no jenipapo. Esse aumento é consistente com a redução observada na fração sólida, uma vez que temperaturas mais elevadas intensificam o craqueamento secundário dos compostos voláteis, favorecendo a formação de gases de baixo peso molecular em detrimento do biocarvão (Weber & Quicker, 2018).

O rendimento em gases condensáveis (RGGC) apresentou variação não linear em função da temperatura de carbonização. No ipê-felpudo, os valores aumentaram de 35,17% (450 °C) para 38,97% (550 °C), seguidos de redução para 33,02% (650 °C), padrão consistente com estudos que associam esse comportamento ao equilíbrio entre a formação de compostos condensáveis e o craqueamento secundário desses vapores em temperaturas mais elevadas (Liu et al., 2021). No jenipapo, observou-se comportamento também não linear, porém com padrão inverso: os valores reduziram de 38,60% (450 °C) para 35,14% (550 °C), seguidos de aumento para 41,06% (650 °C). Esse incremento entre 550 °C e 650 °C diverge do padrão típico de craqueamento progressivo observado no ipê-felpudo, sugerindo que fatores relacionados à composição química da casca, não avaliada neste estudo, podem influenciar de forma espécie-específica o equilíbrio entre as reações primárias e secundárias de pirólise.

O maior rendimento em biocarvão observado para o ipê-felpudo pode estar relacionado às diferenças na composição química da casca entre as espécies. Estudos relatam que biomassas com maior teor de lignina tendem a apresentar maior rendimento gravimétrico em biocarvão, em razão da elevada estabilidade térmica desse polímero, enquanto maiores teores de holocelulose favorecem a formação de produtos voláteis durante a pirólise (Moutinho et al., 2016). Entretanto, como a composição química das cascas não foi determinada neste estudo, essa relação não pode ser confirmada.

Dessa forma, recomenda-se que estudos futuros incluam a caracterização química das cascas, com a determinação dos teores de lignina, holocelulose, extrativos e cinzas, a fim de elucidar a influência desses constituintes sobre o rendimento e as propriedades do biocarvão produzido.

4. Conclusões

O aumento da temperatura final de pirólise de 450 para 650 °C promoveu redução contínua no rendimento de biocarvão para ambas as espécies avaliadas, acompanhada por alterações na distribuição dos produtos da pirólise. A casca de ipê-felpudo *(Z. tuberculosa*) apresentou maior rendimento em biocarvão em relação à casca de jenipapo (*G. americana*) em todas as temperaturas estudadas, evidenciando seu potencial para a produção de biocombustíveis sólidos e materiais carbonáceos. Por sua vez, a casca de jenipapo apresentou maior rendimento de gases condensáveis na temperatura mais elevada (41,06% a 650 °C), indicando maior aptidão para processos voltados à obtenção de produtos líquidos de maior valor agregado nessa condição. De forma geral, os resultados demonstram que ambas as biomassas residuais apresentam potencial de aproveitamento termoquímico, podendo contribuir para a valorização de resíduos florestais e para o fortalecimento de estratégias voltadas à bioeconomia circular.

5. Agradecimentos

Este trabalho foi viabilizado, em parte, pela fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) – Processo APQ-05311-24; APQ-04599-25 e pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq – Processo nº 444395/2024-5.

Gostaria de expressar meu agradecimento à Symbiosis Investimentos pelo apoio financeiro e pelo incentivo ao desenvolvimento deste estudo focado na valorização de biomassas.

6. Referências bibliográficas

Andrade, C. A. de, & Puga, A. P. (2023). Biocarvão: Uso agrícola e ambiental. In W. Bettiol, C. A. Silva, C. E. P. Cerri, L. Martin Neto, & C. A. de Andrade (Eds.), *Entendendo a matéria orgânica do solo em ambientes tropical e subtropical* (pp. 435–473). Embrapa. https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/handle/doc/1161281

Dudziec, P., Stachowicz, P., & Stolarski, M. J. (2023). Diversity of properties of sawmill residues used as feedstock for energy generation. *Renewable Energy*, *202*, 822–833. https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.12.002

Griscom, B. W., Adams, J., Ellis, P. W., Houghton, R. A., Lomax, G., Miteva, D. A., Schlesinger, W. H., Shoch, D., Siikamäki, J. V., Smith, P., Woodbury, P., Zganjar, C., Blackman, A., Campari, J., Conant, R. T., Delgado, C., Elias, P., Gopalakrishna, T., Hamsik, M. R., . . . Fargione, J. (2017). Natural climate solutions. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, *114*(44), 11645–11650. https://doi.org/10.1073/pnas.1710465114

Liu, Y., Song, Y., Ran, C., Siyal, A. A., Jiang, Z., Chtaeva, P., Deng, Z., Zhang, T., Fu, J., Ao, W., & Dai, J. (2021). Characterization and analysis of condensates and non-condensable gases from furfural residue via fast pyrolysis in a bubbling fluidized bed reactor. *Waste Management*, *125*, 77–86. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2021.02.025

Marafon, A. C., Amaral, A. F. C., Silva, R. G. C. da, Reis, E. do N., Sá, V. A. de, Soletti, J. I., Bispo, M. D., & Meneses, A. T. de. (2020). *Reciclagem das cascas de coco verde no contexto da economia circular: Briquetagem e pirólise* (Documentos 240). Embrapa Tabuleiros Costeiros. https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1129401

Moutinho, V. H. P., Rocha, J. J. M. da, Amaral, E. P. do, Santana, L. G. de M., & Águiar, O. J. R. de. (2016). Propriedades químicas e energéticas de madeiras amazônicas do segundo ciclo de corte. *Floresta e Ambiente*, *23*(3), 443–449. https://doi.org/10.1590/2179-8087.131715

Salcedo-Puerto, O., Mendoza-Martinez, C., de Paula Protásio, T., & Vakkilainen, E. (2026). Solid biofuel generation from *Eucalyptus* wood residues: An experimental comparison

study of torrefaction, hydrothermal, and slow pyrolysis. *Renewable Energy*, *263*, Article 125545. https://doi.org/10.1016/j.renene.2026.125545

Weber, K., & Quicker, P. (2018). Properties of biochar. *Fuel*, *217*, 240–261. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2017.12.054

Yang, P., & Jenkins, B. M. (2008). Wood residues from sawmills in California. *Biomass and Bioenergy*, *32*(2), 101–108. https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2007.09.001

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Efeito da variabilidade da biomassa de *Bambusa vulgaris* na composição química imediata e potencial energético

Hagnes Belta Lelles Barboza[1]; Braulio da Silva de Oliveira[1]; Iara Fontes Demuner[1]; Igor Barbosa Silva[1]; Ricardo Fernandes Pena[1]; Saulo Affonso Hygino[1]; Angélica de Cássia Oliveira Carneiro[2]

[1 2] Universidade Federal de Viçosa

Resumo: A variabilidade da biomassa de *Bambusa vulgaris* Schrad. ex J.C.Wendl. influencia sua composição química imediata e seu potencial energético, visando otimizar seu uso energético. Este trabalho objetivou determinar os teores de materiais voláteis, cinzas e carbono fixo nas regiões longitudinal e vegetativa do colmo. Três colmos foram analisados conforme a ASTM D1762-84, e os dados submetidos à análise de variância (ANOVA) e ao teste de Tukey (5%). Os materiais voláteis permaneceram uniformes no colmo, enquanto os teores de cinzas e carbono fixo diferiram entre as regiões. A região basal foi a mais indicada para a carbonização pelo maior teor de carbono fixo. Nas partes vegetativas, o colmo e os galhos apresentaram melhor qualidade energética, enquanto as folhas apresentaram maior teor de cinzas e menor carbono fixo, indicando menor eficiência na combustão. Conclui-se que a variabilidade da biomassa influencia o potencial energético e orienta o uso das diferentes frações em processos termoquímicos.

Palavras-chave: Bambu; Bioenergia; Qualidade energética.

Effect of Biomass Variability in *Bambusa vulgaris* on Proximate Analysis and Energy Potential

Abstract: The biomass variability of *Bambusa vulgaris* Schrad. ex J.C.Wendl. influences its proximate chemical composition and energy potential, supporting the optimization of its energy utilization. This study aimed to determine the contents of volatile matter, ash, and fixed carbon in the longitudinal regions and vegetative parts of the culm. Three culms were analyzed according to ASTM D1762-84, and the data were subjected to analysis of variance (ANOVA) followed by Tukey's test (5%). Volatile matter remained uniform throughout the culm, whereas ash and fixed carbon contents differed among the evaluated regions. The basal region was the most suitable for carbonization due to its higher fixed carbon content. Among the vegetative parts, the culm and branches exhibited superior energy quality, whereas the leaves showed higher ash content and lower fixed carbon content, indicating lower combustion efficiency. It was concluded that biomass variability influences energy potential and supports the appropriate use of different fractions in thermochemical conversion processes.

Keywords: Bamboo; Bioenergy; Energy quality.

1. Introdução

Os bambus constituem um grupo de gramíneas perenes de colmos lenhosos, amplamente distribuídas em diferentes regiões do mundo, compreendendo mais de 1.300 espécies conhecidas. Dentre elas, *Bambusa vulgaris Schrad. ex J.C.Wendl* destaca-se pelo expressivo potencial técnico e econômico, atribuído à sua elevada capacidade de adaptação, rápido crescimento, alta produtividade (Pereira e Beraldo, 2008; Mendes et al., 2010; Neto et al., 2010; Kumar et al., 2022) e às características morfofisiológicas que favorecem a implantação e o desenvolvimento de plantios comerciais (Brondani et al., 2017).

Embora o Brasil apresente condições climáticas favoráveis e disponha de extensas áreas aptas ao cultivo de diferentes espécies de bambu, a exploração econômica dessa cultura ainda permanece limitada. Esse cenário é atribuído, principalmente, à falta de cadeia produtiva especializada na utilização do bambu como matéria-prima em escala (Drumond e Wiedman, 2017). Em contrapartida, o bambu configura-se como uma fonte renovável de biomassa com elevado potencial para substituir a madeira em diversas aplicações, incluindo a fabricação de painéis e compósitos poliméricos (Silva et al., 2021), o emprego na construção civil (Barbosa et al., 2020; Camargo e Pereira, 2021; Nunes et al., 2021a), a produção de polpa celulósica (Borges et al., 2018; Nunes et al., 2021b) e a geração de energia (Brand et al., 2020).

O Brasil dispõe de aproximadamente 1,5 milhão de hectares ocupados por bambus, destacando-se o estado do Acre como maior produtor nacional (Anunciato el al, 2020). Os bambus realçam-se pelo rápido crescimento, elevada capacidade de produção de biomassa e ampla adaptabilidade a diferentes condições edafoclimáticas, características que o tornam uma matéria-prima promissora para aplicações industriais e energéticas. Estudos recentes conduzidos no Brasil evidenciam o bom desempenho produtivo de diferentes espécies de bambu em condições de cultivo nacionais (Novaes et al., 2026), enquanto pesquisas com *Bambusa vulgaris* demonstram sua elevada capacidade de acúmulo de biomassa e sequestro de carbono (Ojo et al., 2023; Dombeu Kaam et al., 2023), reforçando o potencial dessa espécie como fonte renovável para a produção sustentável de bioenergia

A qualidade da biomassa proveniente dos colmos tem grande influência nos produtos fabricados. Nesse contexto, o objetivo deste trabalho foi analisar a composição química imediata do colmo de *Bambusa vulgaris* no sentido longitudinal, ou no sentido base-topo (base, meio e topo), e entre os componentes da parte aérea da planta (colmo, galho e folha) com vista no potencial de uso da biomassa in natura para fins energéticos.

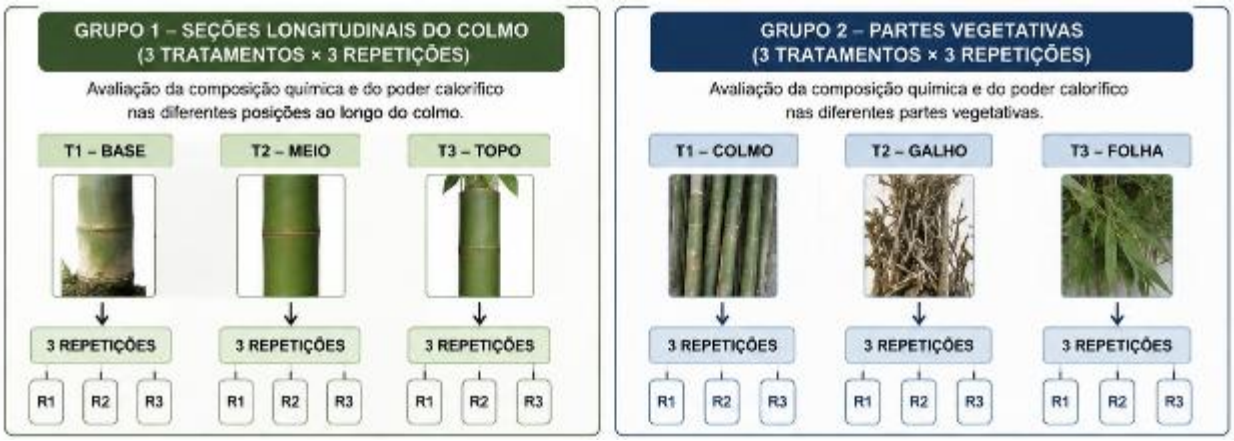
2. Material e métodos

O estudo foi realizado no Laboratório de Painéis de Energia da Madeira (LAPEM/DEF) da Universidade Federal de Viçosa (UFV).

Foram utilizados 3 colmos de bambu da espécie *Bambusa vulgaris*, com aproximadamente 5 anos de idade, coletados no Laboratório de Pesquisas em Silvicultura (LAPES/DEF) do Departamento de Engenharia Florestal (DEF), em Viçosa, Minas Gerais.

A amostragem longitudinal foi realizada por meio do seccionamento dos colmos em três segmentos de 1 m de comprimento, representando as porções basal, mediana e apical. Além dessas amostras, foi preparada uma amostra composta, obtida pela homogeneização das três regiões do colmo. Para a caracterização das partes vegetativas, foram coletadas amostras homogêneas de galhos e folhas provenientes das regiões basal, mediana e apical dos feixes de *Bambusa vulgaris*, as quais foram homogeneizadas para constituir três repetições representativas de cada tratamento, em conjunto com a composta anteriormente citada.

Figura 1– Delineamento experimental adotado em dois grupos independentes de fatorial 3x3



para análise longitudinal e vegetativa de *B. vulgaris*

Para a determinação da composição química imediata das amostras de bambu, em feixes, foram transformados em serragem utilizando um moinho de facas tipo Willey, seguindo a norma TAPPI 257 om-85 (TAPPI, 2001), e coletada a fração retida entre as peneiras de 40 *mesh* e 60 *mesh*. A seleção da fração retida entre as peneiras de 40 e 60 *mesh* foi adotada por proporcionar maior uniformidade das partículas, favorecendo a repetibilidade das análises de umidade, materiais voláteis, teor de cinzas e carbono fixo. A redução da variabilidade granulométrica é fundamental em análises de biomassa lignocelulósica, pois diferenças no tamanho das partículas podem influenciar a transferência de calor e a eficiência dos processos termoquímicos

Foram determinados na composição química imediata os teores de materiais voláteis (MV), cinzas (CZ) e carbono fixo (CF), de acordo com a norma ASTM D1762-84 (ASTM, 2013).

O experimento foi conduzido em delineamento inteiramente casualizado (DIC), sendo dividido em dois grupos experimentais independentes, cada um composto por três tratamentos e três repetições. O primeiro grupo correspondeu às seções longitudinais do colmo (base, meio e topo), enquanto o segundo grupo compreendeu as partes vegetativas (colmo, galho e folha). Os dados obtidos foram submetidos à análise de variância (ANOVA) e, quando verificado efeito significativo dos tratamentos ($p \leq 0,05$), as médias foram comparadas pelo teste de Tukey a 95% de probabilidade.

3. Resultados e discussão

Na tabela 1, são apresentados os valores médios de das seções longitudinais dos feixes de *Bambusa vulgaris*.

Tabela 1 – Média dos valores obtidos na análise longitudinal dos colmos de *Bambusa vulgaris* em função de V(%), C(%) e CF (%) da composição química imediata

Região do Colmo	V(%)	C(%)	CF(%)
BASE	79,722 a	1,405 b	18,873 a
MEIO	81,101 a	1,497 ab	17,402 b
TOPO	80,077 a	1,953 a	17,970 ab

A porcentagem média de voláteis dos colmos de *B. vulgaris* não variou estatisticamente entre as repetições, apontando uma uniformidade no comportamento de combustão da biomassa *in natura*, sugerindo comportamento homogêneo quanto à facilidade de ignição e à reatividade térmica ao longo do colmo. Já o teor de cinzas e carbono fixo apresentaram valores estatisticamente distintos a um nivel de significancia de 5%, havendo uma diferença de concentração na seção topo/base e base/meio, respectivamente. Os resultados indicam um aumento do teor de cinzas e uma redução do teor de carbono fixo no sentido base–topo do colmo. O aumento do teor de cinzas pode estar relacionado à maior concentração de constituintes minerais nas porções apicais, comportamento também observado por Protásio (2017), que relata uma tendência de maior acúmulo de minerais nas

regiões superiores da biomassa em função da redistribuição e do transporte de nutrientes ao longo do desenvolvimento vegetal.

Esses resultados apontam que a porção basal do colmo é a mais indicada para aplicações energéticas, como produção de carvão vegetal, devido ao maior teor de carbono fixo e ao menor conteúdo de cinzas, características que favorecem maior rendimento energético e menor geração de resíduos. Entretanto, em um processamento voltando à geração de energia, preconiza-se vantagem do uso do topo do colmo por apresentar valor elevado de densidade no sentido longitudinal do feixe (Protásio, 2017).

Na Tabela 2, são apresentados os valores de V, C e CF das partes vegetativas dos colmos analisados.

Tabela 2 – Valores médios de V(%), C(%) e CF(%) das partes vegetativas de *B. vulgaris* obtidos em função da composição química imediata

PARTE PLANTA	**DAV(%)**	**C(%)**	**CF(%)**
COLMO	80,012 a	1,686 c	18,302 a
GALHO	77,285 b	3,655 b	19,060 a
FOLHA	73,483 c	9,977 a	16,540 b

A quantidade de voláteis, cinzas e carbono fixo variaram estatisticamente, estabelecendo uma diferença significativa entre as partes vegetativas dos colmos em todas os componentes avaliados. O colmo apresentou o maior teor de V, os galhos valores intermediários, e as folhas menores valores. Esses resultados apontam maior potencial de ignição na porção do colmo comparada com as demais partes vegetativas. Isto, atrelado à um baixo teor de C, reforça o elevado potencial energético do colmo em relação às demais partes da planta (Yang et al., 2023). Ao se analisar a quantidade de CF, nota-se um destaque para a parte dos galhos e do colmo com maiores valores, que não se diferem estatisticamente, e a folha com o menor valor.

Tendo em vista o valor de C, inferindo a quantidade de minerais presentes em cada seção analisada, há um destaque nítido na porção folhosa, que apresenta um valor de quase 3 e 9 vezes maior em relação ao galho e colmo, respectivamente. Isso ocorre devido à grande quantidade de sílica, potássio, cálcio e magnésio concentradas nas folhas (Liese & Köhl, 2015). Ao se utilizar os feixes de *B. vulgaris* com todas as áreas da planta para geração de energia, as folhas são

responsáveis pela maior porcentagem das cinzas durante a combustão, diminuindo a qualidade energética e a energia útil, aumentado os resíduos gerados e favorecendo a incrustação e aderência das cinzas nas paredes das caldeiras (Zhang et al., 2024).

De modo geral, os resultados evidenciam que a biomassa de *Bambusa vulgaris* apresenta variabilidade na composição química imediata tanto ao longo do colmo quanto entre suas diferentes partes vegetativas, influenciando diretamente seu potencial energético. Enquanto a variação longitudinal foi mais pronunciada para os teores de C e CF, sugerindo diferenças no desempenho para carbonização e geração de energia, as partes vegetativas apresentaram contrastes mais expressivos em todos os parâmetros avaliados, destacando o colmo como a fração de maior potencial para uso. Dessa forma, a caracterização da composição química imediata permitiu identificar as frações da biomassa mais adequadas para diferentes aplicações termoquímicas, e contribuindo para a valorização dessa espécie como fonte renovável de biomassa

4. Conclusões

A região basal do colmo apresentou maior aptidão para processos de carbonização, enquanto o colmo se destacou pela combinação de baixos teores de C e elevados teores de CF, indicando a possibilidade de uma maior qualidade como combustível sólido.

5. Agradecimentos

Agradeço ao LAPEM, ao DEF à professora Angélica de Cássia Carneiro, ao meu orientador doutorando Ricardo Pena, e ao meu colega de pesquisa Saulo Affonso Hygino.

Este trabalho foi viabilizado, em parte, pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) - Processo APQ-05311-24; APQ-04599-25 e pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) - Processo n° 444395/2024-5.

6. Referências bibliográficas

Alex-Oke, T., Bamisile, O., Cai, D., Adun, H., Ukwuoma, C. C., Tenebe, S. A., & Huang, Q. (2025). Renewable energy market in Africa: Opportunities, progress, challenges, and future prospects. Energy Strategy Reviews, 59, 101700. https://doi.org/10.1016/j.esr.2025.101700

Anunciato, V. M., Dias, R. C., Bianchi, L., Perissato, S. M., & Gomes, D. M. (2020, 10 de janeiro). *Bambu: Versatilidade para quem sabe lucrar*. Revista Campo & Negócios. https://campoenegocios.com/bambu-versatilidade-para-quem-sabe-lucrar/

ASTM International. (2013). ASTM D1762-84: Standard test method for chemical analysis of wood charcoal. ASTM International.

Balduino Junior, A. L. (2015). Potencial energético de colmos de bambu para uso industrial e doméstico no Sul do Brasil (Dissertação de mestrado). Universidade do Estado de Santa Catarina.

Brand, M. A., Gaa, A. Z. N., Balduino Junior, A. L., Cunha, A. B., & Rios, P. D. A. (2020). Potencial do uso de quatro espécies de bambu para a produção de carvão vegetal para uso doméstico. Ciência Florestal, 30(1), 60–71. https://doi.org/10.5902/1980509827348

Brito, J. O., Tomazello Filho, M., & Salgado, A. L. B. (1987). Produção e caracterização do carvão vegetal de espécies e variedades de bambu. IPEF, (36), 13–17.

Brondani, G. E., Oliveira, L. S., Furlan, F. C., & Ribeiro, A. S. (2017). Estabelecimento in vitro de Bambusa vulgaris Schrad. ex J. C. Wendl. e Dendrocalamus asper (Schult. & Schult. F.) Backer ex K. Heyne. Em P. M. Drumond & G. Wiedman (Eds.), Bambus no Brasil: Da biologia à tecnologia (pp. 86–102). Instituto Ciência Hoje.

Deutsches Institut für Normung. (2011). EN 15296: Solid biofuels—Conversion of analytical results from one basis to another. DIN.

Drumond, P. M., & Wiedman, G. (Eds.). (2017). Bambus no Brasil: da biologia à tecnologia. Instituto Ciência Hoje.

Indústria Brasileira de Árvores. (2025). Relatório anual 2025. https://iba.org/wp-content/uploads/2025/10/IBA_report_ENG.pdf

Kumar, P. S., Shukla, G., Nath, A. J., & Chakravarty, S. (2022). Soil properties, litter dynamics and biomass carbon storage in three bamboo species of sub-Himalayan region of eastern India. Water, Air, & Soil Pollution, 233(1), 12. https://doi.org/10.1007/s11270-021-05477-6

Liese, W., & Köhl, M. (2015). Bamboo: The plant and its uses. Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-14133-6

Lou, Z., Zheng, Z., Yan, N., Jiang, X., Zhang, X., Chen, S., Xu, R., Liu, C., & Xu, L. (2023). Modification and application of bamboo-based materials: A review – Part II. Forests, 14(11), 2266. https://doi.org/10.3390/f14112266

Nath, A. J., Lal, R., & Das, A. K. (2015). Managing woody bamboos for carbon farming and carbon trading. Global Ecology and Conservation, 3, 654–663. https://doi.org/10.1016/j.gecco.2015.03.002

Norgate, T., Haque, N., Somerville, M., & Jahanshahi, S. (2012). Biomass as a source of renewable carbon for iron and steelmaking. ISIJ International, 52(8), 1472–1481. https://doi.org/10.2355/isijinternational.52.1472

Novaes, A. B., Almeida, R. P. B., Campos, K. N., Silva, L. R. L., Araujo, A. R., Andrade, B. A., Souza, T. V. S., & Dias, A. P. (2026). Potencial produtivo de espécies de bambu na região do Planalto de Conquista na Bahia. Revista DELOS, 19(81), e9599. https://doi.org/10.55905/rdelosv19.n81-073

Nunes, L. J. R., Matias, J. C. O., & Catalão, J. P. S. (2016). Biomass combustion systems: A review on the physical and chemical properties of the ashes. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 53, 235–242. https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.08.053

Ojo, A. R., Sadiku, N. A., & Haastrup, N. O. (2023). Evaluation of the biomass, carbon sequestered and microbiota in a naturally-growing Bambusa vulgaris Schrad. ex J.C. Wendl stand. Advances in Bamboo Science, 4, 100029. https://doi.org/10.1016/j.bamboo.2023.100029

Pereira, M. A. R., & Beraldo, A. L. (2008). Bambu de corpo e alma. Canal 6 Editora.

Rezende, M. E. (2006). Produção de carvão vegetal: Importância do conhecimento fundamental. Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear (CDTN).

Rosillo-Calle, F., Bezzon, G., Bajay, S. V., & Rothman, H. (2005). Produção e uso industriais do carvão vegetal. Em F. Rosillo-Calle, S. V. Bajay, & H. Rothman, Uso da biomassa para a produção de energia na indústria brasileira. UNICAMP.

Santos, D. R. S., Sette Junior, C. R., Silva, M. F., Yamaji, F. M., & Almeida, R. A. (2016). Potencial de espécies de bambu como fonte energética. Scientia Forestalis, 44(111), 751–758. https://doi.org/10.18671/scifor.v44n111.21

Silva, L. F., Arantes, M. D. C., Marcelino, R. A. G., Mendes, A. F. N. C., Ataíde, G. D. M., Castro, R. V. O., et al. (2024). Kiln-furnace system: Validation of a technology for producing charcoal with less environmental impact in Brazil. Forests, 15(4), 645. https://doi.org/10.3390/f15040645

Technical Association of the Pulp and Paper Industry. (2001). T 257 om-85: Sampling and preparing wood for analysis. TAPPI Press.

Yang, G., Purusatama, B. D., Kim, J. H., Prasetia, D., Savero, A. M., & Kim, N. H. (2023). Proximate analysis of bamboo culm and wood carbonized at low temperatures: A comparative study. BioResources, 18(1), 1577–1589. https://doi.org/10.15376/biores.18.1.1577-1589

Yang, G., Purusatama, B. D., Kim, J. H., Suri, I. F., Prasetia, D., Hidayat, W., et al. (2022). Physical and chemical characteristics of the bamboo culm and wood carbonized at low temperature. BioResources, 17(3), 4837–4855. https://doi.org/10.15376/biores.17.3.4837-4855

Efeitos dos parâmetros de pirólise de *pellets* de palha de café na produção de biocarvão para produção de energia

Igor Barbosa Silva[1]; Danielly Moreira Gomes[1]; Angelica de Cassia Oliveira Carneiro [1]; Hagnes Belta Lelles Barboza[1]

[1] Universidade Federal de Viçosa

Resumo: A palha de café, resíduo abundante no processamento do grão no Brasil, apresenta elevado potencial para conversão energética via pirólise. Este trabalho avaliou os efeitos da temperatura de pirólise sobre as propriedades energéticas de biocarvão produzido a partir de pellets de palha de *Coffea arabica*. Foram determinados os teores de materiais voláteis, cinzas e carbono fixo, além da densidade a granel, do poder calorífico superior e da densidade energética da biomassa e dos biocarvões. Os resultados mostraram redução do teor de materiais voláteis e da densidade a granel com o aumento da temperatura, acompanhada de aumento do carbono fixo e das cinzas. O poder calorífico superior manteve-se estável entre 450 e 550 °C, com leve queda a 650 °C, enquanto a densidade energética diminuiu progressivamente com a temperatura. Os resultados indicaram que a temperatura de 450 °C proporcionou o melhor equilíbrio entre qualidade energética e densidade do biocarvão peletizado de resíduos de café.
Palavras-chave:.*Coffea arabica*; Biomassa lignocelulósica; Carbono fixo; Poder calorífico; Densidade energética.

Effects of coffee husk pyrolysis parameters on biocarvão production for energy generation

Abstract: Coffee husk, an abundant residue from bean processing in Brazil, shows high potential for energy conversion via pyrolysis. This study evaluated the effects of pyrolysis temperature on the energy properties of biochar produced from *Coffea arabica* husk pellets. The contents of volatile matter, ash, and fixed carbon were determined, as well as the bulk density, higher heating value, and energy density of the biomass and biochars. The results showed a reduction in volatile matter content and bulk density as temperature increased, accompanied by an increase in fixed carbon and ash. The higher heating value remained stable between 450 and 550 °C, with a slight drop at 650 °C, while energy density decreased progressively with temperature. The results indicate that a temperature of 450 °C provides the best balance between energy quality and density for pelletized biochar derived from coffee residues.

Keywords: *Coffea arabica*; Lignocellulosic biomass; Fixed carbon; Higher heating value; Energy density.

1. Introdução

A busca por fontes de energia renováveis e sustentáveis tem impulsionado o desenvolvimento de tecnologias voltadas ao aproveitamento de resíduos agroindustriais para a

produção de biocombustíveis sólidos, tema tratado em revisões recentes sobre a conversão sustentável de subprodutos do café em recursos energéticos (BALUSHI et al., 2025). O Brasil se mantém como o maior produtor mundial de café, gerando volumes expressivos de resíduos lignocelulósicos ao longo do processamento (CONAB, 2025). Entre esses resíduos, a palha de café destaca-se pelo elevado potencial de aproveitamento, devido aos expressivos números gerados pela cafeicultura brasileira (CONSÓRCIO PESQUISA CAFÉ, 2024).

A conversão termoquímica da biomassa por meio da pirólise é uma alternativa para agregar valor aos resíduos de café, transformando-os em biocarvão com diferentes aplicações (TANGMANKONGWORAKOON, 2019). A pirólise consiste na decomposição térmica da biomassa sob atmosfera limitada de oxigênio, processo que já vem sendo caracterizado para a casca de café por meio da análise termogravimétrica (AMEZCUA-ALLIERI et al., 2022). As características e o rendimento do biocarvão são fortemente influenciados pelos parâmetros da pirólise, sobretudo pela temperatura final do processo, conforme evidenciado para biocarvão produzido a partir de borra de café (KIM et al., 2025).

O aumento da temperatura de pirólise intensifica a desvolatilização da biomassa e concentra o carbono fixo do biocarvão (SHARMA et al., 2025). Esse comportamento é acompanhado por perdas de massa e aumento da porosidade do material carbonizado (CHEN et al., 2021). A palha de café apresenta composição predominantemente lignocelulósica, característica que favorece sua conversão em biocarvão com propriedades adequadas ao uso energético (MORGAN, et al 2025).

A peletização prévia da biomassa é apontada como estratégia complementar eficaz para aumentar a densidade energética do material antes da conversão térmica, favorecendo sua logística de transporte e armazenamento (CARNEIRO, et al 2025). Nesse sentido, estudos com *pellets* de resíduos de café e madeira de eucalipto demonstram ganhos na densidade energética do material pré-tratado (DE SOUZA, et al 2020).

Diante disso, o estudo dos efeitos dos parâmetros de pirólise sobre as propriedades do biocarvão produzido a partir da palha de café peletizada é fundamental para otimizar seu rendimento e sua qualidade energética, contribuindo para o aproveitamento sustentável de resíduos agrícolas e para a diversificação da matriz energética baseada em fontes renováveis. Assim, este trabalho teve como objetivo avaliar os efeitos da temperatura de pirólise sobre as propriedades energéticas de biocarvão produzido a partir de *pellets* de palha de café, visando seu aproveitamento como fonte de energia renovável.

2. Material e métodos

2.1. Obtenção e caracterização da biomassa

O estudo foi realizado no Laboratório de Painéis e Energia da Madeira (LAPEM), pertencente ao Departamento de Engenharia Florestal da Universidade Federal de Viçosa (DEF/UFV), localizado no município de Viçosa, Minas Gerais. Os resíduos de palha de *Coffea arabica* utilizados neste estudo foram doados por uma empresa privada localizada no município de Lajinha, Minas Gerais.

Inicialmente, a biomassa foi submetida à secagem em estufa a 103 ± 2 °C, com o objetivo de reduzir o teor de umidade, minimizar o risco de deterioração microbiológica durante o armazenamento e adequar o material às etapas subsequentes de caracterização e processamento.

Posteriormente, a biomassa residual da indústria de processamento de café foi caracterizada quanto às suas propriedades físicas, químicas e energéticas. A densidade a granel foi determinada conforme a norma DIN EN 15103 (DIN, 2010). A composição química imediata foi determinada de acordo com a norma ASTM D1762-84 (ASTM, 2013), sendo quantificados, em base seca, os teores de materiais voláteis, cinzas e carbono fixo.

O poder calorífico superior (PCS) será mensurado em bomba calorimétrica modelo IKA 300, de acordo com os critérios da norma ASTM D5865-19 (ASTM, 2019).

A densidade energética foi obtida pelo produto entre a densidade a granel (kg m^{-3}) e o poder calorífico superior (MJ kg^{-1}), sendo os resultados expressos em MJ m^{-3}.

2.2. Produção dos pellets

Os *pellets* foram produzidos a partir da biomassa residual de palha de *C. arabica*, utilizando uma mistura heterogênea das frações granulométricas inferiores a 5,3 mm, com teor de umidade médio de aproximadamente 10% em base seca. Para cada tratamento foram produzidos cerca de 500 g de *pellets*, totalizando aproximadamente 8 kg de biomassa peletizada.

A peletização foi realizada em uma prensa peletizadora laboratorial de matriz circular horizontal (Amandus Kahl, modelo 14-175), conforme ilustrado na Figura 1. O sistema de peletização era composto por motor elétrico, controlador de velocidade e rosca sem fim para alimentação contínua da biomassa na matriz.

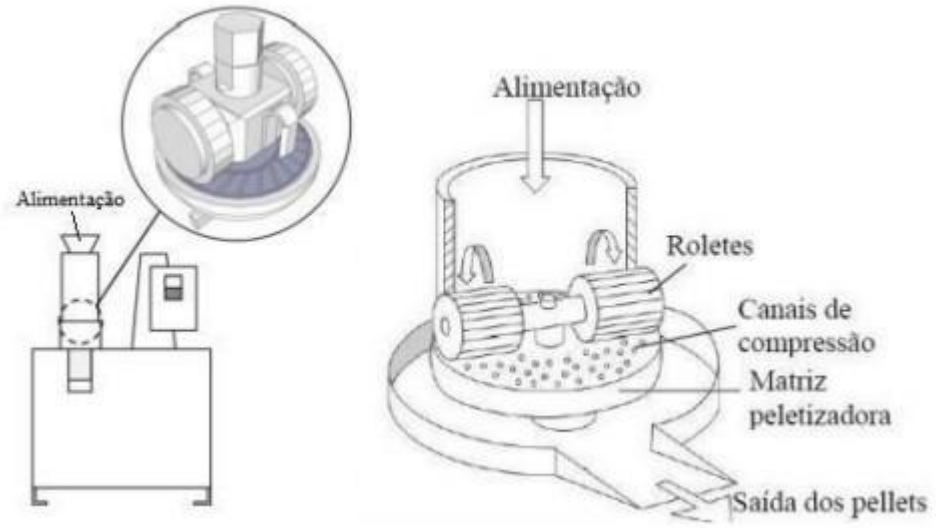


Figura 1- Matriz peletizadora esquematizada utilizada na produção dos pellets (Magalhães, 2016).

Após a produção, os *pellets* foram acondicionados em recipientes apropriados e armazenados em ambiente seco até sua utilização na etapa de pirólise.

2.3. Produção e caracterização do biocarvão

A produção do biocarvão foi realizada em uma mufla elétrica de laboratório (GP Científica), acoplada a um sistema de condensação dos gases gerados durante a pirólise. Para cada tratamento, aproximadamente 500 g de biomassa peletizada de palha de *C. arabica* foram acondicionados em um recipiente metálico e inseridos na mufla. O processo foi conduzido sob atmosfera com disponibilidade limitada de oxigênio, condição necessária para a ocorrência da pirólise.

Os tratamentos foram realizados em três temperaturas finais de pirólise (450, 550 e 650 °C), utilizando tempo de residência fixo de 120 minutos para todas as condições experimentais. O controle da temperatura e do tempo de residência foi realizado por meio do painel digital da mufla. Ao término de cada ciclo de pirólise, o recipiente contendo o biocarvão foi retirado da mufla e mantido em resfriamento até atingir a temperatura ambiente, sendo posteriormente armazenado em recipientes hermeticamente fechados para evitar a absorção de umidade.

Após a produção, os biocarvões obtidos foram submetidos às mesmas análises físicas, químicas e energéticas realizadas para a biomassa, permitindo a comparação das propriedades do material antes e após o processo de pirólise.

3. Resultados e discussão

O teor de materiais voláteis da biomassa foi de 77,05%

Tabela 1-Resultados das propriedades da biomassa residual de café

Propriedade	Unidade	Biomassa residual de Café
Densidade a Granel	kg m^{-3}	231,51
Materiais Voláteis	%	77,05
Cinzas	%	5,77
Carbono Fixo	%	17,17
Poder calorífico superior	(MJ/kg)	18,50

Valor característico de resíduos lignocelulósicos ainda não submetidos a processos de conversão térmica, refletindo a predominância de celulose, hemicelulose e demais compostos orgânicos passíveis de decomposição térmica na palha de café (NGUYEN et al., 2023). O teor de cinzas obtido foi de 5,77%, resultado compatível com a fração inorgânica normalmente associada a resíduos do processamento do café, parâmetro relevante para a avaliação do potencial energético desse tipo de biomassa (RESENDE, et al 2021).

O carbono fixo da biomassa foi de 17,17%, valor relativamente baixo se comparado ao que esperado após a carbonização, condizente com a natureza ainda não pirolisada do material e com a composição típica de pellets produzidos a partir de resíduos de café (SETTER, et al 2020a).

A densidade a granel da biomassa peletizada foi de 231,51 kg/m^3, propriedade diretamente relacionada ao processo de compactação, o qual contribui para o aumento da densidade do material e para a melhoria de sua logística de transporte e armazenamento (CARNEIRO, et al 2025).

O poder calorífico superior da biomassa foi de 18,50 MJ/kg, valor consistente com o potencial energético atribuído aos resíduos de café como matéria-prima para geração de energia, reforçando sua viabilidade como fonte alternativa e renovável (FREITAS, 2022).

Tabela 2-Resultados das propriedades do biocarvão derivado dos resíduos de café

Propriedade	Unidade	450 °C	550 °C	650 °C
Materiais voláteis	kg m^{-3}	24,44	18,24	15,03

Cinzas	%	12,87	13,97	15,19
Carbono fixo	%	62,69	67,79	69,78
Densidade a granel	%	87,06	77,85	64,01
Poder calorífico superior	MJ/kg	25,87	25,85	25,18
Densidade energética	MJ/m³	2252,24	2012,42	1611,77

O teor de materiais voláteis do biocarvão reduziu-se de forma expressiva com o aumento da temperatura de pirólise, passando de 24,44% (450 °C) para 18,24% (550 °C) e 15,03% (650 °C), comportamento associado à intensificação das reações de desvolatilização da biomassa em temperaturas mais elevadas, conforme observado para biocarvão produzido a partir de borra de café (KIM, et al 2025).

O teor de cinzas apresentou aumento progressivo com a temperatura, de 12,87% a 450 °C para 15,19% a 650 °C, resultado da concentração relativa da fração inorgânica do material à medida que os compostos orgânicos são volatilizados durante o processo (SHARMA, et al 2025). O carbono fixo aumentou de 62,69% (450 °C) para 69,78% (650 °C), tendência esperada durante a carbonização, na qual o incremento da temperatura favorece a aromatização e a estabilização da estrutura carbônica remanescente no biocarvão (TSAI, et al 2012).

A densidade a granel do biocarvão diminuiu de 87,06 kg/m³ (450 °C) para 64,01 kg/m³ (650 °C), efeito atribuído à maior perda de massa e ao desenvolvimento de porosidade nas partículas carbonizadas em temperaturas mais severas, comportamento consistente com o aumento do volume de poros (CHEN, et al 2021).

O poder calorífico superior do biocarvão manteve-se relativamente estável entre 450 e 550 °C (25,87 e 25,85 MJ/kg), com leve redução a 650 °C (25,18 MJ/kg), indicando que, a partir de determinada temperatura, o ganho energético proporcionado pela concentração de carbono fixo deixa de compensar as perdas de massa do material, padrão também reportado para biocarvão obtido de resíduos de café (TANGMANKONGWORAKOON, 2019).

A densidade energética do biocarvão apresentou redução contínua com o aumento da temperatura, de 2252,24 MJ/m³ (450 °C) para 1611,77 MJ/m³ (650 °C), evidenciando que a perda de densidade a granel se sobrepõe ao ganho no poder calorífico, resultado que reforça a relevância da temperatura de pirólise na definição das condições mais favoráveis para o aproveitamento energético do biocarvão peletizado de resíduos de café (SETTER, et al 2020b).

4. Conclusões

Os resultados demonstraram que a temperatura de pirólise exerce influência determinante sobre as propriedades energéticas do biocarvão produzido a partir de *pellets* de palha de café. O aumento da temperatura favoreceu a concentração de carbono fixo e a estabilidade química do material, porém acarretou perdas expressivas de densidade a granel e, consequentemente, de densidade energética. Embora o poder calorífico superior tenha se mantido relativamente estável entre 450 e 550 °C, a temperatura de 450 °C apresentou o melhor desempenho global, conciliando qualidade energética, mássica e volumétrica. Esses resultados reforçam o potencial da palha de café peletizada como matéria-prima para produção de biocarvão energético e evidenciam a importância da seleção adequada da temperatura de pirólise para otimizar o aproveitamento sustentável desse resíduo agroindustrial.

5. Agradecimentos

À Universidade Federal de Viçosa (UFV), especialmente ao Departamento de Engenharia Florestal e ao Laboratório de Painéis e Energia da Madeira (LAPEM). Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) (Processo: 444395/2024-5), à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) (Processo: APQ-05311-24) e à EMBRAPII. E por fim, ao Instituto Superior de Agronomia da Universidade de Lisboa pela parceria técnica estabelecida.

6. Referências bibliográficas

ALGHAMDI, Abdulaziz G.; ALOMRAN, Abdulrasoul; IBRAHIM, Hesham M.; ALKHASHA, Arafat; MAJRASHI, Mosaed A. *Spent coffee waste-derived biochar improves physical properties, water retention, and maize (Zea mays L.) growth in sandy soil*. **Scientific Reports**, v. 14, n. 1, p. 1–13, 2024. DOI: 10.1038/s41598-024-70504-5.

AL BALUSHI, Jawaher; AL SAADI, Shamail; AHANCHI, Mitra; ATTAR, Manar; JAFARY, Tahereh; AL HINAI, Muna; YENENEH, Anteneh Mesfin; BASHA, J. Sadhik. *A Comprehensive Review on Sustainable Conversion of Spent Coffee Grounds into Energy Resources and Environmental Applications*. p. 1–36, 2025.

AMEZCUA-ALLIERI, M. A.; ABURTO, J.; TORRES-GARCÍA, E. *Phenomenological thermokinetic analysis of coffee husk pyrolysis: a study case*. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, v. 147, n. 21, p. 12187–12199, 2022.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **ASTM D5865-19**: *Standard Test Method for Gross Calorific Value of Coal and Coke*. West Conshohocken: ASTM *International*, 2019.

CARNEIRO, A. DE C. O. et al. *Sustainable production of coffee husk pellets: Applying circular economy in waste management and renewable energy production*. **Resources**, v. 14, n. 2, p. 26, 2025.

CHEN, Wei-hsin; DU, Jyun-ting; LEE, Kuan-ting; CHYUAN, Hwai; PARK, Young-kwon; HUANG, Chien-chang. *Pore volume upgrade of biochar from spent coffee grounds by sodium bicarbonate during torrefaction*. **Chemosphere**, v. 275, p. 129999, 2021. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2021.129999.

CONAB. *Acompanhamento da Safra Brasileira*. **Boletim da Safra 2025**, v. 12, n. Décimo primeiro levantamento, p. 60, 2025. Disponível em: https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/.

CONSÓRCIO PESQUISA CAFÉ. *Faturamento do café no Brasil para o ano de 2024*. Disponível em: http://www.consorciopesquisacafe.com.br/index.php/imprensa/noticias/123520240716174831. Acesso em: 10 out. 2024.

DE SOUZA, H. J. P. L. et al. *Pelletization of eucalyptus wood and coffee growing wastes: Strategies for biomass valorization and sustainable bioenergy production*. **Renewable Energy**, v. 149, p. 128–140, 2020.

FREITAS, C. P. M. *O potencial do resíduo do café como fonte de geração de energia*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2022.

KIM, Oanh Thi; TRUONG, Toan Quoc; THI, Luu; PHAN, Kim; NGUYEN, Din Van; THU, Hong Thi. *Effect of pyrolysis temperature on the physicochemical properties of biochar derived from spent coffee grounds*. v. 14, n. 2, p. 54–64, 2025. DOI: 10.18488/13.v14i2.4452.

MORGAN, Hervan Marion et al. *Preparation of Plant Carbon from Coffee Husk: Effect of Carbonization Conditions on Product Properties*. p. 0–13, 2025. DOI: 10.20944/preprints202505.0118.v1.

NGUYEN, Dung Van; DUONG, Cham Thi Thu; VU, Chau Ngoc Minh; NGUYEN, Hung Minh; PHAM, Tuyet Thi; TRAN-THUY, Tuyet Mai; NGUYEN, Long Quang. *Data on chemical composition of coffee husks and lignin microparticles as their extracted product*. **Data in Brief**, v. 51, p. 109781, 2023. DOI: 10.1016/j.dib.2023.109781.

RESENDE, D. R. et al. *Potencial energético dos resíduos do processamento de café combinados com finos de carvão vegetal*. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 15, p. e326101523012, 2021.

SETTER, C.; BORGES, F. A.; CARDOSO, C. R.; MENDES, R. F.; OLIVEIRA, T. J. P. *Energy quality of pellets produced from coffee residue: Characterization of the products obtained via slow pyrolysis*. **Industrial Crops & Products**, v. 154, p. 112731, 2020a. DOI: 10.1016/j.indcrop.2020.112731.

SETTER, C.; SILVA, F. T. M.; ASSIS, M. R.; ATAÍDE, C. H.; TRUGILHO, P. F.; OLIVEIRA, T. J. P. *Slow pyrolysis of coffee husk briquettes: Characterization of the solid and liquid fractions*. **Fuel**, v. 261, 2020b. DOI: 10.1016/j.fuel.2019.116420.

SHARMA, Prachi; JOHARI, Reshu; THAGAN, Suresh Kumar; BHOWMIK, Sutapa; DOHRE, Rajeev Kumar. *Characteristics Evaluation of Torrefaction Effects on Spent Coffee Ground Derived Biochar*. v. 11, n. 23, p. 7887–7897, 2025.

TANGMANKONGWORAKOON, Naruephat. *An approach to produce biochar from coffee residue for fuel and soil amendment purpose*. **International Journal of Recycling of Organic Waste in Agriculture**, v. 8, n. s1, p. 37–44, 2019. DOI: 10.1007/s40093-019-0267-5.

TSAI, Wen Tien; LIU, Sii Chew; HSIEH, Ching Hsiang. *Preparation and fuel properties of biochars from the pyrolysis of exhausted coffee residue*. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v. 93, p. 63–67, 2012. DOI: 10.1016/J.JAAP.2011.09.010.

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Emissões de Gases Poluentes na Combustão de Diferentes Biomassas Florestais como Fonte de Energia

Pietra Tessele de Paula[1]; Jorge Antônio de Farias[1]; Daniele Bernardy[1]; Ana Elisa Souza Iop[1]

[1] Universidade Federal de Santa Maria

Resumo: A biomassa florestal é uma importante fonte renovável de energia térmica. Entretanto, sua combustão pode gerar gases poluentes, tornando necessária a avaliação de diferentes combustíveis. Este estudo avaliou as concentrações de CO_2, CO, NOx e CxHy emitidas pela combustão de três biomassas florestais: lenha de *Eucalyptus saligna*, clone 1528 e cavacos de *Eucalyptus grandis*. As concentrações dos gases foram medidas em Unidade de Cura Convencional. Os dados foram comparados pelo teste de Kruskal-Wallis, a 5% de significância. Os cavacos apresentaram menores concentrações de CO (1.878,16 ± 760,37 mg/m³) e CxHy (205,52 ± 172,39 mg/m³). O clone apresentou maiores concentrações de CO (3.195,33 ± 2.205,37 mg/m³) e CxHy (823,33 ± 582,68 mg/m³). Para CO_2, o clone apresentou 70.931,95 ± 33.437,36 mg/m³, enquanto os cavacos apresentaram maior concentração de NOx (48,41 mg/m³). Os resultados indicam influência da granulometria, umidade e condições de combustão das biomassas.

Palavras-chave: Emissões Atmosféricas; Combustíveis Renováveis; Cavacos de Madeira.

Pollutant Gas Emissions from the Combustion of Different Forest Biomasses

Abstract: Forest biomass is an important renewable source of thermal energy. However, its combustion can generate pollutant gases, making it necessary to evaluate different fuels. This study evaluated the concentrations of CO_2, CO, NO_x, and C_xH_y emitted from the combustion of three forest biomasses: *Eucalyptus saligna* firewood, clone 1528, and *Eucalyptus grandis* wood chips. Gas concentrations were measured in a Conventional Curing Unit. The data were compared using the Kruskal–Wallis test at a 5% significance level. Wood chips presented lower concentrations of CO (1,878.16 ± 760.37 mg/m³) and CxHy (205.52 ± 172.39 mg/m³), whereas the clone showed higher concentrations of CO (3,195.33 ± 2,205.37 mg/m³) and CxHy (823.33 ± 582.68 mg/m³). For CO_2, the clone presented 70,931.95 ± 33,437.36 mg/m³, while wood chips showed the highest NOx concentration (48.41 mg/m³). The results indicate that particle size, moisture content, and combustion conditions influence biomass emissions.

Keywords: Air Pollution; Renewabel Energy; Woodchips.

1. Introdução

As mudanças climáticas representam um dos principais desafios da atualidade, estando associadas em grande parte ao aumento das concentrações atmosféricas de gases de efeito estufa (GEE) decorrentes das atividades antrópicas. Nesse contexto, a substituição de combustíveis fósseis por fontes renováveis constitui uma estratégia para redução das emissões e diversificação da matriz energética (IPCC, 2021; Niu et al., 2024).

Entre as fontes renováveis, a biomassa florestal destaca-se pela ampla utilização na geração de energia térmica em diferentes setores agroindustriais. Além disso, os cavacos de madeira constituem uma alternativa à lenha convencional, apresentando características físicas, como menor granulometria, que podem favorecer uma combustão mais homogênea e reduzir a formação de gases associados à combustão incompleta (Banerjee, 2023). Apesar de sua utilização crescente, ainda são necessários estudos sobre essa biomassa.

Diante disso, este estudo teve como objetivo avaliar as concentrações de dióxido de carbono (CO_2), monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrogênio (NO_x) e hidrocarbonetos totais (C_xH_y) emitidas durante a combustão de diferentes biomassas florestais utilizadas na geração de energia.

2. Material e métodos

2.1 Local de estudo

O experimento foi desenvolvido no Centro de Desenvolvimento Agronômico e Treinamento em Extensão Rural (ADET) da Japan Tobacco International (JTI), na cidade de Santa Cruz do Sul, Rio Grande do Sul, Brasil.

2.2 Caracterização das biomassas

Foram avaliados três tratamentos: lenha de *Eucalyptus saligna* Smith e de Clone 1528, ambas provenientes de plantios florestais de 8 anos e seccionadas em toretes de 1 m, e cavacos de *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden, adquiridos de fabricante e com granulometria

aproximada de 20 mm. Foram realizadas três repetições por biomassa, com número amostral inicial de 1.428, 960 e 1.078 para *E. saligna*, clone e cavacos, respectivamente.

Para o cálculo da umidade das lenhas, foram retirados três discos de três toretes distintos, sendo dois nas extremidades e um no centro, totalizando 18 amostras. Para os cavacos, foram coletadas aleatoriamente três amostras de aproximadamente 500 g. As amostras foram inicialmente pesadas com umidade desconhecida (Pu) e, posteriormente, submetidas à estufa a 103 ± 2 ºC, com pesagens periódicas até atingirem massa constante, indicando a secagem completa. Em seguida, foi determinada a massa seca (Po), utilizando-se a Equação 1 para o cálculo da umidade das biomassas.

$$U(\%) = \frac{(Pu - Po)}{Pu} x\,100 \qquad (1)$$

Em que:

U = Umidade da madeira, em porcentagem;

Pu = Peso da madeira úmida; e

Po = Peso da madeira seca a (103 ± 2) °C.

2.3 Caracterização das Unidades de Cura

O estudo foi realizado em Unidade de Cura Convencional e Unidade de Cura Convencional Adaptada para Cavacos, com capacidade para aproximadamente 500 varas, estrutura em alvenaria e área útil da chaminé de 0,484 m². O sistema de combustão é composto por câmara de combustão, grelha, abafador e cinzeiro, com alimentação manual da biomassa. A combustão ocorre com entrada natural de ar, regulada por abafador automático associado ao controle de temperatura, quando a temperatura diminui, o abafador se abre, aumentando a entrada de ar, e após sua estabilização, reduz a abertura. O controle de temperatura e umidade da UC é realizado automaticamente, mantendo-se a combustão e a alimentação da biomassa em condições reais de operação.

2.4 Quantificação das emissões atmosféricas

Para a determinação das emissões de GEE, foram realizadas medições dos gases na fumaça e da temperatura na chaminé em cada etapa da colheita do tabaco (baixeiro, meio pé e ponteira) em UC convencional, utilizando o analisador de gases Chemist 500x, da marca Seitron, cuja calibração é realizada manualmente pelo fabricante.

As análises foram realizadas na metade do ciclo de cura, durante a secagem das folhas, com temperaturas entre 49 e 57 °C. As medições ocorreram em intervalos de 10 segundos durante uma hora de amostragem. A quantificação das emissões foi determinada por equações de França et al., 2012 e Amorim, 2012. Os gases analisados foram oxigênio (O_2), dióxido de carbono (CO_2), monóxido de carbono (CO), hidrocarbonetos (C_xH_y) e óxidos de nitrogênio (NO_x).

Durante a coleta, foram realizados furos de 10 mm nas chaminés, posicionados a uma altura mínima equivalente ao dobro do diâmetro interno da tubulação após o último distúrbio no fluxo gasoso, conforme a ABNT NBR 10.700/1989, permitindo a estimativa dos fatores de emissão.

Os resultados de CO e NO_x foram convertidos para a condição referencial de 8% de O_2, conforme a Equação 5, visando atender à Resolução CONAMA nº 506/2024 (CONAMA, 2024), que estabelece valores de até 6.500 mg/m³ a 8% de O_2 para CO e 650 mg/m³ a 8% de O_2 para NOx, e à Diretriz Técnica FEPAM nº 001/2018 (FEPAM, 2018), que estabelece condições e limites máximos de emissão de poluentes atmosféricos.

$$CO\,\frac{mg}{m^3} = \frac{(21-8)}{(21-O_2)}\,x\,CO\,mg/m^3 \qquad (2)$$

2.5 Análise estatística

Os dados foram avaliados quanto à normalidade e homogeneidade de variâncias. Como os pressupostos para análises paramétricas não foram atendidos, utilizou-se o teste não paramétrico de Kruskal-Wallis para comparar as concentrações dos gases entre as biomassas avaliadas, adotando-se nível de significância de 5% ($p \leq 0,05$). As análises foram realizadas no software R Studio.

3. Resultados e discussões

A lenha de Eucalyptus saligna apresentou concentração média de 59.053,6 mg m^{-3} de CO_2, 2.827,8 mg m^{-3} de CO, 515,7 mg m^{-3} de CxHy e 36,1 mg m^{-3} de NOx. Para a lenha de Clone 1528, foram observadas as maiores concentrações médias de CO_2 (70.932,0 mg m^{-3}), CO (3.195,3 mg m^{-3}) e CxHy (823,3 mg m^{-3}). Em contrapartida, os cavacos de Eucalyptus grandis apresentaram as menores concentrações de CO (1.878,2 mg m^{-3}) e CxHy (205,5 mg m^{-3}) e a maior concentração de NOx (48,4 mg m^{-3}), conforme a Tabela 2 e Figura 1.

A análise estatística das concentrações dos gases avaliados é apresentada na Tabela 2. O teste de Kruskal-Wallis indicou diferença significativa entre as biomassas para as variáveis analisadas, com comportamento distinto entre os combustíveis. As maiores diferenças foram observadas para CO, C_xH_y e NO_x, enquanto o CO_2 também apresentou variação entre as biomassas, conforme indicado pelas comparações entre os grupos. Para o O_2, as concentrações médias foram semelhantes entre os tratamentos.

Os resultados indicaram diferenças significativas entre as biomassas avaliadas para todos os gases analisados (Tabela 2), com exceção do clone para CO_2. O tamanho amostral (n) para *E.saligna*, clone e cavacos foi de 873, 429 e 1.077 observações, respectivamente, sendo as diferenças decorrentes da remoção de valores discrepantes (*outliers*).

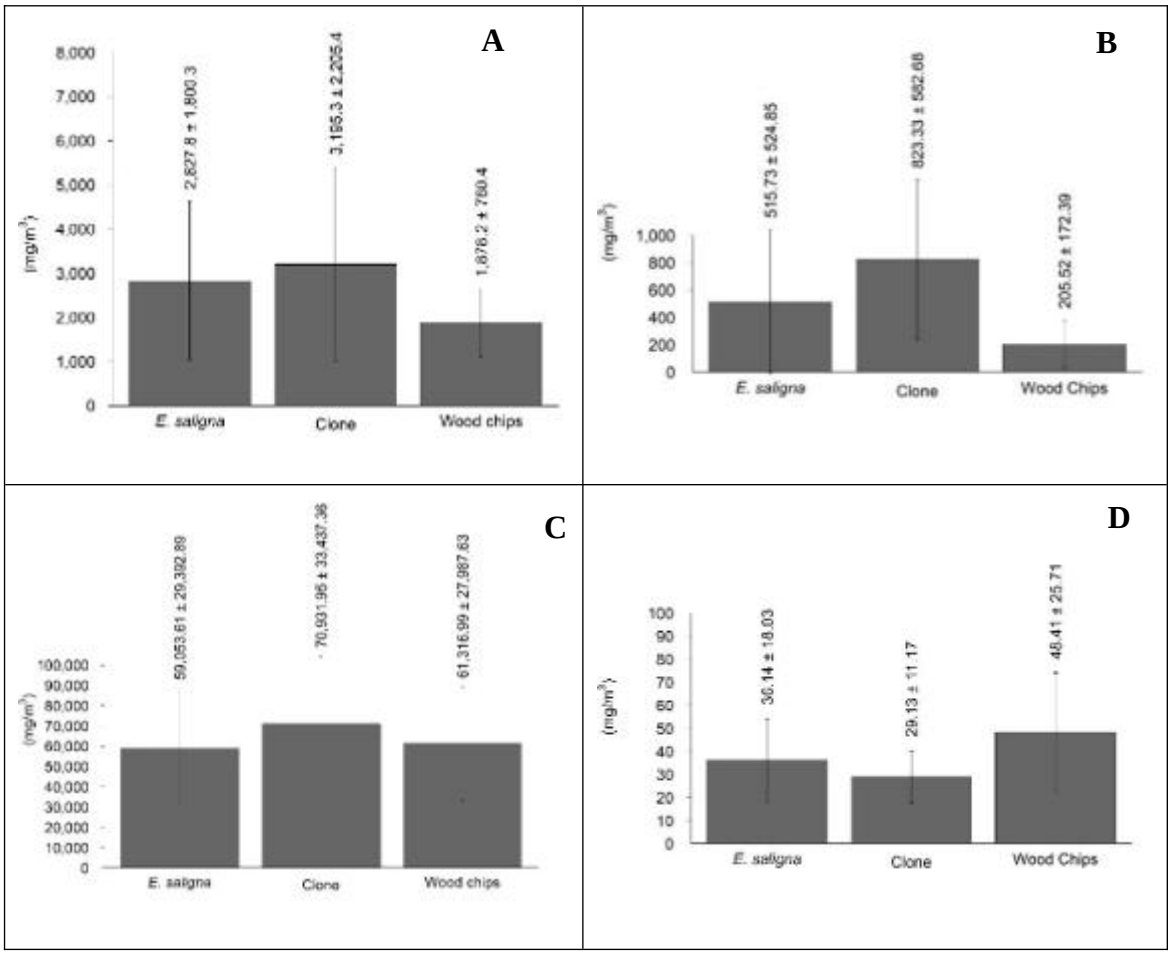
Tabela 2 – Estatística de Kruskal-Wallis, número de observações, valor-p, média e desvio padrão das análises de emissões dos GEE provindas do processo de combustão. Onde: O_2 = oxigênio; CO_2 = dióxido de carbono; CO = monóxido de carbono; C_xH_y = hidrocarbonetos, principalmente metano (CH_4); NO_x = Óxidos de nitrogênio, principalmente óxido nítrico (NO) e dióxido de nitrogênio (NO_2); mg/m³ = miligramas por l metro cúbico; T = temperatura do gás na chaminé em graus Celsius; a, b e c = Grupos; N = número de amostras.

Biomassa	N	*p*	O_2	CO_2	CO

			%	mg/m³	mg/m³	8% O2 mg/m³
Lenha *E.saligna*	873	2,2 x 10^{-16*}	18,1 ± 2,71	59.053,6 ± 29.392,9 c	2.827, 77 ± 1.800,3 b	17.618,6 ± 8.153,6
Lenha Clone	429	2,2 x 10^{-16*}	18,2 ± 2,22	70.931,95 ± 33.437,4 a	3.195,3 ± 2.205,4 a	15.699,2 ± 8.342,2
Cavacos de *E.grandis*	1.077	2,2 x 10^{-16*}	17,1 ± 1 ,72	61,316,1 ± 27,987,6 b	1.878,2 ± 760,4 c	7.130,4 ± 1.779,7

*Significativo a 95% de probabilidade.

Figura 1 – Médias e Desvio Padrão das concentrações dos gases. A) CO; B) C_xH_Y; C) CO_2; D) NO_x.



A representação gráfica evidencia diferentes perfis de emissão entre as biomassas. As menores concentrações de CO nos cavacos (Figura 1A) podem estar relacionadas à sua menor granulometria (20 mm) em comparação aos toretes de lenha (1 m), proporcionando maior área superficial para contato com o oxigênio e favorecendo a transferência de calor e massa e a oxidação dos compostos formados durante a combustão. Essa condição pode contribuir para uma combustão mais homogênea e reduzir a formação de produtos associados à combustão incompleta (Das, 2021; Oliveira, 2022).

Os cavacos apresentaram maior teor de umidade, aproximadamente 40%, em comparação aos 30% das lenhas, condição que pode desfavorecer a combustão, pois parte da energia é consumida na evaporação da água. Entretanto, mesmo com maior umidade, os cavacos apresentaram menores concentrações de CO, sugerindo que sua menor granulometria e maior área superficial favoreceram o contato com o ar e podem ter compensado parcialmente o efeito da umidade sobre a combustão.

A alimentação manual da biomassa e a entrada natural de ar, regulada pelo abafador, são importantes para os resultados. Como a abertura do abafador depende da temperatura da unidade, a disponibilidade de ar e oxigênio pode variar ao longo do processo. Assim, alterações na quantidade de combustível e no fornecimento de oxigênio podem modificar o regime de combustão, favorecendo a formação de CO sob menor disponibilidade de oxigênio e a oxidação do carbono e dos compostos voláteis quando há maior disponibilidade de comburente.

Comportamento semelhante foi observado para os C_xH_y, com menores concentrações nos cavacos e maiores no clone (Figura 1B). Como esses compostos estão associados à combustão incompleta, seu comportamento acompanha, em parte, o observado para o CO. A maior concentração no clone pode indicar condições menos favoráveis à oxidação completa, enquanto a menor granulometria dos cavacos pode ter favorecido a interação entre combustível e comburente, reduzindo sua formação.

A maior concentração de CO_2 foi observada para o clone (Figura 1C). Isso indica maior conversão do carbono do combustível para essa forma oxidada (Pasa, 2022). Entretanto, o resultado deve ser analisado em conjunto com CO e CxHy, que também apresentaram maiores valores no clone, evidenciando variações nas condições de oxidação durante o período de amostragem.

Assim, a maior concentração de CO_2 não deve ser interpretada isoladamente como indicativo de maior eficiência de combustão. Em condições reais de operação, oscilações na

alimentação da biomassa, na disponibilidade de oxigênio e na temperatura podem alterar o regime de queima, favorecendo, em diferentes momentos, a formação de CO_2, CO e hidrocarbonetos. Portanto, a análise conjunta desses gases permite uma interpretação mais adequada do comportamento da combustão.

Concentrações mais elevadas de NOx foram observadas nos cavacos de madeira (Figura 1D), possivelmente associadas à presença de nitrogênio atmosférico durante a combustão. Além disso, o teor de nitrogênio da própria biomassa pode influenciar diretamente a formação desses óxidos (Lukáč, 2019).

Segundo Primo (2005), concentrações mais elevadas de NOx podem estar relacionadas ao maior teor de umidade da biomassa, o que pode ter contribuído para os resultados deste estudo, visto que os cavacos apresentaram 40% de umidade, enquanto as lenhas apresentaram 30%. Além disso, Sung et al. (2016) apontam uma relação inversa entre NOx, CxHy e CO, indicando que partículas menores tendem a apresentar maiores emissões de NOx.

Esse comportamento corrobora os resultados deste estudo, no qual os cavacos, por apresentarem menor tamanho de partícula, registraram as maiores concentrações de NOx e as menores de CxHy e CO, com 205,52 mg/m³ e 1.878,16 mg/m³, respectivamente (Figuras 1A e 1C). Esses resultados sugerem que a maior disponibilidade de oxigênio favoreceu a oxidação dos compostos intermediários, reduzindo a formação de CO e CxHy e contribuindo para maiores emissões de NOx.

De acordo com Miranda et al. (2017), os cavacos de madeira apresentam vantagens em relação à lenha em tora, como maior área superficial, uniformidade e facilidade de secagem. Além disso, podem reduzir os custos de geração de energia térmica devido à maior eficiência de combustão e à menor demanda de mão de obra.

Em razão da menor granulometria, os cavacos apresentam maior facilidade de manuseio e alimentação dos sistemas de combustão, favorecendo a eficiência energética. Além disso, podem ser produzidos a partir de resíduos da colheita e do processamento florestal, constituindo uma alternativa economicamente atrativa que contribui para a geração de energia renovável, a redução de desperdícios e a agregação de valor à cadeia produtiva da madeira.

4. Conclusões

Os resultados obtidos demonstraram que as diferentes biomassas apresentaram comportamentos distintos quanto às emissões gasosas durante o processo de combustão. O clone 1528 apresentou as maiores concentrações médias de CO_2, CO e CxHy, enquanto os cavacos de *Eucalyptus grandis* apresentaram as menores concentrações de CO e CxHy e a maior concentração de NOx.

As menores concentrações de CO e CxHy observadas nos cavacos indicam um comportamento favorável quanto à ocorrência de produtos associados à combustão incompleta, possivelmente relacionado à menor granulometria do material, apesar do maior teor de umidade. Entretanto, os resultados também demonstram que as emissões não podem ser atribuídas a uma única característica da biomassa, uma vez que são influenciadas pela interação entre granulometria, umidade, disponibilidade de oxigênio e condições operacionais do sistema de combustão.

5. Agradecimentos

Os autores agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio financeiro concedido durante a realização deste estudo.

6. Referências bibliográficas

Amorim, E. B. (2012). Gases de efeito estufa produzidos pela combustão de biomassa (Tese de doutorado). Universidade Estadual Paulista.

Banerjee, N. (2023). Biomass to Energy — an Analysis of Current Technologies, Prospects, and Challenges. Bioenergy Research, 16, 683–716. https://doi.org/10.1007/s12155-022-10500-7.

Conselho Nacional do Meio Ambiente. (2024). Estabelece padrões nacionais de qualidade do ar e fornece diretrizes para sua aplicação. https://conama.mma.gov.br/?option=com_sisconama&task=arquivo.download&id=827.

Das, S. (2021). Single particle combustion studies of coal/biomass fuel mixtures. Energy, 217. https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.119329.

França, D. A. et al. (2012). Pre-harvest sugarcane burning: determination of emission factors through laboratory measurements. Atmosphere, 3(1), 164–180. https://doi.org/10.3390/atmos3010164

Fundação Estadual de Proteção Ambiental Henrique Luis Roessler. (2018). Diretriz técnica que estabelece condições e os limites máximos de emissão de poluentes atmosféricos a serem adotados pela FEPAM para fontes fixas e dá outras providências. https://ww3.fepam.rs.gov.br/CENTRAL/DIRETRIZES/Diretriz_Tec_N_001_2018_DIRTEC_Lim_de_Emis_de_Poluentes_Atmosf.PDF.

Lukáč, L. et al. (2019). Defining the mathematical dependencies of NOx and CO emission generation after biomass combustion in a low-power boiler. Civil and Environmental Engineering Reports, 29(3), 153–163. https://doi.org/10.2478/ceer-2019-0031
Masson-Delmonte, V et al. (2021). Sumário para Formuladores de Políticas. Painel Intergovernamental Sobre Mudanças Climáticas (IPCC). https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/sirene/publicacoes/relatorios-do-ipcc/arquivos/pdf/IPCC_mudanca2.pdf
Miranda, M. A. S. et al. (2017). *Eucalyptus sp*. woodchip potential for industrial thermal energy production. Revista Árvore, 41, 6. https://doi.org/10.1590/1806-90882017000600004.
Niu, X. Q. et al. (2024). The transition to clean energy and the external balance of goods and services as determinants of energy and environmental sustainability. Gondwana Research, 127, 77–87. https://doi.org/10.1016/j.gr.2023.03.003.
Oliveira, A. T. (2022). Experimental study of co-combustion of biomass with coal in a drop tube furnace (Dissertação de mestrado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
Pasa, D. L. (2022). Eficiência energética e emissões de GEE do processo de combustão de biomassa florestal (Tese de doutorado). Universidade Federal de Santa Maria.
Primo, K. R. (2005). Formação, controle e dispersão atmosférica dos Óxidos de Nitrogênio decorrentes da queima de bagaço em caldeiras industriais (Dissertação de mestrado). Universidade Federal de Itajubá.
Sung, Y. et al. (2016). Coal-particle size effects on NO reduction and burnout characteristics with air-staged combustion in a pulverised coal-fired furnace. Fuel, 182, 558–567. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2016.05.122.

Estimativa do poder calorífico superior de madeiras da Amazônia utilizando a espectroscopia FT-NIR

Cristiano S. do Nascimento[1]; Adrya da S. Figueiredo[1]; Roberto Daniel de Araújo[1]; José Carlos R. Soares[2]; Jelmir C. de Andrade[3]; Joaquim dos Santos[1]; Niro Higuchi[1]

[1] Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia - INPA
[2] Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária -EMBRAPA Amazônia Ocidental
[3] Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ/IQ

Resumo: Métodos não destrutivos são amplamente utilizados para predizer propriedades tecnológicas da madeira. O estudo avaliou modelos multivariados de PLSR (regressão dos mínimos quadrados parciais) com espectroscopia FT-NIR (infravermelho próximo com transformada de Fourier) para predizer o poder calorífico superior (PCS) de 50 espécies florestais nativas da Amazônia brasileira, oriundas de áreas de manejo comercial. Os valores de referência do PCS foram obtidos em laboratório (úmida), enquanto os espectros NIR foram coletados em madeira moída (60 mesh). Modelos PLS foram gerados, totalizando 960 análises nas faixas de 4.100–4.830 e 4.080–6.550 cm^{-1}. Com base em parâmetros de mérito analítico, os oito melhores modelos que apresentaram coeficientes de validação >0,75, foram selecionados. O modelo PLS 7 (2ª derivada, 7 variáveis latentes) foi o mais robusto (RMSECV: 71 kcal/kg; incerteza: 0,86%). Os resultados confirmam o FT-NIR como ferramenta capaz de predizer o PCS de madeiras amazônicas, com aplicações na bioenergia, manejo florestal e tecnologia da madeira.
Palavras-chave: Biomassa; potencial energético; metodologia não destrutiva.

Estimation of the higher heating value of Amazonian woods using FT-NIR Spectroscopy

Abstract: Non-destructive methods are widely employed to predict the technological properties of wood. The present study evaluated multivariate Partial Least Squares Regression (PLSR) models coupled with Fourier Transform Near-Infrared (FT-NIR) spectroscopy to predict the Higher Heating Value (HHV) of 50 native forest species from the Brazilian Amazon, originating from commercial forest management areas. The reference HHV values were determined by conventional laboratory analysis (wet basis), whereas the NIR spectra were acquired from ground wood (60 mesh). PLS models were generated, totaling 960 analyses over the spectral ranges of 4,100–4,830 and 4,080–6,550 cm^{-1}. Based on analytical figures of merit, the eight best models, which exhibited validation coefficients (R^2) > 0.75, were selected. PLS model 7 (second derivative, 7 latent variables) proved to be the most robust, yielding an RMSECV of 71 kcal/kg and an uncertainty of 0.86%. The findings confirm that FT-NIR spectroscopy is a capable tool for predicting the HHV of Amazonian woods, with significant potential for applications in bioenergy, management, and wood technology.

1. Introdução

A Floresta Amazônica detém o maior bioma tropical do planeta, constituída por uma imensa diversidade de espécies arbóreas com distintas propriedades tecnológicas. Essa biomassa representa uma fonte renovável e estrategicamente relevante para a bioenergia, cujo

aproveitamento depende do conhecimento preciso de seu potencial energético (Florsheim et al., 2020; Bianchini et al., 2025).

O poder calorífico superior (PCS) é o parâmetro energético importante quando a finalidade é quantificar a energia da biomassa vegetal, pois expressa a quantidade de energia liberada na combustão completa da madeira. Entretanto, o PCS varia significativamente entre espécies e idades da arvore, influenciado por fatores como densidade básica, conteúdo de umidade, teor de extrativos e lignina (Silva et al., 2014). Madeiras densas e teor alto de lignina tendem a apresentar maior PCS, enquanto madeiras branca, com baixa densidade e alto teor de umidade, apresentam desempenho energético mais baixos (Costa Junior et al., 2021; Nascimento et al., 2023).

A determinação tradicional do PCS segue normas destrutivas, realizadas em bomba calorimétrica. Embora precisa, essa metodologia exige moagem da amostra, uso de oxigênio sob pressão e geração de resíduos, sendo onerosa, e seu processo é demorado (ABNT, 1983; ASTM, 2021). Diante dessas limitações, a espectroscopia no infravermelho próximo (NIR) associada à quimiometria tem se consolidado como uma alternativa rápida, não destrutiva e de baixo custo. A técnica opera na faixa de 10.000 a 4.000 cm^{-1}, capturando informações sobre ligações químicas (C–H, O–H, N–H) presentes na matriz lignocelulósica. Modelos de regressão por mínimos quadrados parciais (PLS) são amplamente empregados para correlacionar os espectros NIR com dados de referência, permitindo estimativas precisas sem destruição da amostra (Javier-Astete et al., 2023; Gmach et al., 2025).

Estudos de biomassa de *Pinus* e *Eucalyptus* têm demonstrado a eficiência da abordagem NIR para a predição de propriedades energéticas da madeira (Schimleck et al., 2003; Andrade et al., 2012). Entretanto, pesquisas para avaliar o potencial energético de madeira tropical com grandes amostragens são escassos (Silva et al., 2014; Eugenio da Silva et al., 2024). Nesse contexto, este estudo teve como objetivo avaliar modelos multivariados baseados no algoritmo PLS para predição do PCS de espécies florestais nativas da Amazônia utilizando espectroscopia FT-NIR. A hipótese central é que os espectros NIR contêm informações espectrais suficientes para capturar a variabilidade química e estrutural associada ao conteúdo energético dessas madeiras, permitindo estimativas rápidas e não destrutivas.

2. Material e métodos

2.1. Material

Espécies florestais foram coletadas em diferentes locais do estado do Amazonas/Brasil, e para cada espécie (três repetições), discos de madeira (diâmetro à altura do peito) foram obtidos. Esse material foi dividido em cunhas (alburno-medula) e deixado secar à temperatura ambiente. Posteriormente, as amostras foram enviadas à Coleção Botânica – Xiloteca/PCAC/INPA/MCTI/Brasil para confirmação da identificação em campo (Tabela 1), e parte do material foi preparado para a análise destrutiva (referência). As amostras foram cortadas em pedaços menores (serra de fita - Videira), perfuradas (Pallmann - PZ8) e moídas (moinho Willey) para obtenção da fração de 60 mesh para quantificação do PCS e obtenção dos espectros.

2.2. Obtenção dos espectros NIR

As amostras foram aclimatadas (umidade relativa < 60% a 20 °C) e os espectros foram obtidos (n = 450) em três frações (60 mesh) de cada amostras em um espectrômetroFT-NIR (infravermelho próximo com transformada de Fourier), Antaris II Thermo Scientific (tipo bancada), equipado com fonte de halogênio, acessório de reflectância difusa, detector de alta sensibilidade e estabilidade de índio-gálio-arsênio pareado e interferômetro de Michelson. O sistema utiliza o *software* RESULT™ Integration, que opera na faixa de 10.000 a 4.000 cm^{-1} com resolução espectral de 8 cm^{-1} e 16 varreduras, onde foram obtidos até 750 pontos de dados nessa faixa espectral.

2.3. Determinação do poder calorífico superior

Os ensaios de poder calorífico superior (PCS) foram realizados em base seca, com auxílio de uma bomba calorimétrica (ASTM D2015-00/2021). Cerca de 0,80 g de serragem (60 mesh) foi colocado na cápsula metálica e introduzido no interior da bomba; um fio de lã foi colocado junto ao fio metálico de ignição, a bomba foi fechada e foi injetado gás oxigênio. A bomba foi colocada em balde metálico com água, e o sistema de ignição do calorímetro foi acoplado à bomba, onde se iniciou a quantificação. Após cerca de 15 min., o sistema operacional do calorímetro PARR imprimiu o resultado da leitura em cal/g. Esta determinação baseou-se na metodologia tradicional (destrutiva) e, no presente estudo, os resultados desta análise foram designados como análise química de referência (úmida) de 150 amostras (50 espécies x 3 indivíduos).

2.4. Processamento de dados e análise estatística multivariada

O *software* TQ Analyst™ foi utilizado na análise. Antes deste procedimento, para reduzir a influência de diversas fontes não relacionadas à informação físico-química contida nos espectros brutos, foi aplicada a técnica de pré-processamento SNV (*standard normal variate*) (Nascimento et al., 2026). Com base nas assinaturas espectrais NIR e no PCS (referência), foram desenvolvidos modelos baseados no algoritmo PLSR (*Partial least squares regression*) e diferentes LVs (*latent variables*), variando de 1 a 10.

As amostras foram aleatoriamente particionadas em 75% para calibração e 25% para validação, conforme recomendado por Tsuchikawa et al. (2023) para estudos quimiométricos com espectroscopia NIR em produtos florestais. Diretrizes estatísticas relacionadas a dados espectrais e/ou de concentração são incorporadas ao *software* e, em seguida, utilizadas para esse processo de seleção, que é reiterado até que um conjunto completo de cada seja gerado.

Tabela 1 - Espécies amazônicas utilizadas no processo de calibração e validação de modelos PLS para predição do poder calorifico superior

Madeiras	**Madeiras**
Nome comum: nome científico	**Nome comum: nome científico**
Abiurana: *Pouteria guianensis*	Jatobá: *Hymenaea courbaril*
Andiroba: *Carapa guianensis*	Jutaí: *Hymenaea parviphora*
Angelim-pedra: *Hymenolobium petraem*	Louro-aritu: *Licaria aritu*
Angelim-da-mata: *H. excelsum*	Louro-itaúba: *Mezilaurus* sp.
Angelim-da-mata: *H. pulcherrimum*	Maçaranduba: *Manilkara huberi*
Angelim-pedra: *H. modestum*	Macucu-de-paca: *Aldina heterophylla*
Angelim-vermelho: *Dinizia excelsa*	Mandioqueira: *Qualea paraensis*
Balata: *Manilkara* sp.	Marupá: *Simarouba amara*
Breu: *Protium puncticulatum*	Matá-matá: *Eschweilera odora*
Caixeta: *Simarouba* sp.1	Matá-matá branco: *Eschweilera* sp1.
Carapá: *Carapa* sp.	Matá-matá: *Eschweilera* sp2.
Cardeiro: *Scleronema micranthum*	Muirapiranga: *Brosimum* sp.1
Caroba: *Jacaranda copaia*	Pau-rainha: *Brosimum rubescens*
Castanha-de-paca: *Catostema sclerophylum*	Peroba-bosta: *Goupia* sp.
Castanha-jacaré: *Corythophora rimosa*	Piquiá-Marfim: *Aspidosperma* sp.
Cedro: *Cedrela odorata*	Piquiá-Marfim roxo: *A. obscurinervium*
Cedrorana: *Cedrelinga catanaeformis*	Rainha: *Brosimum* sp.2
Coração-de-negro: *Swartzia panacoco*	Sucupira-amarela: *Enterolobium schomburgkii*
Cumaru-ferro: *Dipteryx odorata*	Tachi-preto: *Tachigalia mymecophylla*
Cumaru-amarelo: *Dipteryx* sp.1	Tamanqueira: *Simarouba* sp.2
Cumaru: *Dipteryx* sp.2	Tanimbuca: *Buchenavia oxycarpa*
Cupiúba: *Goupia glabra*	Tauari: *Couratari stellata*
Guariuba: *Clarisia racemosa*	Tauari-da-Amazonia: *Cariniana intergrifolia*
Guariuba-amarela: *Clarisia* sp.	Timborana: *Enterolobium* sp.
Itaúba: *Mezilaurus itauba*	Ucuúba-vermelha: *Iryanthera* sp.

O coeficiente de calibração (R^2c) e coeficiente de validação (R^2v) foram calcula dos pelas equações 1 e 2, respectivamente. Os erros RMSEC (*root mean square error of calibration*), RMSEP (*root mean square error of prediction*) e RMSECV (*root mean square error of cross-validation*) foram calculados a partir das equações, 3, 4 e 5, enquanto a $\tilde{O}_y^2$ (*uncertainty*) foi calculada pela equação 6.

Eq. 1: $R^2c = 1 - ¿ \sum_{i=1}^{n}(\hat{y}_i - ¿y_i)^2 / \sum_{i=1}^{n}(y_i - ¿\hat{y})^2$ onde $\hat{y}_i$ e y_i são os valores internos previstos e de referência da amostra i, $\hat{y}$ é a média dos valores medidos e n é o tamanho da amostra.

Eq. 2: $R^2v = 1 - ¿ \sum_{i=1}^{n}(\hat{y}_{ie} - ¿y_{ie})^2 / \sum_{i=1}^{n}(y_i - ¿\hat{y})^2$ onde $\hat{y}_{ie}$ e y_{ie} são os valores externos previstos e de referência da amostra i, $\hat{y}$ é a média dos valores medidos e n é o tamanho da amostra.

Eq. 3: RMSEC = $\sqrt{\frac{\sum \square_{i=1}^{nc}(yi - \hat{y}i)^2}{n-k+1}}$ onde y_i é o valor de referência, $\hat{y}_i$ é o valor previsto, n_c amostras são usadas na calibração e k são variáveis latentes.

Eq. 4: RMSEP = $\sqrt{\frac{\sum \square_{i=1}^{np}(yi - \hat{y}ie)^2}{n-k-1}}$ onde y_i é o valor de referência, $\hat{y}_{ie}$ é o valor previsto e n amostras são usadas para validação externa.

Eq. 5: RMSECV = = $\sqrt{\frac{\sum \square_{i=1}^{nc}(yi - \hat{y}i,-i)^2}{n-k+1}}$ onde y_i é o valor de referência, $\hat{y}_{i,-i}$ = é a previsão para a amostra i obtida quando ela foi deixada de fora da calibração.

Eq. 6: $\tilde{O}^2_{y\,pred,i} = (V_{yi,pred}/V_{X\,tot,cal} + 1/Ical)$ onde $V\triangle_{yi,\,pred}$ = y- variância residual y (validação), $V\triangle_{X\,tot,\,cal}$ = variância residual x média na calibração do modelo e I_{cal} = número de amostras no conjunto de dados de calibração.

A LV ideal utilizada em cada modelo PLS foi escolhida com base no menor RMSECV. A robustez dos modelos preditivos foi avaliada pelos melhores parâmetros quimiométricos (figuras de mérito), como R^2v, RMSEP, RMSECV e $\widetilde{O}_y^2$. Para classificar a qualidade preditiva, adotaram-se os seguintes referenciais baseados na literatura especializada: $R^2v \geq 0{,}90$ (excelente), $0{,}80 \leq R^2v < 0{,}90$ (bom, adequado para triagem), $0{,}70 \leq R^2v < 0{,}80$ (razoável, para predições preliminares) e $R^2v < 0{,}70$ (insatisfatório); incerteza ($\widetilde{O}_y^2$) < 1% (excelente para predições individuais); e RMSEP < 2% da média geral do PCS (≈ 4.900 kcal/kg, ou seja, RMSEP < 98 kcal/kg) (Wang, 2021; Eugenio da Silva et al., 2024). Esses parâmetros permitem

compreender se os modelos poderiam ser utilizados em sistemas de medição reais, triagem ou apenas para fins de interpretação.

3. Resultados e discussão

Na Figura 1A (espectros NIR brutos) observa-se uma acentuada variação na linha base e intensidade global, típica de materiais sólidos heterogêneos como madeira. Essas diferenças podem decorrer principalmente de variações físicas (tamanho de partícula, rugosidade superficial, densidade do material e umidade) e não de propriedades químicas. Tal comportamento justifica plenamente a aplicação do pré-processamento SNV, que centraliza e normaliza cada espectro individualmente, removendo os efeitos multiplicativos e aditivos (Wang, 2021). Quando o mesmo conjunto é tratado com aplicação da 2ª derivada + SNV + suavização Savitzky-Golay (Figura 1B), observa-se que os picos tornam-se mais estreitos e bem resolvidos, com a linha base praticamente plana. As bandas em torno de 5.200–6.000 cm^{-1} (principalmente combinações de C–H e O–H) e na região de 4.000–4.500 cm^{-1} (alongamentos de C–H em anéis aromáticos e grupos metil/metileno) são nitidamente realçadas. Essas regiões são conhecidas por correlacionar-se com o teor de lignina e extrativos, que são as principais variantes do PCS em madeiras. Portanto, a transformação espectral aplicada aos melhores PLS foi capaz de extrair a informação química relevante, suprimindo ruídos e artefatos físicos, condição essencial para a construção de um modelo preditivo robusto (Schwanninger et al., 2011; Nascimento et al., 2026).

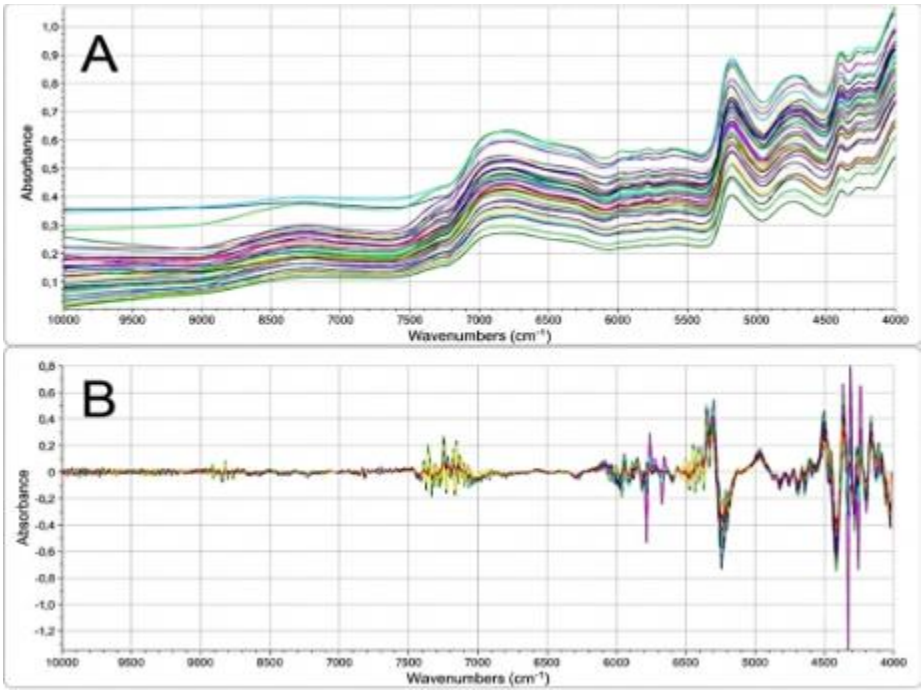


Figura 1 – Universo espectral NIR (10.000–4.000 cm-1): A - espectros brutos, conjunto de calibração e validação externa; B - 2ª derivada, PLS 7 (calibração).

Modelos quimiométricos baseados na regressão por mínimos quadrados parciais (PLS), combinando dados espectrais de 40 espécies × três indivíduos × 8 tratamentos matemáticos, produziram 960 análises, e o ranking dos oito melhores modelos (7
LV) foram considerados mais adequados para a predição do PCS de madeiras amazônicas (Tabela 2), demonstrando forte capacidade de modelagem da variabilidade energética entre espécies com diferentes características físico-químicas. O conjunto de calibração abrangeu ampla faixa de valores de PCS, variando de 4.626 kcal/kg para a madeira de Marupá (*Simarouba amara*), com densidade básica de 0,35 g/cm³, até 5.263 kcal/kg para a madeira de Itaúba (*Mezilaurus itauba*), com densidade de 0,70 g/cm³, indicando elevada heterogeneidade amostral e boa representatividade da variabilidade tecnológica das madeiras avaliadas (Freitas & Vasconcellos, 2019).

A Tabela 2 evidencia que o modelo PLS 7 apresentou o melhor equilíbrio entre ajuste e capacidade preditiva, com destaque para os parâmetros quimiométricos R^2c: 0,97, RMSEC: 31,70 kcal/kg, R^2v: 0,87, RMSEP: 63,90 kcal/kg, RMSECV: 70,42 kcal/kg e $\widetilde{O}_y^2$: 0,86%. Estes resultados corroboram outros estudos que demonstram a eficácia da espectroscopia NIR na avaliação de propriedades da madeira (Silva et al., 2014; Eugenio da Silva et al., 2024). O baixo RMSEC e RMSEP, comparados à amplitude total da variável (≈ 660 kcal/kg), demonstraram que os erros de predição são pequenos em termos relativos. A proximidade entre os erros de

validação cruzada e predição evidencia que o modelo apresenta baixa suscetibilidade a sobreajuste (*overfitting*). Além disso, o RMSEP inferior ao RMSECV indica comportamento preditivo estável durante a validação externa. Esse comportamento corrobora a importância de uma validação externa rigorosa, conforme destacado por outros autores que trabalham com modelos preditivos para madeiras (Erramuspe et al., 2025; Nascimento et al., 2026). O valor baixo de incerteza confere alta confiabilidade às predições individuais, reforçando o potencial do modelo como uma ferramenta confiável, conforme indicado em pesquisas sobre caracterização de biomassa usando NIR e quimiometria (Wang, 2021; Tsuchikawa et al., 2023).

Comparativamente, os demais modelos (Tabela 2) apresentaram desempenho menor. O PLS 1 apresentou R²v: 0,75 e RMSEP: 99,10 kcal/kg, com $\widetilde{O}_y^2$de 2,60%. O PLS 6 atingiu R²c: 0,98, mas R²v: 0,70 e RMSECV: 102 kcal/kg, evidenciando *overfitting* (excelente calibração, porém má predição). Estes resultados confirmam a importância do pré-processamento adequado: a combinação 2ª derivada + SNV + Savitzky-Golay remove eficientemente efeitos de espalhamento (*scatter*) e ruído de alta frequência, realçando bandas relacionadas a grupos C–H, O–H e N–H, que estão diretamente associadas aos constituintes energéticos da madeira (lignina, extrativos e carboidratos) (Gmach et al., 2023; Shrestha et al., 2023).

Tabela 2 – Parâmetros estatísticos para os modelos de regressão de Mínimos Quadrados Parciais (PLS) para a previsão do poder calorífico superior (PCS) de madeiras da Amazônia. (regiões 4.100-4.830 e 4.080-6.550 cm⁻¹; filtros Savitzky-Golay/Norris: janelas de 9 pontos e polinômio de 3ª ordem)

PLS	Tratamento matemático	R²c	R²v	RMSEC[1]	RMSECV[1]	RMSEP[1]	$\tilde{O}_{y\square}^2$ [2]
1	Espectro + SNV	0,88	0,75	57,30	118,00	99,10	2,60
2	Espectro + SNV + SG	0,87	0,78	58,00	120,00	98,20	2,65
3	Espectro 1ª der + SNV	0,94	0,81	41,10	78,20	96,00	1,64
4	Espectro 1ª der + SNV + SG	0,95	0,82	38,50	93,00	86,20	1,97
5	Espectro 1ª der + SNV + Norris	0,93	0,80	42,90	101,00	80,00	1,53
6	Espectro 2ª der + SNV	0,98	0,70	20,60	102,00	56,30	1,24
7	Espectro 2ª der + SNV + SG	0,97	0,87	31,70	70,42	63,90	0,86
8	Espectro 2ª der + SNV + Norris	0,93	0,82	42,00	83,00	98,30	2,18

[1]: kcal/kg; [2]: %; SNV: *Standard normal variante*; SG: Savitzky-Golay

A Tabela 3 confronta os valores de PCS determinados pelo método de referência (bomba calorimétrica) com os preditos pelo modelo NIR (PLS 7) para 10 espécies não incluídas no

conjunto de calibração. Observa-se que, para a grande maioria das amostras, a diferença percentual entre laboratório e NIR é inferior a 1% em valor absoluto (Abiurana, Castanha-jacaré, Coração-de-negro, Cupiúba, Louro-Itaúba, Maçaranduba, Sucupira amarela e Tauari). Apenas duas espécies apresentaram desvios ligeiramente maiores: Cumaru (-1,62%) e Pau-rainha (-3,13%). Para esta última, o erro ainda é pequeno do ponto de vista prático (diferença de 150 kcal/kg em 4.798 kcal/kg). Esses resultados demonstram que o modelo PLS 7 foi capaz de predizer o PCS de espécies amazônicas não incluídas na calibração com erro médio inferior a 1,5%, confirmando sua robustez e generalidade.

Os resultados encontrados na pesquisa confirmam a hipótese central do estudo: os espectros FT-NIR, quando adequadamente pré-processados e modelados via PLSR, contêm informações espectrais suficientes para capturar a variabilidade química e estrutural associada ao conteúdo energético de madeiras amazônicas, permitindo estimativas rápidas e não destrutivas do PCS. Esta descoberta está alinhada com pesquisas recentes que utilizam a integração de FT-NIR com modelagem quimiométrica para identificar espécies de madeira e prever propriedades-chave sem destruí-las (Eugenio da Silva et al., 2024; Nascimento et al., 2026). O presente estudo avança ao empregar uma ampla base de 50 espécies amazônicas nativas, cobrindo grande heterogeneidade de densidade básica e composição química, bem como uma ampla faixa de PCS, o que confere alta representatividade e robustez ao modelo.

Tabela 3 – PCS em laboratório e preditos de madeiras amazônicas

Madeiras	**PCS kcal/kg**		**Diferença%**
	Laboratório	**NIR/Validado**	
Abiurana (*P. guianensis*)	4.878	4.832	-0,94
Castanha-jacaré (*C. rimosa*)	4.748	4.754	0,13
Coração-de-negro (*S. panacoco*)	4.904	4.905	0,01
Cumaru (*D. odorata*)	4.867	4.787	1,62
Cupiúba (*G. glabra*)	4.654	4.681	0,58
Louro-itaúba (*Mezilaurus* sp.)	5.262	5.236	-0,58
Maçaranduba (*M. huberi*)	4.792	4.785	-0,15
Pau-rainha (*B. rubescens*)	4.798	4.648	-3,13
Sucupira amarela (*E. schomburgkii*)	4.771	4.779	0,17
Tauari (*C. stellata*)	4.735	4.728	-0,15

4. Conclusões

A espectroscopia FT-NIR associada à regressão PLS mostrou-se eficaz para predição não destrutiva do poder calorífico superior de espécies amazônicas. O modelo PLS 7 (2ª derivada + SNV + Savitzky-Golay) apresentou os melhores parâmetros analíticos (R^2v: 0,87;

RMSEP: 63,90 kcal/kg; incerteza: 0,86%). A ferramenta permite estimativas rápidas, precisas e sem geração de resíduos, sendo útil para bioenergia e manejo florestal sustentável.

5. Agradecimentos

INCT-Madeiras-da-Amazônia; CNPq/MCTI/FNDCT/Brasil (Processo: 403839/2021-1) “Possíveis efeitos da mudança do clima da idade contemporânea nos ciclos do carbono e da água da floresta Amazônica” pelo apoio financeiro.

6. Referências bibliográficas

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. (1983). NBR – 8112: Análise imediata: material volátil, cinzas, carbono fixo. ABNT.

Andrade, C.R.; Trugilho, P.F.; Hein, P.R.G., et al. (2012). Near infrared spectroscopy for estimating eucalyptus charcoal properties. Journal of Near Infrared Spectrosc, 20, 657-666.

ASTM - American Society for Testing and Materials, (2021). D2015-00: Annual Book of ASTM Standards, Section 4: Construction, Volume 04.10: Wood, ASTM.

Bianchini L., A. Colantoni, R. Venanzi, L., et al. (2025). Physicochemical properties of forest wood biomass for bioenergy application: a review. Forests, 16, 702.

Costa Junior, S.; Silva, D.; Behling, A., et al. (2021). Propriedades energéticas da biomassa de *A. mearnsii* em diferentes idades e locais. Scientia Forestalis, 49, e3406.

Erramuspe, I., Arciniegas, L., Caicedo, C., et al. (2025). Advancing biomass charac

terization: near-infrared spectroscopy and chemometrics in modern nondestructive wood analysi. Proceedings: 23rd INTEWS, São Paulo, Brazil. https://www.ndt.net/?id=30534

Eugenio da Silva, C., Nascimento, C. S., Freitas, J. A., et al. (2024). Application of infrared spectroscopy in the identification of fallen trees from the Amazon rainforest (Myristicaceae). Forest Science, 70(2), 102–112. https://doi.org/10.1093/forsci/fxae001

Florsheim, S. M. B., Ribeiro, A. P., Longui, E. L., et al. (2020). Identificação macroscópica de madeiras comerciais do Estado de São Paulo. Instituto Florestal.

Freitas, J., & Vasconcellos, F. (2019). Identificação de madeiras da Amazônia, INPA.

Gmach, F.., Jacobowski, L.., Bonfatti Júnior, E. A., et al. (2023). Performance of visible and near-infrared spectroscopy to predict the energetic properties of wood. Maderas. Ciencia Y Tecnología, 26, e1124. https://doi.org/10.22320/s0718221x/2024.11

Javier-Astete R., Melo, J. Jimenez-Davalos, J., et al. (2023). Classification of amazonian fast growing tree species and wood chemical determination by FTIR and multivariate analysis, Scientific Reports, 13, 7827.

Nascimento, C. S., Andrade, J. C., Eugenio da Silva, C., et al. (2026). A non-destructive approach using spectral fingerprinting and chemometrics in the authentication and quality prediction of fallen tree wood. Microchemical Journal, 225, 117971.

Nascimento, C. S., Cruz, I. A., Nascimento, C. C., et al. (2023). Technological properties of wood from small diameter in an area of forest exploitation of reduced impact in the tropical forest. European Journal of Forest Research, 142(3), 1–15.

Schimleck, L.R.; Mora, C., & Daniels, R.F. (2003). Estimation of the physical wood properties of green Pinus taeda radial samples by near infrared spectroscopy. Canadian Journal of Forest Research, 33, 2297- 2305. https://doi.org/10.1139/x03-173

Schwanninger, Rodrigues, J., & Fackler, K. (2011). A review of band assignments in NIR spectra of wood and wood components. J Near Infrared Spectroscop, 19(5), 287–308.

Shrestha, B.; Posom, J.; Sirisomboon, P., et al. (2023). Comprehensive assessment of biomass properties for energy usage using near-infrared spectroscopy and spectral multi-preprocessing techniques. Energies. 16, 5351. https://doi.org/10.3390/en16145351

Silva, D.A.; Almeida, V.C.; Viana, L.C.; et al. (2014). Avaliação das propriedades energéticas de resíduos de madeiras tropicais com uso do NIR. Floresta Ambiente, 21, 561-8.

Tsuchikawa, S., Inagaki, T., & Ma, T. (2023). Application of near-infrared spectroscopy to forest and wood products. Current Forestry Reports, 9, 401–412.

Wang, X. (2021). Recent advances in nondestructive evaluation of wood: In-forest wood quality assessments. Forests, 12, 949. https://doi.org/10.3390/f12070949

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Estimativas das propriedades do carvão vegetal de espécies da Amazônia em função do gradiente de densidade aparente da madeira

Adriano Reis Prazeres Mascarenhas[1]; Thiago Henrique Nandi de Matos[1]; Eduardo Afonso Ribeiro[1]; Thiago Cardoso Silva[1]; Fábio Henrique Della Justina do Carmo[1]; Paulo Ricardo Gherardi Hein[2]; Dayane Targino de Medeiros[2]; Aylson Costa Oliveira[3]

[1] Universidade Federal de Rondônia
[2] Universidade Federal de Lavras
[3] Universidade Federal de Mato Grosso

Resumo: A variabilidade de espécies usadas na produção de carvão vegetal com resíduos madeireiros amazônicos dificulta a padronização do carvão vegetal. Objetivou-se ajustar e avaliar modelos globais para estimar a densidade aparente do carvão (DAC), carbono fixo (CF), materiais voláteis (MV), cinzas, rendimento gravimétrico (RG), rendimento volumétrico (RV) e poder calorífico superior (PCS) em função do gradiente de densidade aparente da madeira (DAM) de sete espécies amazônicas. Empregou-se as análises de componentes principais, correlação de Pearson e regressões. Os dois primeiros componentes principais explicaram 69,54% da variância total e indicaram colinearidade entre DAM, DAC e o RG. A DAM apresentou relação direta com a DAC e o RG e relação inversa com o teor de cinzas. Os modelos quadráticos apresentaram os melhores ajustes para estimar a DAC, o RG e RV e o PCS do carvão. A estimativa de DAC foi mais precisa utilizando a função quadrática, com R^2 ajustado de 0,94 e Syx de 34,6 kg/m³. Para RV e o PCS, os R^2 ajustados foram 0,46 e 0,50, respectivamente. A densidade aparente da madeira pode subsidiar a previsão de propriedades do carvão vegetal, embora a ampliação do banco de dados seja necessária para reduzir vieses.

Palavras-chave: Biocombustível; Poder calorífico; Pirólise.

Estimates of charcoal properties of Amazonian species as a function of the wood apparent density gradient

Abstract: The variability among species used for charcoal production from Amazonian wood residues hinders charcoal standardization. This study aimed to fit and evaluate global models for estimating charcoal apparent density (CAD), fixed carbon (FC), volatile matter (VM), ash content, gravimetric yield (GY), volumetric yield (VY), and higher heating value (HHV) as a function of the wood apparent density (WAD) gradient of seven Amazonian species. Principal component analysis, Pearson correlation analysis, and regression analyses were performed. The first two principal components explained 69.54% of the total variance and indicated collinearity among WAD, CAD, and GY. WAD was directly related to CAD and GY and inversely related to ashes. Quadratic models provided the best fits for estimating charcoal CAD, GY, VY, and HHV. CAD was estimated more accurately using the quadratic function, with an adjusted R^2 of 0.94 and a Syx of 34.6 kg/m³. For VY and HHV, the adjusted R^2 values were 0.46 and 0.50, respectively. Wood apparent density can support the prediction of charcoal properties, although expanding the database is necessary to reduce bias.

Keywords: Biofuel; Energy density; Pyrolysis.

1. Introdução

Estimativas indicam que na Amazônia existem mais de 16 mil espécies de árvores (Steege et al. 2013), das quais, no Brasil, por volta de 600 espécies são exploradas com a finalidade de obtenção de madeira serrada (IBAMA, 2026). No entanto, o rendimento no processamento de toras é baixo, situando-se entre 35% e 40%, gerando grandes quantidades de resíduos na forma de serragem, costaneiras, refilos e destopo (Stragliotto et al. 2025).

Estes resíduos são utilizados para fornecimento energético em fornos de combustão direta para secadores de grãos e caldeiras e na produção de carvão vegetal para residências e polos siderúrgicos (Soteli et al., 2023; Lima et al., 2023). Porém, a grande variabilidade de espécies dificulta a previsibilidade de padronização do carvão vegetal, destacando a necessidade de recursos que permitam predizer suas características em função da qualidade da madeira utilizada como matéria-prima (Lima et al. 2022; Santos et al., 2025).

Assim, o uso de modelos de regressão linear elaborados a partir da correlação entre as propriedades físicas, químicas e anatômicas das madeiras com o teor de carbono fixo, materiais voláteis, cinzas, rendimento gravimétrico, rendimento volumétrico e poder calorífico tem sido explorado para maior compreensão do processo de pirólise, visando aumentar o rendimento energético do carvão vegetal (Couto et al., 2023).

Entretanto, nas serrarias, os resíduos madeireiros são provenientes de diversas espécies, cujas propriedades químicas, físicas e anatômicas diferem consideravelmente, o que dificulta sua segregação operacional e afetam diretamente a qualidade do carvão vegetal (Lima et al., 2023; Soares et al., 2025). Nesse contexto, o desenvolvimento de modelos matemáticos capazes de estimar as propriedades do carvão vegetal com base em gradientes de densidade da madeira de diferentes espécies tem potencial para otimizar o controle e a eficiência da produção de carvão vegetal na Amazônia.

Baseado na hipótese de que a densidade, o rendimento, os parâmetros da análise imediata e o poder calorífico superior do carvão vegetal variam em função de um gradiente de densidade aparente da madeira, objetivou-se ajustar e avaliar modelos globais para estimar as propriedades do carvão vegetal produzidos com as madeiras de angelim-pedra (*Hymenolobium pulcherrimum* Ducke), faveira-ferro (*Dinizia excelsa* Ducke), freijó (*Cordia goeldiana* Huber), guariúba (*Clarisia racemosa* Ruiz & Pav.), jatobá (*Hymenaea parvifolia* Huber), paricá (*Schizolobium parahyba* var. *amazonicum* (Huber ex Ducke) Barneby) e pequi (*Caryocar villosum* (Aubl.) Pers.).

2. Material e métodos

Obtenção, preparo e características das madeiras

As madeiras de angelim-pedra, faveira-ferro, freijó, guariúba, jatobá, paricá e pequi foram obtidas em indústria madeireira na cidade de Itapuã do Oeste, Rondônia. O material foi extraído da Floresta Nacional do Jamari por meio de exploração via Plano de Manejo Florestal Sustentável.

As madeiras de paricá e freijó foram obtidas a partir de árvores colhidas com 19 anos de idade. As árvores foram cultivadas em sistema agroflorestal em renques duplos no espaçamento 5 m x 2,5 m na estação experimental da Comissão Executiva do Plano da Lavoura Cacaueira localizada na cidade de Ouro Preto do Oeste, Rondônia.

Com as madeiras, foram produzidas amostras prismáticas com dimensões de 5 cm x 2,5 cm x 2,5 cm (comprimento x espessura x largura). Na sequência, determinou-se a densidade aparente da madeira (DAM) por meio da razão entre massa e volume das amostras em umidade de 12~15%, conforme indicado na norma NBR 7190-2/2022 (ABNT, 2022). Em seguida, as madeiras foram classificadas de acordo com a densidade em baixa (<400 kg/m³), média (400-750 kg/m³) e alta (>750 kg/m³), conforme indicado por Ruffinatto et al. (2015) e apresentado na Tabela 1.

Tabela 1 – Classificação conforme o intervalo de densidade aparente da madeira (DAM) das madeiras avaliadas (n = 12)

Espécie	Classe de densidade	DAM (kg/m³)
Angelim pedra (*Hymenolobium pulcherrimum* Ducke)	Alta	763,57 ± 18,79
Faveira ferro (*Dinizia excelsa* Ducke)	Alta	1142,99 ± 77,42
Freijó (*Cordia goeldiana* Huber)	Média	558,03 ± 16,62
Guariúba (*Clarisia racemosa* Ruiz & Pav.)	Média	631,57 ± 64,79
Jatobá (*Hymenaea parvifolia* Huber)	Alta	872,11 ± 167,73
Paricá (*Schizolobium parahyba* var. *amazonicum* (Huber ex Ducke) Barneby)	Baixa	343,36 ± 24,78
Pequi (*Caryocar villosum* (Aubl.) Pers.)	Alta	763,23 ± 52,06

Valores após "±" indicam o desvio-padrão.

Obtenção, preparo e características do carvão vegetal

As amostras utilizadas para determinação da densidade aparente foram envolvidas em lâmina de alumínio, de modo que nenhuma de suas faces permanecesse exposta ao ar atmosférico. Posteriormente, as amostras foram acondicionadas em forno mufla e submetidas a uma rampa de carbonização dividida em cinco fases com a temperatura final de 450 °C, conforme a metodologia descrita por Nones et al. (2015).

Em seguida, determinou-se a densidade aparente do carvão (DAC) por meio da metodologia descrita por Santos et al. (2025). Ainda, obteve-se o rendimento gravimétrico (RG), pela razão entre a massa do carvão e a massa inicial da madeira, e o rendimento volumétrico (RV), pela razão entre o volume de madeira e o volume de carvão. As massas foram obtidas com balança analítica e os volumes por meio do uso de paquímetro.

Utilizando a norma ASTM D1762-84 (ASTM, 2021), determinou-se os teores de carbono fixo (CF), materiais voláteis (MV) e cinzas. O poder calorífico superior (PCS) foi estimado a partir do modelo desenvolvido por Parikh et al. (2005). Para todas as análises foram utilizadas três amostras de cada espécie.

Análises estatísticas

Para avaliar a colinearidade entre as variáveis e a similaridade entre os carvões das diferentes espécies, aplicou-se a análise de componentes principais (PCA). Os autovalores foram utilizados para determinar a proporção da variância explicada por cada componente principal, enquanto os autovetores foram empregados para avaliar a contribuição das variáveis para a formação dos componentes. A similaridade entre os carvões foi analisada com base na distribuição dos escores das espécies no espaço multivariado.

Em seguida, aplicou-se a análise de correlação de Pearson, considerando os níveis de significância de $p < 0,01$ e $p < 0,05$, para avaliar a direção e a intensidade das associações lineares entre as variáveis da madeira (DAM) e do carvão (DAC, CF, MV, cinzas, RG, RV e PCS) e subsidiar a seleção das relações utilizadas no ajuste das equações de regressão.

Posteriormente, os dados do carvão vegetal em função da DAM foram analisados por meio da regressão de mínimos quadrados, para obter equações globais para as espécies, com o objetivo de estimar DAC, CF, MV, cinzas, RG, RV e PCS. Para cada propriedade avaliada, os modelos foram selecionados com base na significância dos coeficientes da equação ($p < 0,01$ ou $p < 0,05$), nos maiores coeficientes de determinação (R^2) e no menor erro padrão da estimativa (Syx). Todas as análises foram realizadas utilizando 12 observações, sendo três por espécie, no *software* R 4.5.3.

3. Resultados e discussão

Análise de componentes principais e correlação de Pearson

As componentes 1 e 2 explicaram 37,5% e 32,04% da variância, respectivamente (Figura 1a). Observou-se que as variáveis DAM, DAC e RG apresentaram colinearidade entre si. No espaços multivariados superior e inferior esquerdo, foram observadas maiores dispersões para os scores dos carvões de pequi e freijó, ao passo que para o carvão de paricá observou-se maior homogeneidade e com maiores valores de cinzas e PCS. Já para o espaço multivariado superior direito, o carvão de faveira ferro também apresentou homogeneidade e distinguiu-se das outras espécies com contribuições de RG, CF e DAC.

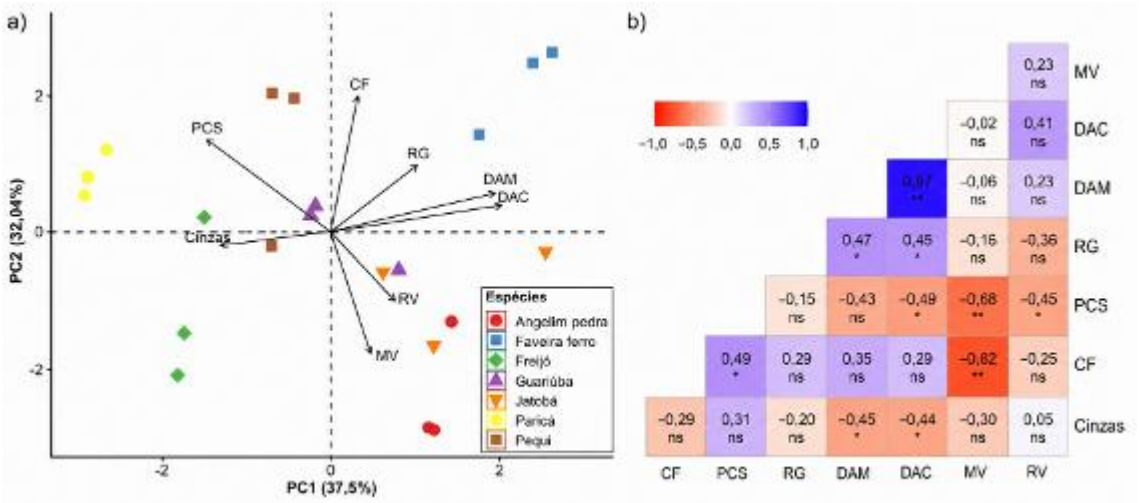


Figura 1 – a) Análise de componentes principais (PCA) e b) correlograma de Pearson da densidade aparente da madeira (DAM), densidade aparente do carvão (DAC), carbono fixo (CF), materiais voláteis (MV), cinzas, rendimento gravimétrico (RG), rendimento volumétrico (RV) e poder calorífico superior (PCS) das madeiras e dos carvões de angelim-pedra, faveira-ferro, freijó, guariúba, jatobá, paricá e pequi (n = 12).

Em relação ao multivariado inferior direto, observou-se que os carvões de angelim pedra e jatobá apresentaram maiores valores de MV e RV. Estas variáveis, por sua vez, foram colineares e inversamente proporcionais ao CF e PCS. O carvão de guariúba situou-se de forma intermediária entre os quadrantes do espaço multivariado.

Em relação as correlações entre variáveis, observou-se que a DAM foi diretamente proporcional à DAC e RG e apresentou correlação inversa com o teor de cinzas (Figura 1b). Considerando apenas as propriedades do carvão vegetal, as correlações negativas mais fortes ocorreram entre PCS e RV, PCS e MV, PCS e DAC, MV e CF, e DAC e teor de cinzas. Por outro lado, as correlações positivas mais fortes foram observadas entre PCS e CF e entre DAC e RG.

De modo geral, os resultados estão em consonância com a literatura, uma vez que carvões com maior teor de MV e menor teor de CF tendem a apresentar menor PCS. Lima et al. (2022), ao analisarem a qualidade de carvões de madeiras tropicais da Amazônia, explicaram que durante a pirólise, elevadas temperaturas podem levar à degradação térmica dos constituintes da madeira e promovem a liberação de compostos voláteis desfavorecendo a concentração de carbono na fração sólida e reduzindo o PCS.

Regressões para estimativas das propriedades do carvão vegetal

Considerando a função linear, apenas as equações ajustadas entre DAM e DAC, DAM e RG e DAM e PCS apresentaram coeficientes com significância para viabilizar as estimativas (Tabela 2). No entanto, considerando os critérios de seleção definidos para este trabalho, os melhores modelos, com maior R^2aj e menor Syx, foram obtidos por meio da função quadrática para estimar DAC, RG, RV e PCS.

Tabela 2 – Equações e métricas para estimativa da densidade aparente do carvão (DAC), carbono fixo (CF), materiais voláteis (MV), cinzas, rendimento gravimétrico (RG), rendimento volumétrico (RV) e poder calorífico superior (PCS) dos carvões em função da densidade aparente da madeira (DAM) de angelim-pedra, faveira-ferro, freijó, guariúba, jatobá, paricá e pequi (n = 12).

Equação	Unidade de medida	R^2 aj	Syx	p-valor
DAC = – 35,224815 + 0,558018 × DAM	kg/m³	0,94	36,17	<0,01*
CF = 65,718516 + 0,005894 × DAM	%	0,07	4,06	0,12ns
MV = 28,055255 – 0,001086 × DAM	%	0,01	4,36	0,79ns
Cinzas = 6,052580 – 0,004616 × DAM	%	0,17	2,30	0,06ns
RG = 31,926156 + 0,005345 × DAM	%	0,18	2,53	0,03**
RV = 1,256581 + 0,000196 × DAM	m³/m³	0,00	0,21	0,32ns
PCS = 28,694117 – 0,003698 × DAM	MJ/kg	0,14	1,98	0,05**
DAC = – 135,395224 + 0,851770 × DAM – 0,0001930968 × DAM²	kg/m³	0,94	34,06	<0,01*
CF = 77,465018 – 0,028552 × DAM + 0,0000226435 × DAM²	%	0,19	3,79	0,06ns
MV = 20,390691 + 0,021391 × DAM – 0,0000147749 × DAM²	%	0,01	4,33	0,53ns
Cinzas = 1,680226 + 0,008206 × DAM – 0,0000084285 × DAM²	%	0,19	2,27	0,06ns
RG = 38,116338 – 0,012808 × DAM + 0,0000119327 × DAM²	%	0,25	2,43	0,03**
RV = 0,227467 + 0,003214 × DAM – 0,0000019838 × DAM²	m³/m³	0,46	0,16	<0,01*
PCS = 37,899024 – 0,030692 × DAM + 0,0000177441 × DAM²	MJ/kg	0,50	1,50	<0,01*

Em que: R^2 aj = coeficiente de determinação ajustado, Syx = erro padrão da estimativa (unidade de medida da variável analisada) p-valor = probabilidade de significância dos coeficientes; *=significativo a 1% de probabilidade; **= significativo a 5% de probabilidade e ns = não significativo.

Considerando apenas as melhores equações, observou-se que a DAC apresentou menores variações para madeiras em que os valores de DAM estejam abaixo de 650 kg/m³ e

acima de 1050 kg/m³ (Figura 2a). Esta tendência também foi observada por Soares et al. (2025), ao verificaram que o R^2 entre a DAM e DAC obtido com dados de 12 espécies da Amazônia foi de 0,62.

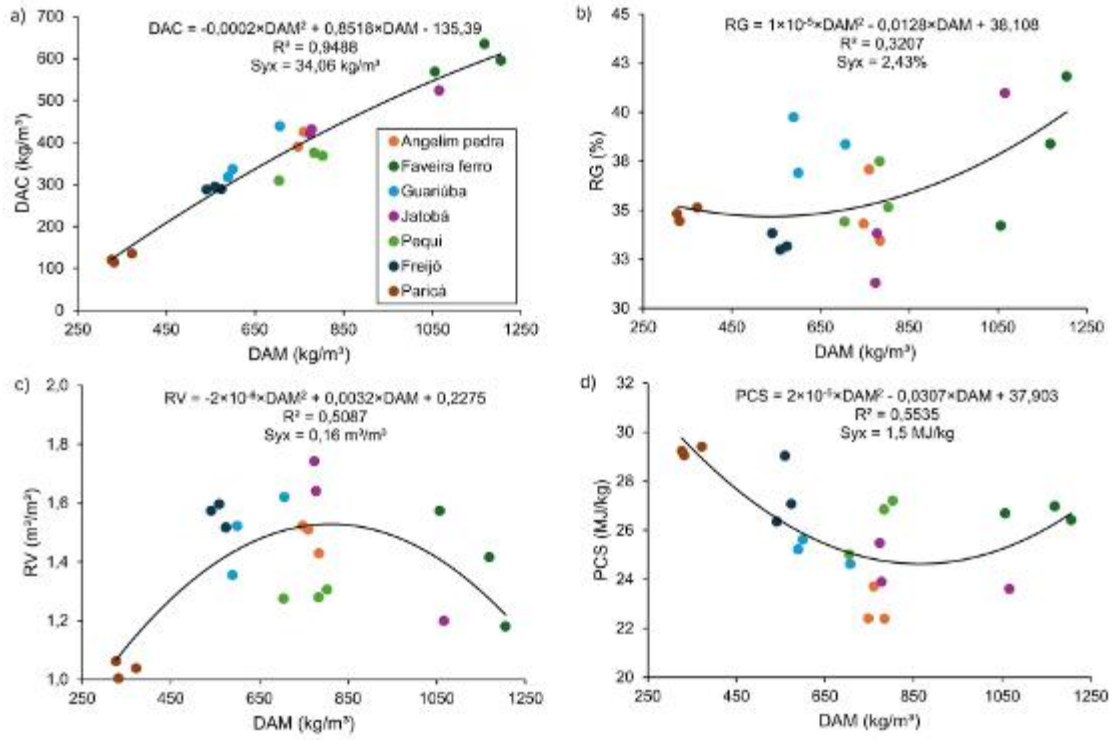


Figura 2 – Equações selecionadas para estimativa da a) densidade aparente do carvão (DAC), b) rendimento gravimétrico (RG), c) rendimento volumétrico (RV) e d) poder calorífico superior (PCS) dos carvões em função da densidade aparente da madeira (DAM) de angelim-pedra, faveira-ferro, freijó, guariúba, jatobá, paricá e pequi (n = 12).

Em relação as equações de RG e RV, as menores dispersões entre os valores estimados e observados situaram-se para madeiras com densidade abaixo de 450 kg/m³ (Figura 2b e 2c). Por fim, as estimativas de PCS do carvão foram menos imprecisas para as madeiras de baixa e de alta densidade (Figura 2d).

A maior diversidade de espécies com madeiras de média densidade, em função da provável variabilidade das propriedades químicas e anatômicas, podem ter afetado em diferentes magnitudes a qualidade do carvão vegetal e, consequentemente, as correlações estabelecidas com a DAM. Características semelhantes foram descritas por Soares et al. (2025), os quais verificaram que madeiras de maior densidade nem sempre resultam em carvões com maior densidade porque as características anatômicas, como a fração e a espessura da parede celular e o diâmetro do lume das fibras, podem superestimar ou subestimar a DAC.

Para melhorar a compreensão do efeito da variabilidade da madeira nas estimativas das propriedades do carvão, recomenda-se ampliar o banco de dados com a inclusão de maior diversidade de espécies de baixa e alta densidade, a fim de incorporar aos modelos variações inerentes destas classes e reduzir o viés.

4. Conclusões

Com exceção da DAC, as estimativas foram menos precisas para madeiras de média densidade (450–750 kg/m³). Ou seja, a DAM permitiu estimar a DAC com maior precisão e, em menor nível, o RV e o PCS.

Ainda, a DAM permitiu estimar com maior precisão a DAC ($R^2aj = 0,94$). Para o RV e o PCS, os modelos ajustados apresentaram capacidade preditiva intermediária. No que diz respeito ao RG, a correlação com DAM apresentou baixa capacidade preditiva. Finalmente, para CF, MV e teor de cinzas não foram obtidos modelos com coeficiente de predição significativos.

5. Agradecimentos

Agradecemos ao Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia (INPA) pela concessão de recursos financeiros por meio do Projeto INCT Madeiras da Amazônia 3. Agradecemos também à Pró-Reitoria de Pesquisa da Universidade Federal de Rondônia (UNIR) pela concessão de recursos financeiros por meio dos Editais nº 001/2023/DPESQ/PROPESQ/UNIR e nº 003/2023/DPESQ/PROPESQ/UNIR.

Agradecemos, ainda, à Fundação Rondônia de Amparo ao Desenvolvimento das Ações Científicas e Tecnológicas e à Pesquisa do Estado de Rondônia (FAPERO) pela concessão de recursos financeiros por meio da Chamada Pública nº 005/2023 – FAPERO/DITT, conforme os Termos de Outorga nº 163/2024 e nº 190/2024.

6. Referências bibliográficas

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2022). *Projeto de estruturas de madeira — Parte 2: Métodos de ensaio para classificação visual e mecânica de peças estruturais de madeira* (ABNT NBR 7190-2:2022). Associação Brasileira de Normas Técnicas.

ASTM - American Society for Testing and Materials. (2021). *Standard test method for chemical analysis of wood charcoal* (ASTM D1762-84). ASTM International.

Couto, A. M., Monteiro, T. C., Trugilho, P. F., Lima, J. T., Silva, J. R. M., Napoli, A., & Almeida, D. P. (2023). Influence of physical-anatomical wood variables on charcoal physical–mechanical properties. *Journal of Forestry Research, 34*, 531–538. https://doi.org/10.1007/s11676-022-01462-9

IBAMA - Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis. (2026). Painéis analíticos da gestão madeireira. Gov.br. https://www.gov.br/ibama/pt-br/assuntos/biodiversidade/flora-e-madeira/paineis-analiticos-da-gestao-madeireira-1

Parikh, J., Channiwala, S. A., & Ghosal, G. K. (2005). A correlation for calculating HHV from proximate analysis of solid fuels. Fuel, 84(5), 487–494. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2004.10.010

Ruffinatto, F., Crivellaro, A., & Wiedenhoeft, A. C. (2015). Review of macroscopic features for hardwood and softwood identification and a proposal for a new character list. *IAWA Journal, 36*(2), 208–241. https://doi.org/10.1163/22941932-00000096

Santos, P. L., Lima, M. D. R., Bufalino, L., Hein, P. R. G., Silveira, E. A., Candelier, K., Trugilho, P. F., & Protásio, T. P. (2025). Exploring the effects of slow pyrolysis temperature and species on the quality of charcoal from Amazonian woody wastes. *Renewable Energy, 240*, 122257. https://doi.org/10.1016/j.renene.2024.122257

Soares, C. R. A., Lima, M. D. R., Marques, J. D., Santos, E. V., Bufalino, L., Silva, M. G., Goulart, S. L., Melo, L. E. L., & Protásio, T. P. (2025). Using wood anatomical characteristics and physicochemical properties to segregate Amazonian wood wastes for charcoal production. *Acta Amazonica, 55*, e55ag24315. https://doi.org/10.1590/1809-4392202403154

Soteli, R. P., Rodrigues, L. D. O., Pereira, B. L. C., Protásio, T. P., Carneiro, A. C. O., & Oliveira, A. C. (2023). Management and classification of waste from the primary processing of Brazilian Amazon tropical wood for energy-generation purposes. Environment, Development and Sustainability, 26(6), 14065–14094. https://doi.org/10.1007/s10668-023-03179-z

Steege, H., et al. (2013). Hyperdominance in the Amazonian tree flora. Science, 342(6156), 1243092. https://doi.org/10.1126/science.1243092

Stragliotto, M. C., Oliveira, A. C., Lengowski, E. C., Arruda, T. P. M. de, Silva, J. R. M. da, & Pereira, B. L. C. (2025). Log quality and lumber yield for export of five species from the Brazilian Amazon. *Environment, Development and Sustainability, 27*(5), 10059–10082. https://doi.org/10.1007/s10668-023-04298-3

Lima, M. D. R., Massuque, J., Bufalino, L., Trugilho, P. F., Ramalho, F. M. G., Protásio, T. P., & Hein, P. R. G. (2022). Clarifying the carbonization temperature effects on the production and apparent density of charcoal derived from Amazonia wood wastes. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 166*, 105636. https://doi.org/10.1016/j.jaap.2022.105636

Lima, M. D. R., Bufalino, L., Scatolino, M. V., Hein, P. R. G., Carneiro, A. C. O., Trugilho, P. F., & Protásio, T. P. (2023). Segregating Amazonia logging wastes from sustainable forest management improves carbonization in brick kilns. Renewable Energy, 211, 772–788. https://doi.org/10.1016/j.renene.2023.04.126

Nones, D. L., Brand, M. A., Cunha, A. B., Carvalho, A. F., & Weise, S. M. K. (2015). Determinação das propriedades energéticas da madeira e do carvão vegetal produzido a partir de *Eucalyptus benthamii*. *Floresta, 45*(1), 57–64. https://doi.org/10.5380/rf.v45i1.30157

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Estimativas energéticas de resíduos madeireiros de *Brosimum rubescens* Taub. em área sob concessão florestal na Amazônia

Thiago Cardoso Silva[1]; Erleide Paula Santos Veríssimo[1]; Beatriz Aparecida Nunes Simão[1]; Karen Janones da Rocha[1]; Fábio Henrique Della Justina do Carmo[1]; Thiago de Paula Protásio[2]; Niro Higuchi[3]; Adriano Reis Prazeres Mascarenhas[1]

[1] Universidade Federal de Rondônia
[2] Universidade Federal de Lavras
[3] Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia

Resumo: O objetivo deste trabalho foi estimar a produção de energia a partir dos resíduos gerados na colheita e no processamento da madeira de Muirapiranga (*Brosimum rubescens* Taub.), proveniente de área sob concessão florestal na Floresta Nacional do Jamari, em Rondônia, correlacionando a possíveis aplicações em estabelecimentos representativos do estado. Para tanto, determinou-se a densidade básica dos resíduos e estimou-se da densidade energética e a produção anual de energia térmica e elétrica. Adicionalmente, buscou-se relacionar a energia estimada a possíveis aplicações em estabelecimentos representativos de Rondônia. A produção energética anual estimada foi de 2.023.111,11 kWh, obtida a partir de aproximadamente 170,97 m³ ano^{-1} de resíduos, apresentando potencial para suprir o consumo anual de cerca de 780 residências, 74 aviários ou 916 pocilgas. Isso evidencia a capacidade de aproveitamento energético dos resíduos gerados durante a colheita e o processamento da espécie, demonstrando seu potencial como fonte renovável de energia para diferentes segmentos consumidores.

Palavras-chave: Biomassa energética; Manejo Florestal Sustentável; Resíduos de serraria.

Energy estimates for wood waste from *Brosimum rubescens* Taub. in a forest concession area in the Amazon

Abstract: The objective of this study was to estimate energy production from waste generated during the harvesting and processing of Muirapiranga wood (*Brosimum rubescens* Taub.) from an area under a forest concession in the Floresta Nacional do Jamari, in Rondônia, correlating to applications in representative establishments across the state. To this end, the basic density of the residues was determined, and the energy density and annual production of thermal and electrical energy were estimated. Additionally, an effort was made to relate the estimated energy to potential applications in representative facilities in Rondônia. The estimated annual energy production was 2,023,111.11 kWh, obtained from approximately 170.97 m³ year^{-1} of residues, and had the potential to meet the annual consumption of about 780 households, 74 poultry houses, or 916 pigsties. These results highlight the potential for energy recovery from the waste generated during the harvesting and processing of this species, demonstrating its potential as a renewable energy source for various consumer sectors.

Keywords: Energy biomass; Sustainable Forest Management; Sawmill waste.

1. Introdução

A produção de madeira tropical constitui uma atividade econômica relevante para a Amazônia brasileira, especialmente quando conduzida em áreas submetidas a planos de manejo florestal e a contratos de concessão florestal. Nesse contexto, as concessões possibilitam o aproveitamento econômico de recursos madeireiros em florestas públicas sob critérios técnicos de planejamento, rastreabilidade e manutenção da cobertura florestal (Brasil, 2023). Entretanto, mesmo em sistemas de manejo planejado, apenas parte do volume originalmente explorado é incorporada aos produtos de madeira, enquanto grande parte da biomassa permanece na floresta ou geram grandes quantidades de resíduo durante o processamento industrial (DeArmond et al., 2023).

A geração desses materiais está associada às etapas de derrubada, traçamento, arraste, desdobro e beneficiamento da madeira. Tais resíduos representam uma fração relevante da biomassa mobilizada pela colheita, com implicações para a eficiência do aproveitamento florestal (Soteli et al., 2024). Dessa forma, a quantificação e a destinação adequada desses resíduos são etapas importantes para aumentar a eficiência no uso dos recursos florestais e reduzir perdas ao longo da cadeia produtiva do setor madeireiro.

Quando não aproveitados, os resíduos madeireiros são frequentemente acumulados, queimados sem recuperação energética ou deixados para decomposição, enquanto seu uso como matéria-prima favorece a economia circular e ajuda na quantidade de biomassa necessária para suprir as demandas por energia (Saravanan et al., 2025). Na Amazônia, esses resíduos apresentam elevado potencial para geração descentralizada de energia, especialmente em regiões dependentes de combustíveis fósseis ou sistemas elétricos isolados. Entretanto, sua utilização é condicionada à elevada heterogeneidade das madeiras amazônicas, cujas diferenças em densidade, composição química, poder calorífico e comportamento térmico influenciam diretamente o desempenho energético dessa biomassa (Moreira et al., 2025). Estudos também demonstram que espécies mais densas tendem a armazenar maior quantidade de energia por unidade de volume e que a segregação dos resíduos pode aumentar a uniformidade e a eficiência desses resíduos como combustível (Bianchini et al., 2025; Silva et al, 2025).

Entre as espécies comerciais da Amazônia, *Brosimum rubescens* Taub., conhecida como Muirapiranga, destaca-se pela madeira de elevada densidade e por sua utilização em produtos de maior valor agregado (Lima et al., 2024). Porém, seu processamento também gera resíduos que, embora não aproveitados como madeira serrada, podem conservar parte das características físicas e energéticas da matéria-prima original. A valorização dessa biomassa residual em energia pode melhorar o rendimento integral da cadeia produtiva, reduzir o acúmulo de resíduos

nas unidades industriais e complementar a oferta energética em propriedades rurais, agroindústrias e estabelecimentos comerciais (Moreira et al., 2025; Silva et al, 2025).

Apesar do avanço das pesquisas sobre a caracterização energética de resíduos madeireiros de espécies da Amazônia, ainda são limitadas as estimativas direcionadas a individuais a nível de espécies e vinculadas à produção madeireira em áreas sob concessão florestal. Essa abordagem considera que a disponibilidade energética é determinada tanto pelas propriedades da madeira quanto pelo volume explorável, volume colhido, rendimento industrial e geração de resíduos na floresta e na indústria. Diante disso, o objetivo deste trabalho foi estimar a produção de energia a partir dos resíduos gerados na colheita e no processamento da madeira de Muirapiranga. proveniente de área sob concessão florestal na Floresta Nacional do Jamari, em Rondônia. Adicionalmente, buscou-se relacionar a energia estimada a possíveis aplicações em estabelecimentos representativos do estado de Rondônia.

2. Material e métodos

Coleta das Amostras

Uma amostra representativa de cerca de 10 kg de resíduos na forma de serragem do processamento primário da madeira de Muirapiranga foi coletada na unidade industrial da MADEFLONA Industrial Madeireira, em Itapuã do Oeste/RO. A espécie foi escolhida de acordo com a disponibilidade de material no momento da coleta. Esse material foi mantido em sacos de coleta devidamente lacrados e encaminhados ao laboratório para determinação da densidade básica.

Determinação da Densidade Básica dos Resíduos

A densidade básica dos resíduos foi determinada a partir do método do máximo teor de umidade (Equação 1), de acordo com a NBR 11941 (ABNT, 2003). Dessa forma, inicialmente as partículas foram saturadas em água aplicando vácuo, com obtenção da massa úmida após saturação plena. Em seguida, as partículas foram levadas à estufa de secagem e circulação de ar regulada à 105ºC ± 2ºC até obter massa contante. Foi determinada a densidade básica de seis amostras.

$$\rho_b = \frac{1}{\left(\frac{m1}{m2}\right) - 0{,}346} * 1000 \qquad \text{(Equação 1)}$$

Em que: ρ_b = densidade básica dos resíduos (kg m^{-3}); m1 = massa úmida da amostra (g); m2 = massa da amostra seca em estufa a 105ºC ± 2ºC (g).

Estimativas da Densidade Energética dos Resíduos

Para estimativas da produção energética dos resíduos, a densidade energética (DE) foi estimada utilizando a equação proposta por Silva e Vale (2018), cujos parâmetros da modelagem apresentou coeficiente de determinação (R^2) de 0,98 e erro-padrão relativo da estimativa (Syx%) de 2,15 (Equação 2). A estimativa da densidade energética foi obtida a partir das variáveis preditoras definidas pelos autores, sendo este o parâmetro energético adotado nas análises do presente estudo. Por fim, os valores foram convertidos para MJ utilizando o fator de conversão 1 J = 0,2388 cal (EPE, 2026b).

$$DE = -1{,}25645 + 19{,}2195 * \rho_b \quad \text{(Equação 2)}$$

Em que: DE = Densidade energética da biomassa (Mcal m^{-3}); ρ_b = densidade básica dos resíduos (kg m^{-3}).

Características da Geração de Resíduos em Área de Concessão Florestal em Rondônia

Para estimativas da quantidade de resíduos gerados em área sob concessão florestal na Amazônia, levou-se em consideração os dados apresentados pela MADEFLONA Industrial Madeireira disponíveis no Plano Operacional Anual, referente ao ano de 2025 (MADEFLONA, 2025), cujas atividades são desenvolvidas na Floresta Nacional do Jamari. Os dados são referentes à produção da Unidade de Manejo Florestal (UMF) 1, na Unidade de Produção Anual (UPA) 23, utilizada para a produção de madeira em 2025 (Tabela 1).

Tabela 1 – Parâmetros de produção de madeira na UPA 23, UMF 1, na Floresta Nacional do Jamari, em 2025

Parâmetros	Quantidade
Volume geral de madeira produzida	25.102,8017 m³
Volume total de madeira de Muirapiranga (*Brosimum rubescens* Taub.)	373,4935 m³
Volume de madeira de Muirapiranga passível de exploração	263,0302 m³

Fonte: MADEFLONA (2025)

Em seguida, levou-se em consideração que todo esse volume passível de exploração foi devidamente colhido. A partir dela, aplicou-se o coeficiente de rendimento volumétrico de toras

e toretes para madeira serrada correspondente a 35% (IBAMA, 2016). Sendo assim, considerou-se o volume não convertido em madeira serrada como resíduo com potencial geração energética, correspondente a 170,96963 m³.

Estimativa da Produção Energética Anual e Aplicações em Rondônia

Por fim, foi estimada a produção energética anual utilizando esses resíduos (Equação 3). A energia térmica total foi convertida de MJ para kWh utilizando o fator de conversão recomendado pelo Ministério de Minas e Energia correspondente a 1 J = 277,8 x 10^{-9} kwh (EPE, 2026b).

$$PE = \frac{DE * 170{,}96963}{1000} \qquad \text{(Equação 3)}$$

Em que: PE = Produção energética anual da biomassa (GJ).

A estimativa do número potencial de estabelecimentos passíveis de atendimento foi fundamentada na seleção de segmentos representativos da estrutura produtiva do estado de Rondônia, abrangendo pequenas propriedades rurais, agroindústrias e estabelecimentos comerciais, definidos com base em sua relevância socioeconômica e na disponibilidade de informações sobre demanda energética. Para cada segmento, foram adotados valores médios de consumo de energia elétrica reportados na literatura especializada, os quais permitiram estabelecer a correspondência entre o potencial energético estimado a partir dos resíduos do processamento da madeira e o número teórico de unidades que poderiam ser supridas (Tabela 2).

Tabela 2 – Consumo médio mensal de energia em residência, aviário e pocilga

Estabelecimento	Consumo médio mensal (kWh)	Capacidade total (número de animais)	Referências
Residências	216	-	EPE (2026a)
Aviário	2.280	12.000	Abreu (2024)
Pocilga	184	150	Sarubbi et al. (2010)

Fonte: Santos (2025), adaptado.

Análises Estatísticas

Os dados referentes à densidade básica dos resíduos determinada e à densidade energética e à produção energética estimadas com os resíduos foram avaliados por meio de

estatística descritiva, por meio da média aritmética e do desvio padrão. As análises foram realizadas no programa Microsoft Office Excel.

3. Resultados e discussão

A densidade básica média dos resíduos caracteriza o material como madeira de média densidade e demonstra baixa variabilidade entre as amostras analisadas (Tabela 3). Essa estabilidade também foi observada para a densidade energética, indicando uniformidade do potencial energético da biomassa.

Tabela 3 – Parâmetros energéticos de resíduos da colheita e processamento da madeira de Muirapiranga (*Brosimum rubescens* Taub.) proveniente de área sob concessão florestal na Floresta Nacional do Jamari, em Rondônia

Parâmetros	Valores médios	Desvio padrão
Densidade básica dos resíduos	529,4 kg m^{-3}	4,78
Densidade energética	10.172,8 Mcal m^{-3}	91,90
Estimativa da produção anual de energia utilizando o volume de madeira passível de exploração	7.283,2 GJ	65,79
Estimativa da produção de energia elétrica	2.023.111,11 kWh	18.276,25

Como observado para estes resíduos, a média densidade básica evidenciou que estes materiais tendem a apresentar maior quantidade de energia armazenada por unidade volumétrica, favorecendo aplicações energéticas que dependem da coleta, do transporte, do armazenamento e da combustão de biomassa sólida. Essa tendência também foi observada por Silva e Vale (2018), cuja modelagem gerou a equação utilizada para estimar a densidade energética, e por estudos posteriores que demonstram forte correlação positiva entre densidade básica e densidade energética em espécies florestais amazônicas (Moreira et al., 2025; Silva et al., 2025).

Com base nas estimativas, observou-se que um material normalmente tratado como subproduto do processamento madeireiro pode representar uma fonte expressiva de energia renovável, contribuindo para aumentar o aproveitamento integral da matéria-prima e reduzir perdas ao longo da cadeia produtiva na Amazônia. Quando convertida para energia elétrica, a estimativa demonstra o potencial dos resíduos de Muirapiranga para abastecimento energético de propriedades rurais, agroindústrias e pequenos empreendimentos localizados na Amazônia

(Figura 1). Em regiões onde ainda existem limitações de acesso ao Sistema Interligado Nacional e elevada dependência de combustíveis fósseis, o aproveitamento energético desses resíduos pode contribuir para diversificar a matriz energética regional e reduzir custos operacionais, além de agregar valor econômico aos resíduos do manejo florestal sustentável.

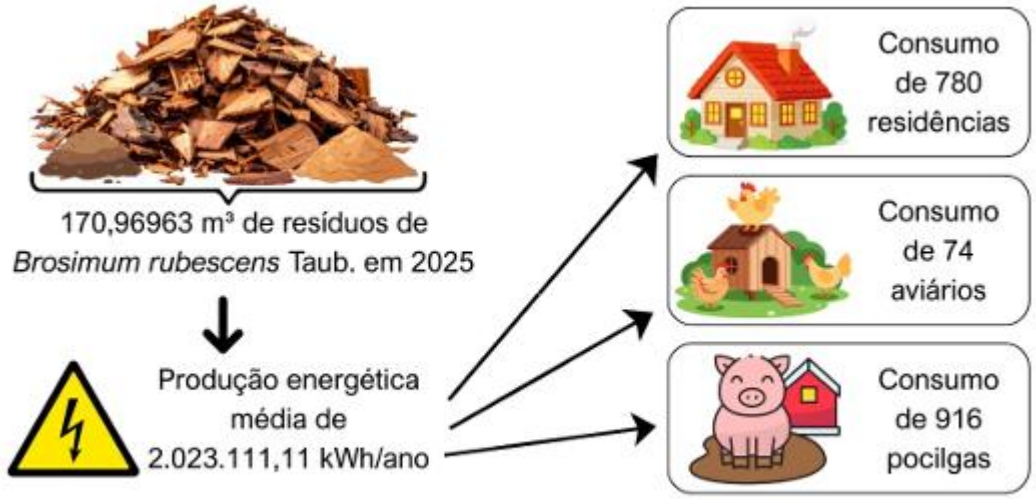


Figura 1 – Estimativas energéticas de resíduos da colheita e processamento da madeira de Muirapiranga (*Brosimum rubescens* Taub.) proveniente de área sob concessão florestal na Floresta Nacional do Jamari, em Rondônia.

Esses valores demonstram que uma única espécie madeireira explorada sob manejo florestal sustentável pode produzir quantidade significativa de energia elétrica a partir dos resíduos gerados durante a colheita e o processamento da madeira. O aproveitamento energético desses resíduos poderia suprir aproximadamente 780 residências, evidenciando seu potencial como fonte complementar de eletricidade e de valorização da biomassa residual em municípios amazônicos e comunidades rurais. No setor agropecuário, a capacidade de atender mais de 70 aviários ou 900 pocilgas reforça o potencial da biomassa residual como fonte energética para atividades com elevada demanda por eletricidade. Estes resíduos podem constituir uma fonte complementar de energia para sistemas de ventilação, iluminação, climatização, bombeamento de água e alimentação automatizada, reduzindo os custos operacionais, sobretudo em propriedades rurais ou comunidades afastadas dos grandes centros (Brandão et al., 2021).

Esse resultado possui relevância particular para a Amazônia, onde parte das atividades produtivas ainda enfrenta elevados custos energéticos em razão das grandes distâncias, da limitada infraestrutura elétrica e da dependência de combustíveis fósseis em diversas

localidades (Caçapietra et al., 2026). Nesse contexto, a utilização dos resíduos de Muirapiranga oriundos do manejo florestal sustentável promove simultaneamente maior eficiência no aproveitamento da matéria-prima, gestão da economia circular, redução do passivo ambiental associado ao acúmulo de resíduos e diversificação das fontes renováveis de energia disponíveis na região.

4. Conclusões

Os resíduos gerados durante a colheita e o processamento de Muirapiranga apresentam potencial para produção de energia em áreas sob concessão florestal na Amazônia. Os resultados demonstram que o aproveitamento energético desses resíduos constitui um direcionamento para agregar valor à cadeia produtiva da madeira, promover menor impacto ambiental, ampliar o aproveitamento da biomassa e contribuir para a oferta de energia renovável na região amazônica, sobretudo em Rondônia.

5. Agradecimentos

Agradecemos ao Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia (INPA) pela concessão de recursos financeiros por meio do Projeto INCT Madeiras da Amazônia 3. Agradecemos também à Pró-Reitoria de Pesquisa da Universidade Federal de Rondônia (UNIR) pela concessão de recursos financeiros por meio dos Editais nº 001/2023/DPESQ/PROPESQ/UNIR e nº 003/2023/DPESQ/PROPESQ/UNIR. Agradecemos, ainda, à Fundação Rondônia de Amparo ao Desenvolvimento das Ações Científicas e Tecnológicas e à Pesquisa do Estado de Rondônia (FAPERO) pela concessão de recursos financeiros por meio da Chamada Pública nº 005/2023 – FAPERO/DITT, conforme os Termos de Outorga nº 163/2024 e nº 190/2024.

6. Referências bibliográficas

Abreu, P. G. (2024). Demanda de energia elétrica na avicultura. Avicultura Industrial, 115(1331), 18-25.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2003). NBR 11941: madeira – determinação da densidade básica. ABNT.

Bianchini, L., Colantoni, A., Venanzi, R., Cozzolino, L., & Picchio, R. (2025). Physicochemical properties of forest wood biomass for bioenergy application: A review. Forests, 16(4), 702. https://doi.org/10.3390/f16040702

Brandão, P. C., Souza, A. L., Rousset, P., Simas, F. N. B., & Mendonça, B. A. F. (2021). Forest biomass as a viable pathway for sustainable energy supply in isolated villages of Amazonia. Environmental Development, 37, 100609. https://doi.org/10.1016/j.envdev.2020.100609

Brasil. (2023). Lei nº 14.590, de 24 de maio de 2023. https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2023-2026/2023/lei/l14590.htm

Caçapietra, R., Macêdo, W., Nolden, C., Galhardo, M., Penfield, A., & Williamson, S. (2026). Electricity access in the Brazilian Amazon: governance and lived experience. Energy for Sustainable Development, 93, 102039. https://doi.org/10.1016/j.esd.2026.102039

Conselho Nacional do Meio Ambiente. (2016). Resolução CONAMA nº 474, de 06 de abril de 2016. https://www.ibama.gov.br/component/legislacao/?legislacao=138205&view=legislacao&utm_source=chatgpt.com

DeArmond, D., Emmert, F., Pinto, A. C. M., Lima, A. J. N., & Higuchi, N. (2023). A systematic review of logging impacts in the Amazon Biome. Forests, 12(1), 81. https://doi.org/10.3390/f14010081

Empresa de Pesquisa Energética. (2026a). Anuário Estatístico de Energia Elétrica - ano base 2025. Ministério de Minas e Energia (MME).

Empresa de Pesquisa Energética. (2026b). Balanço energético nacional - ano base 2025. Ministério de Minas e Energia (MME).

Lima, F. B., Souza, Á. N., Matricardi, E. A. T., Gaspar, R. O., Lima, I. B., Souza, H. J., Santos, M. L., Miguel, E. P., Borges, L. A. C., Santos, C. R. C., Gouveia, F. N., & Lima, M. F. B. (2024). Alternative tree species for sustainable forest management in the Brazilian Amazon. Forests, 15, 1763. https://doi.org/10.3390/f15101763

MADEFLONA. (2025). POA – Plano Operacional Anual – 2025. MADEFLONA Industrial Madeireira Ltda.

Moreira, M. G., Rodrigues, P. P. O., Garcia, L. F. A., Lamas, G. C., Alves, J. L. F., Silva, J. C. G., Oliveira, T. J. P., Protásio, T. P., & Silveira, E. A. (2025). Assessment of wood residue blends from the amazon region for decentralized energy recovery and decarbonization: Combustion kinetics, thermodynamics and potential emissions; Biomass and Bioenergy, 197, 107827. https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2025.107827

Santos, M. J. C. (2025). Potencial energético de resíduos industriais madeireiros oriundos de concessão florestal em Rondônia (Trabalho de Conclusão de Curso). Universidade Federal de Rondônia.

Saravanan, A., Ragini, Y. P., Karishma, S., Hemavathy, R. V., & Jyotsna, M. (2025). A review on advancing sustainable energy: The role of biomass and bioenergy in a circular economy. Sustainable Futures, 10, 100835. https://doi.org/10.1016/j.sftr.2025.100835

Sarubbi, J., Rossi, L. A., Moura, D. J., Oliveira, R. A., & David, E. (2010). Utilização de energia elétrica em diferentes sistemas de aquecimento para leitões desmamados. Energia na Agricultura, 30(6), 1004-1011. https://doi.org/10.1590/S0100-69162010000600002

Silva, C. J., & Vale, A. T. (2018). Energy density model for forest species from cerrado. Revista Caatinga, 31. https://doi.org/10.1590/1983-21252018v31n216rc

Silva, W. D. S., Santos, J. X., Nisgoski, S., Acosta, T. L. N., Vieira, H. C., Souza, D. V., Corte, A. P. D., Brand, M. A., & Muñiz, G. I. B. (2025). Density, chemistry and energy potential of wood waste from five least explored Amazonian species: contribution to a circular bioeconomy. Wood Material Science & Engineering, 1–9. https://doi.org/10.1080/17480272.2025.2546606

Soteli, R. P., Rodrigues, L. D. O., Pereira, B. L. C., Protásio, T. P., Carneiro, A. C. O., & Oliveira, A. C. (2024). Management and classification of waste from the primary processing of Brazilian Amazon tropical wood for energy-generation purposes. Environment, Development and Sustainability, 26, 14065-14094. https://doi.org/10.1007/s10668-023-03179-z

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

ESTUDO DA CASCA, IDADE E POSIÇÃO NO TRONCO NA QUALIDADE DO CARVÃO VEGETAL DE EUCALIPTO

Maria Eduarda de Sousa Santos[1]; Dalton Longue Júnior[1]; Augusto Leal de Souza[1]; Victor Vinicius Sousa Martinelli Sales[1]; José Pedro Brito Santos[1]

[1] Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia

Resumo: A qualidade do carvão vegetal é influenciada pelas características da matéria-prima utilizada na sua produção, destacando-se a idade das árvores, a posição da madeira no fuste e a presença de casca. Este estudo teve como o objetivo avaliar o teor de casca da madeira de clones de eucalipto em diferentes idades e posições no fuste e sua relação com a qualidade do carvão vegetal produzido. Foram analisadas árvores com 3 e 7 anos de idade, amostradas nas posições da base, meio e topo e árvores com e sem descascamento. As árvores mais velhas apresentaram maior rendimento gravimétrico e maior teor de casca, e a presença de casca foi maior na posição do topo. Tanto idade quanto posição no fuste não influenciaram significativamente o teor de carbono fixo do carvão. Conclui-se que a idade da árvore, a posição no fuste e o teor de casca influenciam significativamente o processo de carbonização, devendo ser considerados em programas de manejo florestal e produção de bioenergia.

Palavras-chave: Carbonização; Biomassa Florestal; Bioenergia.

Study of the Effect of Bark on Eucalyptus Charcoal Quality at Different Ages and Stem Positions

Abstract: Charcoal quality is influenced by the characteristics of the raw material used in its production, notably tree age, wood position along the stem, and bark content. This study aimed to evaluate the bark content of wood from eucalyptus clones at different ages and stem positions, and its relationship with the quality of the resulting charcoal. Analyses were conducted on 3- and 7-year-old trees, sampled at the base, middle, and top positions, comparing debarked and non-debarked wood. Older trees exhibited higher gravimetric yield and bark content, with bark content being highest at the top position. Neither age nor stem position significantly influenced the fixed carbon content of the charcoal. It is concluded that tree age, stem position, and bark content significantly influence the carbonization process and should be considered in forest management and bioenergy production programs.

Keywords: Carbonization; Forest Biomass; Renewable Energy.

1. Introdução

O Brasil reúne condições para liderar a transição para uma siderurgia de baixo carbono, com destaque para o uso do carvão vegetal como fonte renovável de energia e redutor natural na produção de ferro-gusa e aço, conforme relatório da Indústria Brasileira de Árvores (IBÁ, 2025). Ainda de acordo com a IBÁ (2025), o carvão vegetal produzido a partir do eucalipto possui grande importância econômica, e o Brasil é um dos maiores produtores mundiais de carvão vegetal proveniente de florestas plantadas, produzindo cerca de 6,6 milhões de toneladas em 2024.

A qualidade do carvão vegetal está relacionada diretamente com às características da madeira utilizada no processo de carbonização. Os fatores que influenciam essa qualidade são a idade da árvore, a densidade da madeira, a composição química e a presença de casca (Pereira et al., 2013; Santos et al., 2011). As características da madeira determinam o comportamento térmico na pirólise, afetando o poder calorífico, a resistência mecânica, o teor de carbono fixo, o rendimento dos fornos e as propriedades (qualidade) do carvão vegetal (Santos et al., 2016; Protásio et al., 2014; Pereira et al., 2013).

A casca representa uma parcela importante da biomassa florestal e apresenta composição química distinta da madeira, possuindo maiores concentrações de minerais e extrativos (Pedrazzi et al., 2019).

Essas características da madeira podem afetar propriedades importantes do carvão vegetal, especialmente o teor de cinzas e o rendimento do processo. Madeiras mais densas e com maior lignina tendem a ter maior rendimento gravimétrico, enquanto minerais remanescentes determinam aumento no teor de cinzas no carvão (Pereira et al., 2013).

A posição da amostragem ao longo do fuste também pode influenciar as propriedades da madeira e consequentemente as do carvão produzido. A amostragem ao longo do fuste e a idade da árvore impactam a densidade, a composição química (como o teor de lignina) e a quantidade de casca produzida. A posição da amostragem altera o rendimento e a qualidade do carvão vegetal, determinando o tempo de pirólise ideal (Trugilho et al., 1990).

Nesse sentido, o objetivo deste trabalho é analisar o teor de casca da madeira de eucalipto na qualidade do carvão vegetal produzido em diferentes idades e posições no fuste.

2. Material e métodos

a. Material utilizado

As árvores utilizadas neste estudo foram obtidas a partir de plantios comerciais de clone de eucalipto com idades de 3 e 7 anos, localizados no município de Entre Rios, região nordeste da Bahia. As árvores foram divididas em toretes por posição no fuste (base, meio e topo). Após a coleta do material, as amostras foram direcionadas ao Laboratório de Tecnologia de Produtos Florestais da Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia (UESB).

b. Determinação do teor de casca

Para a determinação do teor de casca das madeiras, as medições foram realizadas com o auxílio de um paquímetro digital (King Tools), relacionando a espessura da casca e o diâmetro do disco de madeira, conforme Equação 1.

$$TC_{PAQ} = \left(\frac{E_M}{D} \right) * 100 \qquad \text{Equação 1}$$

Em que: TC_{PAQ} = Teor de cascas pelo método do paquímetro (%); E_M = Espessura média da casca (cm); D = Diâmetro do disco de madeira (cm).

Para a determinação do teor de casca das madeiras pelo método gravimétrico, as pesagens foram realizadas com o auxílio de uma balança de precisão de duas casas decimais, expressa pela massa seca das amostras relacionando a espessura da casca e o diâmetro do disco de madeira, conforme Equação 2.

$$TC_{GRAV} = \left(\frac{M_C}{M_M} \right) * 100 \qquad \text{Equação 2}$$

Em que: TC_{GRAV}= Teor de cascas pelo método gravimétrico (%); M_C= Massa seca de cascas (g); M_M= Massa de madeira seca (g).

c. Carbonização da madeira

As carbonizações das amostras foram realizadas com cunhas inseridas em um forno cilíndrico de metal, levado para um forno tipo mufla com aquecimento elétrico e capacidade de (8 L) As carbonizações iniciaram quando a temperatura da mufla atingiu 150 ºC, momento em que o forno de metal foi inserido na mufla, a taxa de aquecimento foi de 1,67 ºC/min., a temperatura final de carbonização foi de 450 ºC. O material

permaneceu dentro da mufla na temperatura final de carbonização por um período de 30 minutos.

O rendimento gravimétrico do carvão foi determinado pela razão entre a massa de cravão produzida e a massa de madeira que foi colocada no forno, expresso em porcentagem, conforme Equação 3

$$RG_{CV} = \left(\frac{M_C}{M_M} \right) * 100 \qquad \text{Equação 3}$$

Em que: RG_{CV} = Rendimento gravimétrico em carvão vegetal (%); M_C = Massa de carvão vegetal (g); M_M = Massa de madeira seca (g).

O teor de carbono fixo foi determinado conforme a norma para determinação da composição química imediata do carvão (ABNT NBR 8112/1989), conforme Equação 4.

$$T_{CF} = \left[100 - \left(T_{MV} + T_{CZ} \right) \right] \qquad \text{Equação 4}$$

Em que: T_{CF} = Teor de carbono fixo do carvão vegetal (%); T_{MV} = Teor de materiais voláteis (%); T_{CZ} = Teor de cinzas (%).

d. Análises estatísticas

Foi utilizado um Delineamento Inteiramente Casualizado (DIC), organizado em um sistema fatorial considerando duas idades (3 e 7 anos) e três posições do fuste (Base, Meio e Topo). Para as análises estatísticas foi utilizado o software Past 5.3 (Paleontological Statistic). A avaliação do teor de casca por diferentes métodos foi realizada por correlação, enquanto os estudos do rendimento do processo e da qualidade do carvão (teor de carbono fixo) foram realizados pelo teste F a 95% de probabilidade. Nos casos de significância, teste de Tukey foi aplicado a 95% de probabilidade.

3. Resultados e discussão

Foi observada uma elevada relação positiva entre o método do paquímetro e o método gravimétrico para determinar o teor de casca da madeira (Figura 1), indicando que o método do paquímetro pode ser utilizado como alternativa prática para estimar o teor de casca. Em estudos dessa natureza, o método da estufa só apresenta viabilidade de uso em laboratório com estufa com circulação de ar e controle de temperatura, sendo o método do paquímetro mais usual no campo e para respostas mais rápidas.

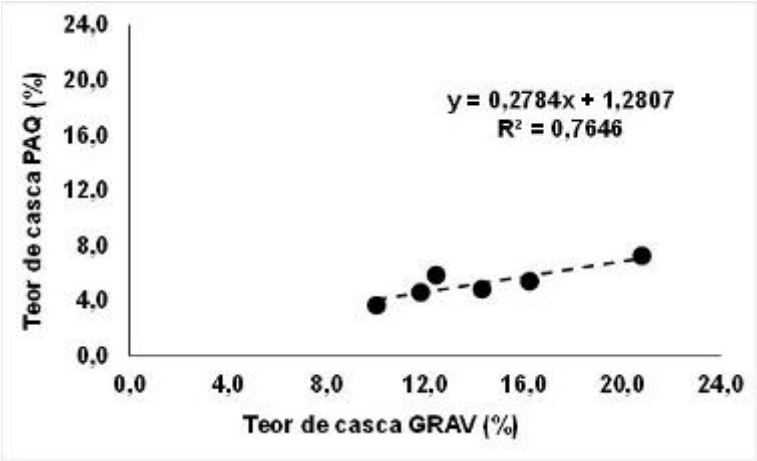
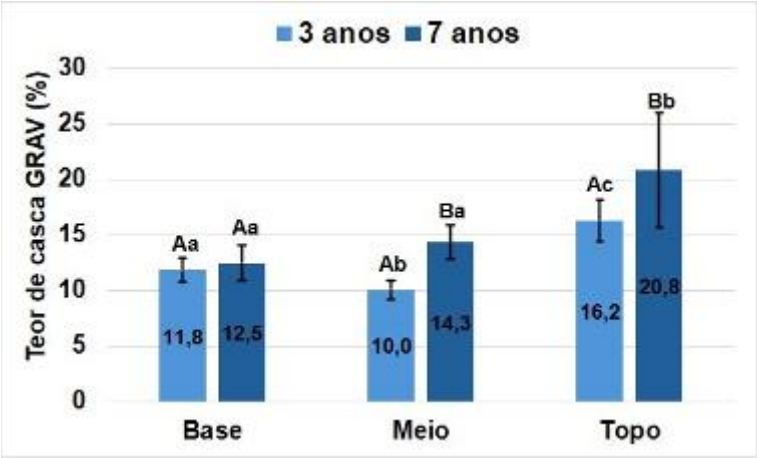


Figura 1. Relação do teor de cascas da madeira de eucalipto utilizando o método do paquímetro e Método gravimétrico.

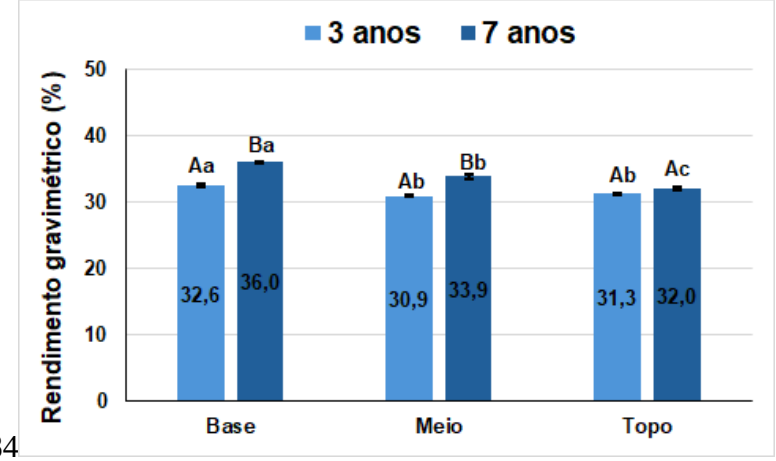
O teor de casca apresentou aumento da base para o topo do fuste e com o aumento da idade (Figura 2). O teor de casca foi similar na base das madeiras de 3 e 7 anos (11,8 – 12,5%) e apresentaram maiores diferenças entre as idades na posição do topo. As árvores aos 7 anos apresentaram maiores teores de casca principalmente na região do topo (20,8%), quando comparadas às árvores de 3 anos (16,2%), evidenciando que o desenvolvimento da árvore contribui para o aumento dessa fração da biomassa (Protásio et al.,2014).



Letras maiúsculas idênticas indicam igualdade estatística dentro da mesma posição e letras minúsculas idênticas indicam igualdade estatística dentro da mesma idade pelo teste Tukey a 95% de probabilidade.

Figura 2. Teor de casca da madeira de eucalipto segregada pela idade (3 e 7 anos) e pela posição na árvore (Base, Meio e Topo).

O rendimento gravimétrico do carvão vegetal foi superior nas árvores de 7 anos, principalmente na posição da base, indicando melhor aproveitamento da biomassa durante a carbonização (Pereira et al.,2013). As árvores mais velhas apresentaram maiores rendimentos, resultado associado à maior densidade e ao maior grau de maturação da madeira (Trugilho et al., 1990), conforme Figura 3.

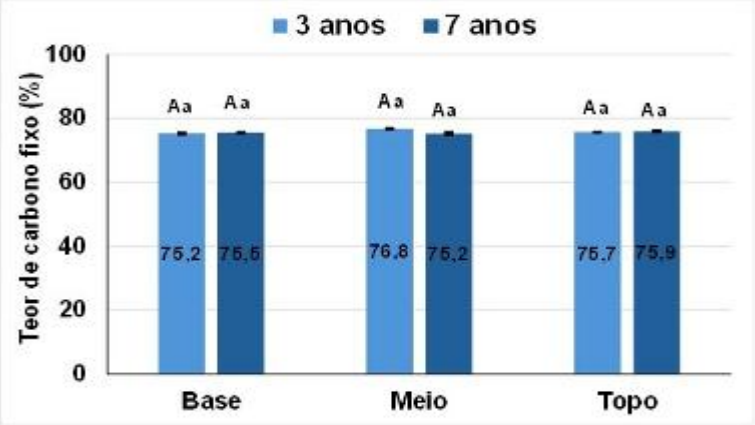


84

Letras maiúsculas idênticas indicam igualdade estatística dentro da mesma posição e letras minúsculas idênticas indicam igualdade estatística dentro da mesma idade pelo teste Tukey a 95% de probabilidade.

Figura 3. Rendimento gravimétrico em carvão vegetal proveniente da madeira de eucalipto segregada pela idade (3 e 7 anos) e pela posição na árvore (Base, Meio e Topo).

O teor de carbono fixo não apresentou variações significativas entre as posições do fuste e as idades estudadas, evidenciando a precocidade da madeira na não colaboração para aumentar o teor de carbono fixo da madeira. O maior teor de carbono fixo está relacionado à produção de um carvão vegetal de melhor qualidade energética (Santos et al., 2011), sendo desejável para aplicações industriais, especialmente na siderurgia.



Letras maiúsculas idênticas indicam igualdade estatística dentro da mesma posição e letras minúsculas idênticas indicam igualdade estatística dentro da mesma idade pelo teste Tukey a 95% de probabilidade.

Figura 4. Teor de carbono fixo do carvão vegetal proveniente da madeira de eucalipto segregada pela idade (3 e 7 anos) e pela posição na árvore (Base, Meio e Topo).

Aa Aa Aa Aa Aa Aa

De forma geral, os resultados indicaram que árvores mais velhas apresentaram características mais favoráveis à produção de carvão vegetal de melhor qualidade (Protásio et al.,2014), com maiores rendimentos gravimétricos, entretanto com maiores teores de casca principalmente na posição do topo. Além disso o aumento do teor de casca, principalmente nas regiões superiores do fuste, pode influenciar as propriedades energéticas da biomassa, reforçando a importância da seleção adequada da matéria-prima para otimizar a produção de carvão vegetal (Santos et al., 2011; Pereira et al.,2013).

4. Conclusões

Com base nos resultados obtidos, conclui-se que a idade das árvores e a posição ao longo do fuste influenciam significativamente as características da madeira e a qualidade do carvão vegetal produzido.

O teor de casca deve ser melhor acompanhado nas madeiras de topo e em árvores mais velhas. A idade e a posição vertical da madeira no fuste influenciaram principalmente o rendimento do processo, e não apresentou efeito no teor de carbono fixo.

5. Agradecimentos

Agradeço à Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia (UESB) pela estrutura disponibilizada para o desenvolvimento da pesquisa, ao Laboratório de Tecnologia da Madeira (WoodTech) pelo suporte técnico durante a realização das análises, ao professor Dalton Longue Júnior pelo apoio na pesquisa, todos os colaboradores que contribuíram para a execução deste trabalho.

6. Referências bibliográficas

Associação Brasileira de Normas Técnicas. (1986). NBR 8112: Carvão vegetal — Análise imediata. https://www.normas.com.br/visualizar/abnt-nbr-nm/3314/abnt-nbr8112-carvao-vegetal-analise-imediata

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES (IBÁ). Relatório Anual 2025. São Paulo: IBÁ. Disponível em: https://iba.org/?publications=relatorio-anual-2025

Pedrazzi, C., Dick, G., Coldebella, R., Gentil, M., Giesbrecht, B. M., & Rosa, R. C. da. (2019). Química da madeira (1ª ed.). Universidade Federal de Santa Maria. https://www.ufsm.br/app/uploads/sites/370/2021/05/QUIMICA_DA_MADEIRA_19_08_19_final.pdf

Pereira, B. L. C., Carneiro, A. C. O., Carvalho, A. M. M. L., Colodette, J. L., Oliveira, A. C., & Fontes, M. P. F. (2013). Influence of chemical composition of Eucalyptus wood on gravimetric yield and charcoal properties. BioResources, 8(3), 4574–4592. https://doi.org/10.15376/biores.8.3.4574-4592

Protásio, T. de P., Neves, T. A., Reis, A. A. dos, & Trugilho, P. F. (2014). Efeito da idade e clone na qualidade da madeira de Eucalyptus spp visando à produção de bioenergia. Ciência Florestal, 24(2), 465–477. https://doi.org/10.5902/1980509814587

Protásio, T. P., Goulart, S. L., Neves, T. A., Trugilho, P. F., Ramalho, F. M. G., & Queiroz, L. M. R. S. B. (2014). Qualidade da madeira e do carvão vegetal oriundos de floresta plantada em Minas Gerais. Pesquisa Florestal Brasileira, 34(78), 111–123. https://doi.org/10.4336/2014.pfb.34.78.657

Santos, R. C., Carneiro, A. C. O., Castro, A. F. M., Castro, R. V. O., Bianche, J. J., Souza, M. M., & Cardoso, M. T. (2011). Correlation of quality parameters of wood and charcoal of clones of eucalyptus. Scientia Forestalis, 39(90), 221–230. https://www.ipef.br/publicacoes/scientia/nr90/cap10.pdf

Santos, R. C., Carneiro, A. C. O., Vital, B. R., Castro, R. V. O., Vidaurre, G. B., Trugilho, P. F., & Castro, A. F. N. M. (2016). Influência das propriedades químicas e da relação siringil/guaiacil da madeira de eucalipto na produção de carvão vegetal. Ciência Florestal, 26(2),65766 https://www.scielo.br/j/cflo/a/dp3WXgmHSSNmRzLFtgHXCyK/?format=html&lang=pt

Trugilho, P. F., Silva, D. A., Frazão, F. J. L., & Matos, J. L. M. (1990). Comparação de métodos de determinação da densidade básica em madeira. Acta Amazonica, 20, 307–319. https://doi.org/10.1590/1809-43921990201319

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Impacto da Temperatura de Pirólise na Conversão da Palha de Café para Biocombustível Líquido

Paulo Renato Souza de Oliveira[1]; Tayná Rebonato Oliveira[1]; Rayla da Silva de Resende[1]; Allana Katiussya Silva Pereira[2]; Iara Nobre Carmona[2]; Sabrina Soares da Silva[1]; Fabíola Martins Delatorre[1]; Ananias Francisco Dias Júnior[1]

[1] Universidade Federal do Espírito Santo – UFES
[2] Universidade Federal do Recôncavo da Bahia – UFRB

Resumo: A pirólise de biomassa é uma rota promissora para a produção de energia sustentável. Este estudo investigou o efeito das temperaturas de pirólise (380, 500 e 620 °C) no bio-óleo derivado da palha de café. Os resultados indicam que a temperatura é o parâmetro operacional decisivo. Temperaturas mais elevadas aumentaram a produção de bio-óleo, reduzindo simultaneamente o rendimento de biochar. A viscosidade cinemática aumentou de 3,84 para 4,67 mm²/s, situando-se dentro dos padrões internacionais de biodiesel (EN 14214 e ASTM D6751). Em relação às outras propriedades, não foi observada diferença significativa para densidade (1,03 g/cm³) e teor de água (74,11% a 71,61%). No entanto, se observou significância marginal para o pH (3,63 a 4,16). Estes achados demonstram que o incremento de temperatura impacta o potencial da palha de café na conversão em uma matéria-prima energética de qualidade, apresentando vantagens nítidas quanto à viscosidade e tendência à redução da acidez.

Palavras-chave: Valorização de resíduo; Bio-óleo; Transição energética.

Pyrolysis Temperature Impact On Coffee Husk Conversion Into Liquid Biofuel

Abstract: Biomass pyrolysis is a promising route for sustainable energy production. This study investigated the effect of pyrolysis temperatures (380, 500, and 620 °C) on the bio-oil derived from coffee husk. Results indicate that temperature is the decisive operating parameter. Higher temperatures enhanced bio-oil production while reducing charcoal yield. The kinematic viscosity increased from 3.84 to 4.67 mm²/s, remaining within international biodiesel standards (EN 14214 and ASTM D6751). Regarding other properties, no significant differences were observed for density (1.03 g/cm³) and moisture content (71.61% to 74.11%). However, marginal significance was observed for pH (3.63 to 4.16). These findings demonstrate that increasing the temperature impacts the potential of coffee husk for conversion into a high-quality energy feedstock, presenting clear advantages regarding viscosity and the tendency toward reduced acidity.

Keywords: Waste valorization; Bio-oil; Energy transition.

1. Introdução

A pirólise de biomassa é uma tecnologia promissora no contexto da sustentabilidade e produção de combustíveis renováveis (Zhang et al., 2025). Este processo termoquímico é conduzido a

temperaturas superiores a 350 °C em condições de restrição de oxigênio para produzir três produtos: biochar, bio-óleo e gases não condensáveis (Tag et al., 2016). Dentre eles, o bio-óleo é um intermediário valioso para a produção de combustíveis líquidos renováveis e químicos de alto valor (Sánchez-Borrego et al., 2021). A princípio, a viabilidade econômica da pirólise depende da qualidade do produto inicial, que é definida pela otimização dos parâmetros de conversão (Makepa et al., 2023). Nesse contexto, a temperatura atua como o principal fator de controle sobre os rendimentos e as propriedades físico-químicas do bio-óleo (Chen et al., 2016). Em termos práticos, a otimização da pirólise se baseia na faixa de temperatura que maximiza o rendimento de líquido e a qualidade desejada antes que o craqueamento secundário e a formação de gás passem a predominar (Shafizadeh et al., 2023). Os principais atributos requeridos para um insumo energético de qualidade incluem acidez, viscosidade e teor de água reduzidos, além de baixa proporção de compostos oxigenados e alta estabilidade reológica (Bisen & Chouhan, 2024).

Nesse contexto, resíduos de biomassa são candidatos notáveis para a produção de bioenergia devido à sua disponibilidade e variabilidade regional (Saleem, 2022), permanecendo fora do debate sobre a competição entre alimento e combustível (Muscat et al., 2020). Sua utilização e valorização adequadas oferecem uma alternativa ao paradigma de produção linear vigente, fortalecendo o uso sustentável dos recursos naturais em meio à crescente demanda por energia (Rahman et al., 2025). Na América Latina, a palha de café emerge como um resíduo agrícola particularmente relevante, dado o papel de liderança do Brasil e da Colômbia na produção sul-americana, com 66,7 e 13,8 milhões de sacas beneficiadas, respectivamente (Ministério da Agricultura e Pecuária, 2026). Estima-se que a geração de resíduos atinja até 1 kg por quilograma de grãos de café processados (Oliveira & Franca, 2015). O descarte inadequado desses resíduos causa degradação ambiental significativa (Zaichenko et al., 2021), ressaltando a necessidade de alternativas técnicas que o valorizem como matéria-prima de energia renovável. Com o intuito de gerar um insumo energético sustentável compatível com demanda atual e tecnologias disponíveis, é essencial que a qualidade da matéria-prima esteja em consonância com a rota de conversão ou valorização aplicada (Adams et al., 2018). Nesse cenário, o estudo tem como objetivo avaliar o impacto da temperatura de pirólise na distribuição dos produtos e nas propriedades físico-químicas do bio-óleo, visando estabelecer parâmetros ideais de conversão para a palha de café. A hipótese central é que o incremento da temperatura modifica as propriedades do bio-óleo em razão da degradação diferencial dos componentes da biomassa e da formação de compostos oxigenados.

2. Material e métodos

2.1. Coleta e preparação da biomassa

A palha de café foi coletada diretamente de produtores rurais associados à Cooperativa dos Cafeicultores do Sul do Estado do Espírito Santo (CAFESUL), localizada em Muqui, Espírito Santo, Brasil (Lat: -20.9455°, Long: -41.3245°). As amostras tiveram suas partículas reduzidas utilizando um moinho de facas tipo Willey e, posteriormente, foram secas em estufa a 103 °C.

2.2. Condições experimentais de pirólise

Os ensaios de pirólise foram conduzidos em mufla acoplada a um reator de aço inox de leito fixo. Foi utilizado um condensador reto (600 mm), um coletor de bio-óleo e uma coluna de Vigreux. Os gases não condensáveis foram eliminados em um queimador externo. Para cada ensaio, foram utilizados 50 g de biomassa. A temperatura *in situ* foi monitorada utilizando um termopar tipo K, posicionado em contato direto com a amostra. A temperatura final do processo variou entre 380, 500 e 620 °C. O tempo de residência foi fixado em 15 minutos, contados a partir do momento em que a amostra atingiu a temperatura testada. Para a condensação dos vapores em bio-óleo, utilizou-se um sistema de resfriamento com circulação de água mantida entre 8 e 18 °C. Os rendimentos do processo (bio-óleo, biochar e gases não condensáveis) foram obtidos por balanço de massa, a partir da diferença entre a massa inicial da matéria-prima e as massas finais dos produtos coletados. O rendimento dos gases não condensáveis foi determinado por diferença, subtraindo-se 100% a soma dos rendimentos obtidos de biochar e de bio-óleo.

2.3. Caracterização do bio-óleo

As amostras foram caracterizadas pelas seguintes análises instrumentais: a viscosidade foi determinada em viscosímetro digital de bancada (Atago, VISCO-895); a densidade aparente foi obtida pela relação entre a massa, medida em balança de precisão de 0,001 g, e o volume, aferido em proveta; o teor de água foi quantificado pelo método de Karl Fischer, em conformidade com a norma ASTM E203-24 (ASTM, 2024); e a acidez foi avaliada por meio da medição de pH em pHmetro digital, seguindo a norma ASTM E70-07 (ASTM, 2015).

2.4. Análise estatística

A avaliação dos dados ocorreu por meio de análise de variância em delineamento inteiramente casualizado, seguida de regressão polinomial. O nível de significância adotado foi de $\alpha = 0,05$. Os pressupostos de normalidade e homogeneidade de variâncias foram verificados,

respectivamente, pelos testes de Shapiro-Wilk e de Levene (α = 0,05). Para as variáveis que apresentaram violação desses pressupostos, aplicou-se o teste de Welch.

3. Resultados e discussão

3.1. Rendimento dos produtos

Dentro da faixa de temperatura investigada, os rendimentos da pirólise exibiram o seguinte padrão (Figura 1): o bio-óleo aumenta, ao passo que o biochar reduz de forma linear.

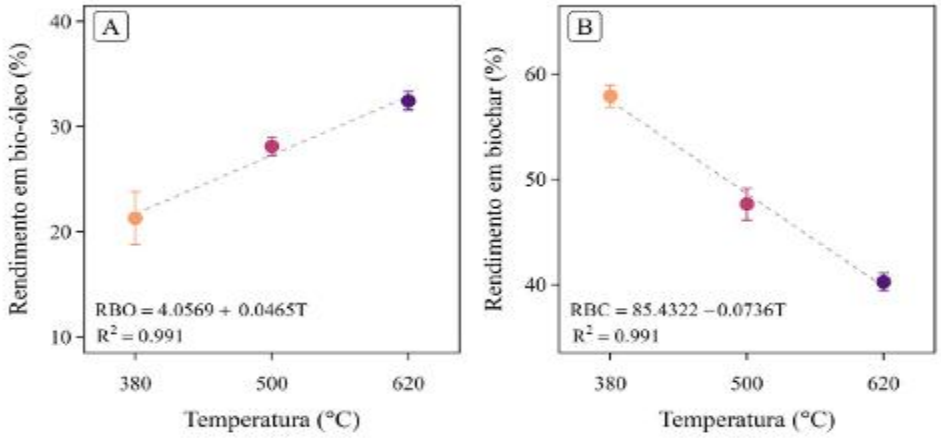


Figura 1 – Rendimentos de bio-óleo (A) e biochar (B) obtidos na pirólise de palha de café em diferentes temperaturas, apresentando os modelos de regressão linear ajustados.

Este incremento no bio-óleo foi estatisticamente significativo, indicando a intensificação da despolimerização e desvolatilização em condições térmicas mais elevadas (Safavi et al., 2023). Para a variável rendimento em gases não condensáveis, foi confirmando o mesmo efeito positivo. Concomitantemente, o rendimento de biochar diminuiu, devido a decomposição térmica progressiva das hemiceluloses e celulose (Hu et al., 2021). Portanto, elevar a temperatura de pirólise dentro da janela avaliada favorece a rota de conversão para o bio-óleo. A escolha do ponto de ajuste ideal deve ponderar este balanço de massa e os requisitos de qualidade do bio-óleo.

3.2. Propriedades do bio-óleo

A temperatura de pirólise demonstrou um efeito positivo significativo na viscosidade dinâmica (μ) do bio-óleo, conforme ilustrado na Figura 2A. Os valores médios observados foram de 3,95; 4,25 e 4,80 mPa·s para 380, 500 e 620 °C, respectivamente.

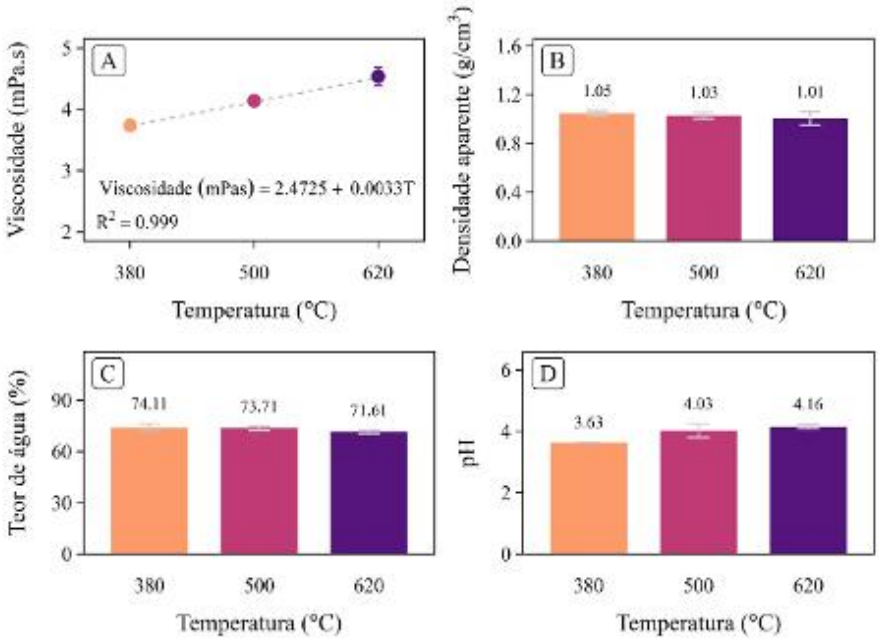


Figura 2 – Efeito da temperatura de pirólise nas propriedades físico-químicas do bio-óleo: (A) viscosidade dinâmica com modelo de regressão linear ajustado; (B) médias da densidade aparente; (C) teor de água; e (D) pH.

Embora a alta viscosidade seja considerada uma limitação para o bio-óleo, é crucial converter este parâmetro para viscosidade cinemática, a referência padrão para combustíveis líquidos. Utilizando a densidade média do bio-óleo de 1,027 g/cm³, os valores de viscosidade cinemática variam de 3,84 a 4,67 mm²/s em toda a faixa de temperatura testada. Estes resultados posicionam o bio-óleo da palha de café dentro dos padrões internacionais de biodiesel estabelecidos, tais como EN 14214 (3,5–5,0 mm²/s) e ASTM D6751 (1,9–6,0 mm²/s) (Ferreira et al., 2021). Esta característica representa uma vantagem estratégica para o bio-óleo (Vilas-Boas et al., 2025), sugerindo que ele pode exigir processos de melhoramento menos severos para atender aos padrões finais de biocombustível, em comparação com bio-óleos de alta viscosidade.

As outras propriedades físico-químicas avaliadas (densidade e teor de água) não mostraram diferença estatística com o incremento da temperatura (Figura 2B–2C). Os valores de densidade variaram de 1,01 a 1,05 g/cm³. Embora esses valores sejam superiores aos dos combustíveis diesel convencionais, eles se enquadram na faixa típica encontrada para bio-óleos não refinados (1,11–1,13 g/cm³) (Hu & Gholizadeh, 2020). Por outro lado, o teor de água encontrado é considerado alto para aplicações energéticas, indicando que o melhoramento posterior é

essencial (Chireshe et al., 2020). De forma geral, espera-se que os bio-óleos contenham menos de 30% de água para um uso eficiente (Alvarez-Chavez et al., 2019).

Acerca da acidez do bio-óleo, observou-se que o pH apresentou significância marginal. Este resultado sugere uma tendência de redução da acidez à medida que temperaturas aumentam (Figura 2D). Essa observação alinha-se com a literatura, que atribui este decréscimo à decomposição e descarboxilação de ácidos carboxílicos mais voláteis, como o ácido acético (Ahmad et al., 2026). Nesse sentido, o achado coloca a temperatura de 620 °C como vantajosa, uma vez que a corrosividade é um dos principais desafios do bio-óleo dentro de processos de melhoramento (Prasetiawan et al., 2025).

4. Conclusões

A temperatura de pirólise emerge como o parâmetro operacional decisivo para a conversão da palha de café, modulando simultaneamente o rendimento e as propriedades fundamentais do bio-óleo. Temperaturas mais elevadas direcionam o processo para uma maior produção de bio-óleo e gases não condensáveis, com uma redução concomitante no rendimento de biochar. Embora a viscosidade apresente uma tendência de aumento com a elevação da temperatura, os valores mantêm-se dentro dos limites estabelecidos para biocombustíveis líquidos. Além disso, há uma tendência de redução da acidez, o que favorece futuros processos de melhoramento. Perspectivas futuras devem ampliar o domínio operacional, examinando os efeitos da taxa de aquecimento e de diferentes estratégias de condensação, bem como aprofundar estudos sobre o melhoramento do bio-óleo para aplicação como biocombustível.

5. Agradecimentos

Os autores agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação do Espírito Santo (FAPES) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo suporte financeiro (nº 240/2025) concedido para a realização deste trabalho.

6. Referências bibliográficas

Adams, P., Bridgwater, T., Lea-Langton, A., Ross, A., & Watson, I. (2018). Biomass Conversion Technologies. In *Greenhouse Gases Balances of Bioenergy Systems* (pp. 107–139). Elsevier. https://doi.org/10.1016/B978-0-08-101036-5.00008-2

Ahmad, F., Xie, K., Liu, Z., Tian, Z.-Y., Zhao, W., & Zhang, Y. (2026). Bio-oil recovery from microwave-assisted pyrolysis of Semen Abutili seeds using HZSM-5 catalyst. *Fuel*, *406*, 136752. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2025.136752

Alvarez-Chavez, B. J., Godbout, S., Palacios-Rios, J. H., Le Roux, É., & Raghavan, V. (2019). Physical, chemical, thermal and biological pre-treatment technologies in fast pyrolysis to maximize bio-oil quality: A critical review. *Biomass and Bioenergy*, *128*, 105333. https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2019.105333

American Society for Testing and Materials - ASTM. (2015), *ASTM E70-07: Standard Test Method for pH of Aqueous Solutions With the Glass Electrode*. Disponível em: https://store.astm.org/e0070-07.html

American Society for Testing and Materials - ASTM. (2024), *ASTM E203-24: Standard Test Method for Water Using Volumetric Karl Fischer Titration*. Disponível em: https://store.astm.org/e0203-24.html

Bisen, D., & Chouhan, A. P. S. (2024). A Review on Bio-oil Upgradation by using Physico-chemical Methods. *Advanced Materials Letters*, *15*(2), 2302–1747. https://doi.org/10.5185/amlett.2024.021747

Chen, D., Li, Y., Cen, K., Luo, M., Li, H., & Lu, B. (2016). Pyrolysis polygeneration of poplar wood: Effect of heating rate and pyrolysis temperature. *Bioresource Technology*, *218*, 780–788. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.07.049

Chireshe, F., Collard, F.-X., & Görgens, J. F. (2020). Production of an upgraded bio-oil with minimal water content by catalytic pyrolysis: Optimisation and comparison of CaO and MgO performances. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, *146*, 104751. https://doi.org/10.1016/j.jaap.2019.104751

Ferreira, A. G. M., Carmen Talvera-Prieto, N. M., Portugal, A. A., & Moreira, R. J. (2021). Models for predicting viscosities of biodiesel fuels over extended ranges of temperature and pressure. *Fuel*, *287*, 119544. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.119544

Hu, W., Feng, Z., Yang, J., Gao, Q., Ni, L., Hou, Y., He, Y., & Liu, Z. (2021). Combustion behaviors of molded bamboo charcoal: Influence of pyrolysis temperatures. *Energy*, *226*, 120253. https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2021.120253

Hu, X., & Gholizadeh, M. (2020). Progress of the applications of bio-oil. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *134*, 110124. https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110124

Makepa, D. C., Chihobo, C. H., & Musademba, D. (2023). Techno-economic analysis and environmental impact assessment of biodiesel production from bio-oil derived from microwave-assisted pyrolysis of pine sawdust. *Heliyon*, *9*(11), e22261. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e22261

Ministério da Agricultura e Pecuária. (2026). *Sumário Executivo Café* (Junho-2026). Brasil. https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/politica-agricola/todas-publicacoes-de-politica-agricola/sumarios-executivos-de-produtos-agricolas/cafe-pdf-1/view

Muscat, A., De Olde, E. M., De Boer, I. J. M., & Ripoll-Bosch, R. (2020). The battle for biomass: A systematic review of food-feed-fuel competition. *Global Food Security*, *25*, 100330. https://doi.org/10.1016/j.gfs.2019.100330

Oliveira, L. S., & Franca, A. S. (2015). An Overview of the Potential Uses for Coffee Husks. In *Coffee in Health and Disease Prevention* (pp. 283–291). Elsevier. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409517-5.00031-0

Prasetiawan, H., Fardhyanti, D. S., & Fatriasari, W. (2025). Comparative Study on the Phenolic Compound Extraction in the Biorefinery Upgrading Process of Multi-Feedstock Biomass Waste Based Bio-Oil. *Journal of Renewable Materials*, *13*(7), 1347–1366. https://doi.org/10.32604/jrm.2025.02024-0070

Rahman, T., Hossain Lipu, M. S., Alom Shovon, M. M., Alsaduni, I., Karim, T. F., & Ansari, S. (2025). Unveiling the impacts of climate change on the resilience of renewable energy and power systems: Factors, technological advancements, policies, challenges, and solutions. *Journal of Cleaner Production*, *493*, 144933. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2025.144933

Safavi, A., Richter, C., & Unnthorsson, R. (2023). Revisiting the reaction scheme of slow pyrolysis of woody biomass. *Energy*, *280*, 128123. https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.128123

Saleem, M. (2022). Possibility of utilizing agriculture biomass as a renewable and sustainable future energy source. *Heliyon*, *8*(2), e08905. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e08905

Sánchez-Borrego, F. J., Álvarez-Mateos, P., & García-Martín, J. F. (2021). Biodiesel and Other Value-Added Products from Bio-Oil Obtained from Agrifood Waste. *Processes*, *9*(5), 797. https://doi.org/10.3390/pr9050797

Shafizadeh, A., Rastegari, H., Shahbeik, H., Mobli, H., Pan, J., Peng, W., Li, G., Tabatabaei, M., & Aghbashlo, M. (2023). A critical review of the use of nanomaterials in the biomass pyrolysis process. *Journal of Cleaner Production*, *400*, 136705. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.136705

Tag, A. T., Duman, G., Ucar, S., & Yanik, J. (2016). Effects of feedstock type and pyrolysis temperature on potential applications of biochar. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, *120*, 200–206. https://doi.org/10.1016/j.jaap.2016.05.006

Vilas-Boas, A. C. M., Tarelho, L. A. C., Marques, C. C., Moura, J. M. O., Santos, M. C., Paradela, F., Nunes, M. I., & Silvestre, A. J. D. (2025). Improving bio-oil fractions through fractional condensation of pyrolysis vapors from Eucalyptus globulus biomass residues in a prototype auger reactor. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, *192*, 107329. https://doi.org/10.1016/j.jaap.2025.107329

Zaichenko, V. M., Knyazeva, M. I., Krylova, A. Yu., Kulikov, A. B., & Faleeva, Yu. M. (2021). Pyrolysis of Coffee Husks and Parchment. *Solid Fuel Chemistry*, *55*(1), 62–67. https://doi.org/10.3103/S0361521921010110

Zhang, X., Zhang, Y., Zhang, S., Yao, L., & Hao, Y. (2025). Lignocellulosic biomass pyrolysis: A review on the pretreatment and catalysts. *Fuel Processing Technology*, *279*, 108352. https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2025.108352

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Impactos da casca no rendimento e qualidade do carvão vegetal para fins siderúrgicos

Davi Pimenta Fialho[1]; Angélica de Cássia Oliveira Carneiro[1]; Pedro Augusto Teixeira de Oliveira[1]; Dandara Paula da Silva Guimarães[1]; Samuel Fernandes de Souza[1]; Danielle Galavote Carnielli[1]; Marco Célio Azevedo Ferreira[1]; Gabriela Ferreira da Silva[1]

[1] Universidade Federal de Viçosa

Resumo: A presença da casca na madeira pode influenciar a qualidade do carvão vegetal destinado à indústria siderúrgica. Este estudo teve como objetivo avaliar os impactos da casca no rendimento gravimétrico e nas propriedades químicas do carvão vegetal produzido a partir de madeira de *Eucalyptus urophylla* (clone I144). Madeira com casca e sem casca foi carbonizada em sistema fornos-fornalha, com três repetições por tratamento. O rendimento gravimétrico e os teores de carbono fixo e cinzas foram determinados. A remoção da casca não influenciou significativamente o rendimento gravimétrico nem o teor de carbono fixo, mantendo valores adequados e exigidos para uso siderúrgico. Entretanto, o descascamento reduziu significativamente o teor de cinzas, promovendo maior pureza mineral do carvão vegetal. Conclui-se que o descascamento melhora a qualidade do biorredutor sem comprometer a produtividade do processo, tornando o carvão mais adequado às exigências da indústria siderúrgica.

Palavras-chave: Biorredutor; Descascamento; Carbonização

Impacts of bark on the yield and quality of charcoal for steelmaking purposes

Abstract: The presence of bark in wood can influence the quality of charcoal intended for the steel industry. This study aimed to evaluate the impacts of bark on the gravimetric yield and chemical properties of charcoal produced from *Eucalyptus urophylla* clone I144 wood. Wood with bark and without bark were carbonized in an experimental kiln-furnace system, with three replicates per treatment. Gravimetric yield, fixed carbon content, and ash content were determined. Bark removal did not significantly influence the gravimetric yield or the fixed carbon content, maintaining suitable values required for steelmaking use. However, debarking significantly reduced the ash content, promoting higher mineral purity of the charcoal. It is concluded that debarking improves the quality of the bioreducer without compromising process productivity, making the charcoal more suitable for the requirements of the steel industry
Keywords: Bioreducer; Debarking; Carbonization

1. Introdução

O Brasil é o maior produtor e consumidor de carvão vegetal, sendo responsável por 12% da produção mundial. Destaca-se que cerca de 94% da produção de carvão vegetal é obtida utilizando-se madeira proveniente de florestas plantadas, especialmente do gênero *Eucalyptus*, sendo que aproximadamente 85% do total produzido é destinado ao setor industrial, com destaque para as usinas de ferro-gusa, aço e ferroligas (IBÁ 2025; BEN, 2024). O setor siderúrgico brasileiro ocupa uma posição de destaque no cenário global por manter o uso significativo de carvão vegetal como agente termorredutor em seus altos-fornos. Essa particularidade diferencia o Brasil dos principais produtores mundiais de aço, cuja produção é predominantemente baseada no uso de carvão mineral e coque, conferindo ao país uma posição de liderança na utilização de biomassa renovável na siderurgia (IBÁ, 2025). Nesse contexto, o carvão vegetal desempenha um papel estratégico sob os pontos de vista econômico, energético e ambiental.

O avanço no melhoramento genético e no manejo silvicultural transformou o país em um centro de referência em produtividade florestal. A qualidade do carvão vegetal para fins siderúrgicos é intrinsecamente ligada às características físicas químicas da biomassa original como densidade básica elevada, alto teor de lignina e baixos teores de holoceluloses, os quais são fundamentais para garantir a qualidade do carvão e o rendimento do processo (Andrade et al., 2018).

Apesar da importância da madeira, a casca, que representa em média de 10% a 15% do volume total da árvore, é frequentemente tratada como um componente indesejável no processo de carbonização, uma vez que atua como um tecido de transporte e proteção, acumulando teores significativamente maiores de minerais e extrativos (Vital et al., 1989). Em espécies de eucalipto, a casca pode apresentar até 14% de cinzas, enquanto na madeira esse valor raramente excede 0,6% (Juizo; Lima; Silva, 2017).

A presença da casca compromete propriedades químicas fundamentais para o uso siderúrgico do carvão vegetal. O teor de cinzas é a propriedade mais afetada negativamente pela casca. Como os componentes minerais não volatilizam durante a pirólise, eles se concentram no carvão vegetal à medida que a fração orgânica é

degradada. Consequentemente, o carvão de madeira com casca apresenta teores de cinzas e de fósforo significativamente maiores (Vital et al., 1989). As implicações industriais dessas alterações são críticas para a eficiência operacional. O setor siderúrgico exige carvão com teor de cinzas preferencialmente abaixo de 1% e teor de carbono fixo entre 75% e 80% (Andrade; Tomazello Filho; Moutinho, 2018). Um alto teor de cinzas aumenta o volume de escória no alto-forno, altera as propriedades térmicas e elétricas do leito e eleva o consumo de energia e eletrodos na produção de ligas. Além disso o fósforo, concentrado na casca e translocado para o carvão, é incorporado ao metal, tornando o ferro-gusa e as ligas metálicas quebradiços e propensos a trincas (Referência?).

Diante deste cenário, o objetivo do trabalho foi avaliar os impactos da casca no rendimento e qualidade do carvão vegetal para fins siderúrgicos, já que a presença desse componente altera significativamente a pureza química e mineral do produto final.

2. Material e métodos

2.1. Material

Para as carbonizações foi utilizada madeira de um híbrido espontâneo de *Eucalyptus urophylla*, clone I144, aos 8 anos, proveniente de plantios localizados na zona rural da cidade de Viçosa-MG. Foram utilizadas toras de madeira com e sem casca, com diâmetro médio variando de 6 a 16 cm, e com comprimento médio de 1,0 m, apresentando teor de umidade, base seca, variando de 40 a 50%. As madeiras foram caracterizadas conforme procedimentos descritos na Tabela 1, por classe de diâmetro, em três repetições (toras, por classe), sendo retirada três amostras por tora de madeira.

Tabela 1 – Metodologias utilizadas para a caracterização das madeiras utilizadas no experimento

Propriedade	Norma/Procedimento
Densidade básica	NBR 11.941 (ABNT, 2003)
Composição química imediata	ISO 18123:2023 ISO 18122:2022
Composição química estrutural	TAPPI 264 cm-22 (TAPPI, 2022) TAPPI T 222 om-88 (TAPPI, 1999) TAPPI UM-250 (TAPPI, 2000)
Teor de umidade, base seca	NBR 14.929 (ABNT, 2017)

2.2. Descascamento da Madeira

O processo de descascamento das toras de madeira foi realizado de forma manual, com o auxílio de facões, imediatamente após a chegada da matéria-prima ao local de preparo, área de estoque de madeira próximo aos fornos (box). Antes do descasamento, procedeu-se a determinação do percentual de casca, medindo a circunferência com e sem casca, com auxílio de uma fita métrica.

2.3. Carbonização da madeira

Para a carbonização da madeira de eucalipto, em função da classe diamétrica, utilizou-se o sistema Fornos-Fornalha (Figura 1) adaptado com uma tampa metálica, que consiste em um conjunto de quatro fornos circulares acoplados a um queimador de gases central, interligados por meio de dutos, como descrito por Faulller (2021).

Antes das carbonizações, foi confeccionado um histograma de diâmetro da madeira. Para tanto, foram medidos todos os diâmetros das toras que foram enfornadas em função dos tratamentos. Com base no histograma, foi possível obter o diâmetro médio da madeira enfornada e o teor de umidade médio, base seca, ponderado pela classe diamétrica.

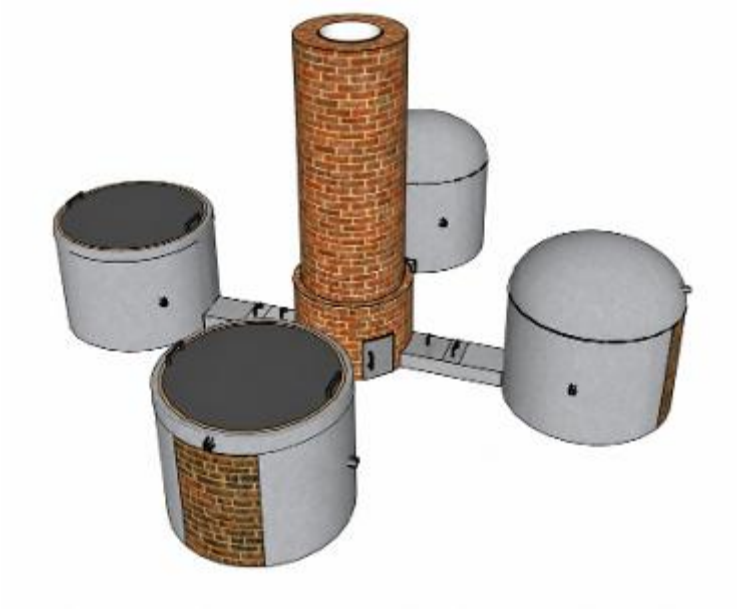


Figura 1 - Representação esquemática do Sistema Fornos-Fornalha com tampa metálica adaptada na copa. desenvolvido e construído no LAPEM/UFV

2.4.Processo de carbonização da madeira

O carregamento da madeira foi efetuado de forma manual, com a disposição vertical de até um metro de altura. No volume restante da câmara de carbonização, a madeira foi colocada na posição horizontal, com a face voltada para a porta do forno. Houve uma classificação por diâmetro, onde nas regiões próximas aos controladores de ar, utilizou-se madeira de maior diâmetro, no centro do forno, madeira de menor diâmetro, e nas demais áreas, foram alocadas madeiras da classe de média.

Após o carregamento, a porta do forno foi fechada com tijolos fixados com argamassa de barro. Duas aberturas centralizadas foram deixadas, uma na parte superior e outra na parte inferior, para a ignição do forno. A ignição ocorreu por meio da combustão de resíduos lignocelulósicos na abertura superior da porta, e uma vez que a ignição consolidada, essa abertura foi fechada.

As carbonizações foram conduzidas monitorando a temperatura da copa e parede do forno, sendo essas obtidas em tempo real com três termopares tipo K distribuídos no forno, um na parte central da tampa metálica, e os outros dois distribuídos um em cada parede (Figura 2) por meio do sistema supervisório *Carbontech,* do grupo Coaltech. O processo de pirólise foi controlado realizando a abertura e o fechamento dos reguladores de ar para a admissão de ar. O processo de carbonização foi encerrado, avaliando as temperaturas do forno, redução da vazão de gases e pela presença de atiço na parte central do forno verificado por meio de um vergalhão introduzido na parte inferior do forno, a 5 cm de altura do piso.

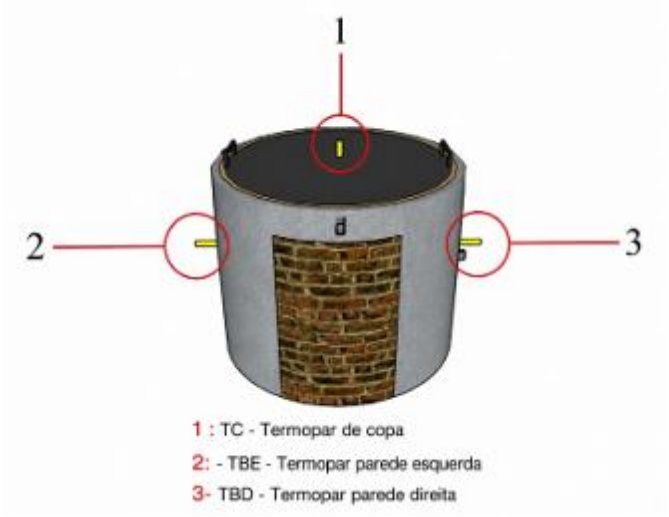


Figura 2 - Distribuição dos termopares instalados no forno de carbonização

2.5. Balanço de massa e propriedades do carvão vegetal

As massas de carvão vegetal, finos e atiços foram determinadas e o rendimento gravimétrico calculado pela seguinte equação:

$$RG(\%) = \frac{Mc}{Mms}.100 \quad (1)$$

Em que: RG = rendimento gravimétrico em carvão vegetal (%); Mc = massa seca de carvão (kg); e Mms = massa seca de madeira (kg).

A determinação dos teores de cinzas (TCz) e carbono fixo (TCF) seguiu os procedimentos preconizados pela NBR 8112 (ABNT, 1983).

2.6.Descrição dos tratamentos e parâmetros avaliados

O experimento foi conduzido a partir de um delineamento inteiramente casualizado (DIC), composto por dois tratamentos, correspondentes à madeira de eucalipto com casca (T1) e à madeira de eucalipto sem casca (T2), com três repetições por tratamento, totalizando seis unidades amostrais. Os dados obtidos foram submetidos à análise estatística, e as médias foram comparadas pelo teste de Tukey, a 5% de significância.

3.Resultados e discussão

3.1. Rendimento Gravimétrico

O rendimento gravimétrico foi estatisticamente o mesmo (±30,82) para ambos os tratamentos. Dessa forma, foi possível observar que a ausência da casca não influenciou de forma significativa no rendimento. O rendimento gravimétrico é um dos principais indicadores utilizados para avaliar a eficiência e a produtividade do processo de carbonização, pois expressa a proporção da massa de carvão vegetal obtida em relação à massa seca de madeira utilizada. Dessa forma, esse parâmetro permite estimar o consumo de madeira necessário para atender a uma determinada demanda de carvão vegetal, constituindo uma importante ferramenta para o planejamento e a otimização da produção (Protásio et al., 2021).

3.2.Propriedades químicas do carvão vegetal

O carbono fixo (CF) e o teor de cinzas (CZ) do carvão vegetal produzido são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2. Carbono fixo e teor de cinzas dos carvões vegetais em função dos tratamentos

Tratamento	Propriedades	
	CF (%)	**CZ (%)**
T1(Com casca)	79,65 a	0,51 a
T2(Sem casca)	78,64 a	0,24 b

Médias, na mesma coluna, seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey, a 5% de significância.

Para o carbono fixo, não foi verificada diferença significativa entre os tratamentos, estando dentro da faixa recomendada de 75 a 80% para uso na siderurgia (Pereira et al., 2013). A remoção da casca não foi relevante para essa propriedade, que é uma das mais importantes para o uso siderúrgico, uma vez que está diretamente relacionada ao poder redutor e ao valor energético do carvão (Referência?).

Houve redução significativa do teor de cinzas com a remoção da casca da madeira em mais de 50%, apresentando um decréscimo de 0,51% para 0,24% confirmando que a mesma é a principal componente responsável pelo incremento de resíduos minerais (cinzas) no carvão

vegetal (Vital et al., 1989). A redução do teor de cinzas é benéfica para o setor siderúrgico, pois teores de cinzas mais baixos minimizam o volume de escória nos altos-fornos, reduzem o consumo de energia e evitam a fragilização das ligas metálicas (SIF, 2021).

4.Conclusões

Conclui-se que a remoção da casca não acarreta efeitos significativos no rendimento gravimétrico e no teor de carbono fixo do carvão vegetal. Em relação à pureza mineral, observa-se a eficácia do descascamento ao reduzir o teor de cinzas. Dessa forma, a utilização de madeira descascada proporciona a produção de um biorredutor de maior qualidade e pureza, atendendo aos requisitos técnicos exigidos para o uso siderúrgico.

5. Agradecimentos

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES), à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG), à Universidade Federal de Viçosa (UFV), ao Departamento de Engenharia Florestal (DEF/UFV), à Sociedade de Investigações Florestais e a EMBRAPII (Unidade Fibras Florestais).

6. Referências bibliográficas

Andrade, F. W. C., Tomazello Filho, M., & Moutinho, V. H. P. (2018). Influence of wood physical properties on charcoal from *Eucalyptus* spp. *Floresta e Ambiente, 25*(3), e20150176. https://doi.org/10.1590/2179-8087.017615

Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2017). *NBR 14929: Madeira: Determinação do teor de umidade de cavacos – Método por secagem em estufa*.

Castro, J. P. O., Protásio, T. P., Trugilho, P. F., Napoli, A., Melo, I. F., Silva, M. G., & Resende, R. T. (2016). Correlations between age, wood quality and charcoal quality of *Eucalyptus* clones. *Revista Árvore*, *40*(3), 551–560. https://doi.org/10.1590/0100-67622016000300019

Centro de Gestão e Estudos Estratégicos. (2015). *Carvão vegetal: Destinação para a siderurgia e sustentabilidade*. https://www.cgee.org.br/documents/37878/43769/Carvao_Vegetal_WEB_02102015_10225.pdf/6893c9c6-4448-6b51-20be-a8b22d17928e

Empresa de Pesquisa Energética. (2024). *Balanço energético nacional 2024: Ano-base 2023*. https://www.epe.gov.br

Indústria Brasileira de Árvores. (2025). *Relatório anual 2025*. https://iba.org

Juizo, C. G. F., Lima, M. R., & Silva, D. A. (2017). Qualidade da casca e da madeira de nove espécies de *Eucalyptus* para produção de carvão vegetal. *Revista Brasileira de Ciências Agrárias, 12*(3), 386–390. https://doi.org/10.5039/agraria.v12i3a5461

Oliveira, A. C., Carneiro, A. C. O., Pereira, B. L. C., Vital, B. R., Carvalho, A. M. M. L., Trugilho, P. F., & Damásio, R. A. P. (2013). Otimização da produção do carvão vegetal por meio do controle de temperaturas de carbonização. *Revista Árvore*, *37*(3), 557–566. https://doi.org/10.1590/S0100-67622013000300019

Pereira, B. L. C., Carneiro, A. C. O., Carvalho, A. M. M. L., Vital, B. R., Oliveira, A. C., & Trugilho, P. F. (2013). Influence of chemical composition of *Eucalyptus* wood on gravimetric yield and charcoal properties. *BioResources, 8*(3), 4574–4592.

Protásio, T. P., Castro, A. F. N. M., Trugilho, P. F., Napoli, A., & Vieira, C. M. M. (2021). Charcoal productivity and quality parameters for reliable classification of *Eucalyptus* clones from Brazilian energy forests. *Renewable Energy, 164*, 34–45. https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.09.057

Siqueira, H. F. (2021). *Aproveitamento dos gases da carbonização para secagem da madeira e produção de carvão vegetal* [Tese de doutorado, Universidade Federal de Viçosa]. Repositório Institucional da Universidade Federal de Viçosa. https://bdtd.ibict.br/vufind/Record/UFV_8db3897d0e2e94d1ac867a432806c4a0

Sociedade de Investigações Florestais. (2021). *Relatório final do projeto cooperativo: Indicadores físico-químicos de materiais genéticos para produção de ferroligas e silício metálico*.

Technical Association of the Pulp and Paper Industry. (1999). *T 222 om-88: Acid-insoluble lignin in wood and pulp*.

Technical Association of the Pulp and Paper Industry. (2000). *UM 250: Acid-soluble lignin in wood and pulp*.

Technical Association of the Pulp and Paper Industry. (2022). *T 264 cm-22: Preparation of wood for chemical analysis*.

Vital, B. R., Andrade, A. M., Valente, O. F., & Campos, J. C. C. (1989). Influência da casca no rendimento e na qualidade do carvão vegetal de *Eucalyptus grandis*. *IPEF, 41/42*, 44–49.

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Influência da espécie florestal na qualidade energética de pellets produzidos com resíduos de manejo sustentável na Amazônia

Douglas Lamounier Faria [1]; Elvis Vieira dos Santos [1]; Thiago de Paula Protásio [1]

[1] Departamento de Ciências Florestais, Universidade Federal de Lavras - UFLA, Av. Perimetral, 37200-900, Lavras, MG, Brasil; douglas.faria3@ufla.br

Resumo: Resíduos lignocelulósicos gerados a partir de Planos de Manejo Florestal Sustentável (PMFS) na Amazônia representam uma matéria-prima subutilizada com considerável potencial para a produção de bioenergia renovável. Este estudo avaliou a qualidade de pellets de madeira produzidos com resíduos de *Apeiba echinata*, *Parkia pendula*, *Sterculia excelsa* e *Ocotea* sp. Além dessas espécies, pellets de resíduos de *Pinus* provenientes de serrarias do estado de Minas Gerais foram produzidos como comparação.
Anteriormente a produção dos pellets, as biomassas foram avaliadas pelos teores de umidade, cinzas e massa específica aparente. Os pellets foram produzidos com diâmetro nominal de 6 mm utilizando uma peletizadora plana horizontal Eng-Maq® 0200v. A qualidade dos pellets foi analisada pelas propriedades energéticas por meio do teste de combustibilidade. Os resultados mostraram que os altos teores de cinzas dos resíduos de *Apeiba echinata* (1,89%) proporcionaram menor perda de massa no teste de combustilidade, com aproximadamente 90% da massa dos pellets consumida, enquanto aqueles produzidos com resíduos de *Ocotea* sp. apresentaram 97% de perda de massa.

Palavras-chave: Densificação da biomassa; Biocombustíveis sólidos; Resíduos lenhosos da Amazônia.

Influence of forest species on the energy quality of pellets produced with sustainable management waste in the Amazon

Abstract: Lignocellulosic wastes generated from Sustainable Forest Management Plans (SFMPs) in the Amazon represent an underutilized feedstock with considerable potential for renewable bioenergy production. This study evaluated the quality of wood pellets produced from wastes of *Apeiba echinata*, *Parkia pendula*, *Sterculia excelsa*, and *Ocotea* sp. In addition to these species, pellets produced from *Pinus* residues obtained from sawmills in the state of Minas Gerais, Brazil, were produced as a reference for comparison. Prior to pellet production, the biomasses were characterized in terms of moisture content, ash content, and bulk density. The pellets were produced with a nominal diameter of 6 mm using an Eng-Maq® 0200v horizontal flat-die pellet mill. Pellet quality was assessed based on their energy performance through a combustibility test. The results showed that the high ash content of *Apeiba echinata* wastes (1.89%) resulted in lower mass loss during the combustibility test, with approximately 90% of the pellet mass consumed, whereas pellets produced from *Ocotea* sp. residues exhibited a mass loss of 97%.

Keywords: Biomass densification; Solid biofuels; Woody wastes from the Amazon.

1. Introdução

A crescente demanda por biocombustíveis sólidos renováveis impulsionou a rápida expansão da indústria global de pellets. Segundo a FAOSTAT (2026), a produção mundial de pellets aumentou de 18,05 milhões de toneladas em 2012 para 47,72 milhões de toneladas em 2024, representando um crescimento de aproximadamente 164%. No Brasil, contudo, a produção industrial de pellets permanece fortemente dependente de resíduos provenientes de plantios de *Pinus* e *Eucalyptus*. Embora essas matérias-primas estejam bem estabelecidas, a expansão contínua dos mercados de pellets exige a diversificação dos insumos para garantir a disponibilidade de matéria-prima a longo prazo e fortalecer as cadeias de suprimento regionais de bioenergia.

Uma alternativa promissora consiste nos resíduos lenhosos gerados durante a execução de Planos de Manejo Florestal Sustentável (PMFS) na Amazônia brasileira. Embora a exploração de impacto reduzido minimize substancialmente a perturbação da floresta, grandes quantidades de resíduos lenhosos são inevitavelmente geradas durante a colheita e o processamento da madeira. Estudos anteriores estimam que cerca de 2,14 t de resíduos são produzidas para cada tonelada de madeira processada (Numazawa et al., 2017), o que corresponde a aproximadamente 0,8 t m^{-3} de toras colhidas (EPE, 2018).

Entre as inúmeras espécies lenhosas provenientes de planos de manejo florestal sustentável (PMFS) na Amazônia, *Apeiba echinata*, *Parkia pendula*, *Sterculia excelsa* e *Ocotea* sp. são frequentemente comercializadas e geram quantidades substanciais de resíduos de processamento. Essas espécies apresentam grande variabilidade em termos de densidade da madeira, estrutura anatômica e composição química (Lima et al., 2021), características que, espera-se, influenciem diretamente o desempenho da peletização e a qualidade do biocombustível resultante.

Embora diversos estudos tenham investigado o potencial bioenergético de resíduos lenhosos amazônicos, a maioria concentrou-se na caracterização da biomassa *in natura* ou em propriedades de combustíveis convencionais, enquanto se dedicou comparativamente pouca atenção à produção de pellets. Além disso, permanecem limitadas as avaliações sistemáticas que relacionam a composição química da biomassa à qualidade dos pellets, particularmente para espécies tropicais de madeira de lei que apresentam características anatômicas e físico-químicas contrastantes.

Com base nas características anatômicas e químicas contrastantes de madeiras tropicais amazônicas, formulou-se a hipótese de que a composição da biomassa determinaria a densificação, a integridade mecânica e o desempenho térmico dos pellets. Assim, este estudo tem como objetivo avaliar pellets produzidos a partir de resíduos de quatro espécies arbóreas amazônicas provenientes de Planos de Manejo Florestal Sustentável (PMFS). As biomassas foram inicialmente caracterizadas por meio de análises físicas e químicas, seguidas da avaliação das propriedades energéticas dos pellets por meio do ensaio de combustibilidade.

2. Material e métodos

2.1 Obtenção e preparo da matéria-prima

Os resíduos madeireiros amazônicos provenientes de Planos de Manejo Florestal Sustentável (PMFS), utilizados neste estudo, foram obtidos na Área de Manejo Florestal Sustentável Rio Capim (AMFS Rio Capim), localizada no município de Paragominas, estado do Pará, Brasil (coordenadas: 3°30′–3°45′ S e 48°30′–48°45′ O; altitude: aproximadamente 87 m) (Figura 1). A AMFS Rio Capim abrange uma área de 209.130,54 ha e gera aproximadamente 100.000 toneladas de resíduos de exploração madeireira anualmente (Lima et al., 2020). Para a produção dos pellets, foram avaliados quatro tipos diferentes de resíduos madeireiros, sendo *Apeiba echinata* Gaertn. (pente de macaco), *Parkia pendula* (Willd.) Benth. Ex Walp. (faveira), *Sterculia excelsa* Mart.. (amesclão) e *Ocotea* sp. (louro).

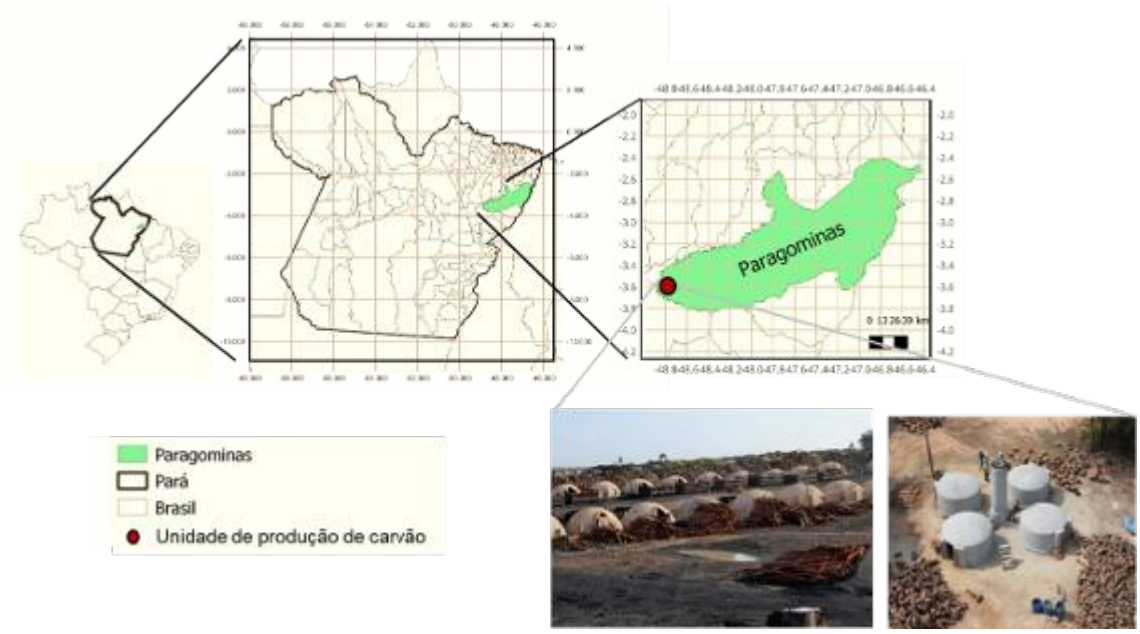


Figura 1 – Representação esquemática da área de coleta dos resíduos lenhosos.

As amostras de biomassa lignocelulósica, obtidas inicialmente na forma de discos com aproximadamente 100 mm de espessura, foram fragmentadas em pequenos palitos e,

posteriormente, moídas para produzir serragem utilizando um moinho de facas Willey (SL 31, Solab; 1750 rpm e 736 W) equipado com uma peneira de 2,0 mm de abertura, visando melhorar a qualidade da compactação dos pellets.

O teor de umidade (base seca) foi determinado de acordo com a norma EN 14774-1 (2010a). A massa específica aparente foi determinada conforme a norma EN 15103 (2010b), utilizando um béquer de vidro de 2,0 L. Todas as análises foram realizadas em triplicata, e os valores apresentados representam a média de três medições. Posteriormente, os resíduos lignocelulósicos foram secos ao ar em temperatura ambiente (~25 °C) até atingirem o teor de umidade de equilíbrio (~12%).

Os resíduos lignocelulósicos foram moídos em moinho de martelos e, posteriormente, peneirados em peneiras de 40 mesh (0,420 mm) e 60 mesh (0,250 mm) para determinação do teor de cinzas, sendo a fração retida na peneira de 60 mesh utilizada nas análises, seguindo a norma NBR 13999 (2017).

2.2 Produção dos pellets em escala laboratorial

Os resíduos de madeiras tropicais amazônicas foram peletizados, separadamente, utilizando uma peletizadora Eng-Maq® 0200v (capacidade de produção de 110 kg h^{-1}) equipada com matriz plana horizontal de 6 mm de diâmetro e 20 mm de espessura, resultando em uma razão de compressão de 3,33. A peletização foi realizada em temperaturas variando de 80 a 95 °C e sob pressão de 29,42 MPa. Para cada composição, foram produzidos 2 kg de pellets. Para fins de comparação, também foram produzidos pellets a partir de serragem de pinus. A madeira de árvores de *Pinus oocarpa* com 28 anos de idade foi coletada no campus da Universidade Federal de Lavras (UFLA), em Lavras, Minas Gerais, Brasil. O preparo das amostras e a caracterização física e química seguiram os mesmos procedimentos adotados para os resíduos de biomassa provenientes do PMFS. A Figura 2 apresenta uma visão geral esquemática do processo de produção de pellets utilizando tanto os resíduos do PMFS quanto a madeira de *Pinus*.



Figura 2 – Diagrama esquemático do processo de produção dos pellets.

2.3 Caracterização térmica dos pellets

Testes de combustibilidade dos pellets foram realizados em uma câmara de combustão construída com chapas de aço galvanizado e equipada com uma base de alumínio e madeira, um controlador de temperatura, uma balança com precisão de 0,05 g e uma proteção de alumínio para minimizar a interferência do vento durante a combustão (Setter et al., 2020). Foram testadas três amostras de 50 g para cada composição de pellet. A câmara de combustão e a base foram posicionadas sobre a balança, e a massa do pellet foi registrada antes do teste. Em seguida, a estrutura metálica de proteção e o termopar foram instalados. A ignição foi iniciada pela queima de aproximadamente 20 mL de etanol, colocados em uma placa de alumínio posicionada entre a base metálica e a câmara de combustão.

3. Resultados e discussão

3.1 Caracterização das biomassas

As propriedades físicas e químicas dos resíduos lenhosos da Amazônia e da madeira de *Pinus* utilizados para produção dos pellets são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 – Propriedades físicas das biomassas lignocelulósicas

Biomassa	*Pinus*	*Apeiba echinata*	*Parkia pendula*	*Sterculia excelsa*	*Ocotea* sp.
Umidade (%)*	11,27 ± 0,08**	11,52 ± 0,21	9,42 ± 0,59	11,97 ± 0,32	11,37 ± 0,36
Massa específica	244,83 ±	135,66 ± 8,60	114,0 ± 8,35	289,0 ± 12,01	191,67 ±

aparente (kg m^{-3})	6,52				14,63
Cinzas (%)	0,35 ± 0,04	1,89 ± 0,01	0,69 ± 0,09	0,21 ± 0,07	0,36 ± 0,08

* base seca. ** desvio padrão.

Conforme apresentado na Tabela 1, os resíduos lenhosos derivados de PMFS apresentaram teores de umidade semelhantes, sendo que *Parkia pendula* e *Sterculia excelsa* apresentaram, respectivamente, os valores mais baixos e mais altos. O teor de umidade da biomassa influencia fortemente a sua densificação durante a peletização e a durabilidade mecânica dos pellets resultantes (Sá et al., 2024).

Quanto à massa específica aparente, *Parkia pendula* apresentou o menor valor (114 kg m^{-3}), enquanto *Sterculia excelsa* apresentou o maior (289 kg m^{-3}). Esses valores são consistentes com os relatados para resíduos lenhosos amazônicos utilizados na produção de pellets. Ferreira et al. (2023) relataram massas específicas aparentes de 268 e 258 kg m^{-3} para *Dinizia excelsa* e *Manilkara elata*, respectivamente, ao passo que Sá et al. (2024) relataram valores de 277 e 271 kg m^{-3} para *Erisma uncinatum* e *Allantoma decandra*, respectivamente. A madeira de *Pinus* utilizada como referência apresentou massa específica aparente de 245 kg m^{-3}, valor comparável aos relatados para matérias-primas comerciais de pellets (García et al., 2021). Biomassas com massa específica aparente variando de baixa a moderada são geralmente preferidas para a produção de pellets, pois favorecem a densificação, resultando em pellets com maior densidade, resistência mecânica, densidade energética e valor comercial (Fernandez et al., 2017).

3.2 Caracterização dos pellets

O comportamento à combustão dos pellets foi avaliado por meio do ensaio de combustibilidade (Figura 3). Esse teste fornece uma avaliação prática da degradação térmica de biocombustíveis sólidos, simulando o comportamento de combustão esperado sob condições operacionais típicas. O teste avalia a caracterização termoquímica ao fornecer informações sobre ignição, cinética de perda de massa, desenvolvimento da chama e estabilidade da combustão.

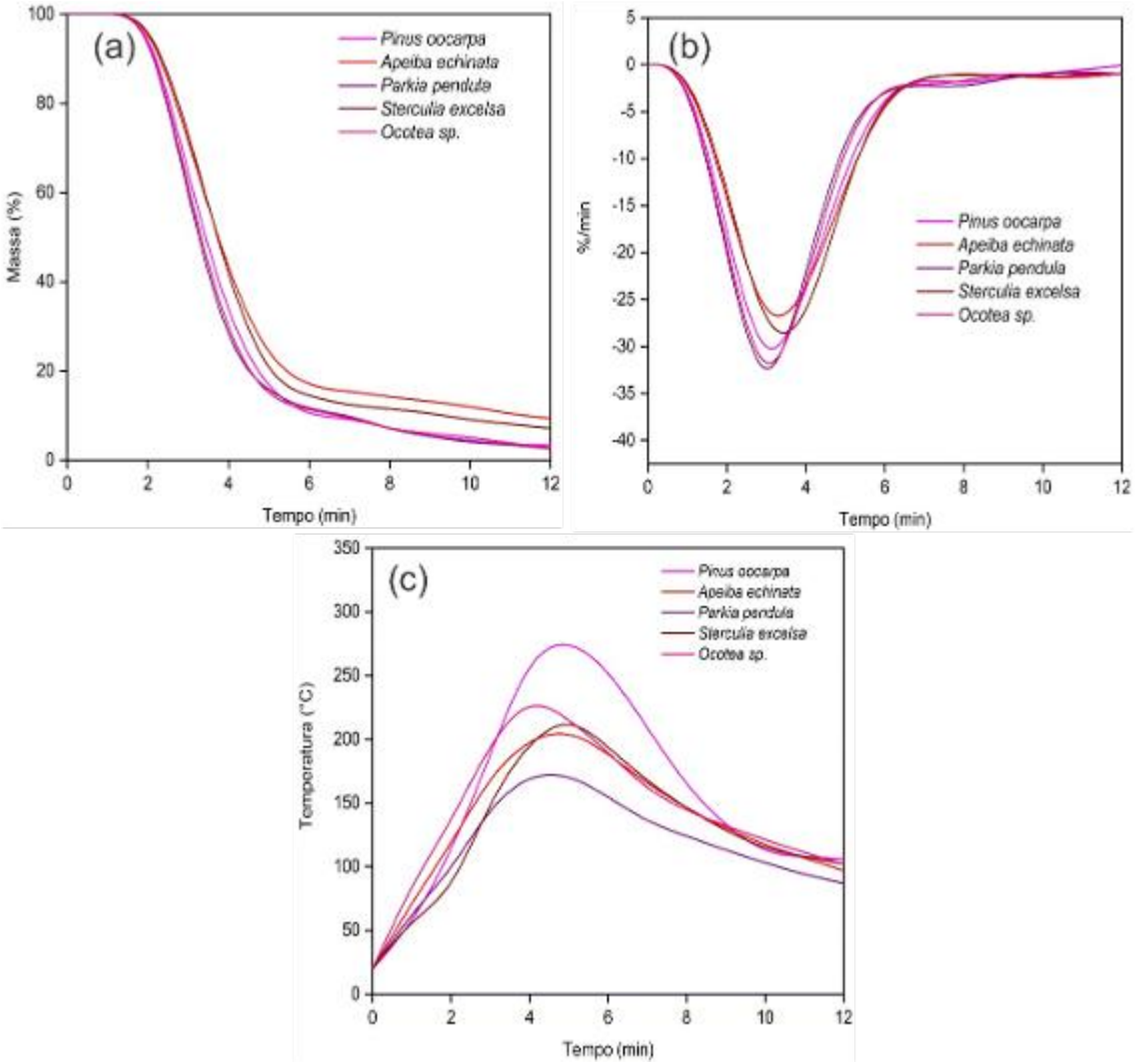


Figura 3 – Comportamento de degradação térmica avaliado pelo teste de combustibilidade: (a) massa, (b) perda de massa por minuto e (c) temperatura em função do tempo para pellets produzidos a partir de diferentes resíduos lenhosos amazônicos.

Conforme observado para os pellets produzidos a partir dos diferentes resíduos lenhosos amazônicos, ocorreu um estágio inicial de evaporação da umidade à medida que a temperatura do teste aumentava, com a remoção progressiva de água livre e fracamente ligada até aproximadamente 120 °C, tal como relatado anteriormente por Paredes et al. (2024).

As curvas de combustibilidade (Figura 3a) mostram que a massa do pellet permaneceu praticamente constante durante o primeiro minuto do teste, correspondendo principalmente à etapa de evaporação da umidade. A rápida degradação térmica teve início no segundo minuto e prosseguiu de forma intensa até aproximadamente o quinto minuto, momento em que a maior parte dos compostos voláteis já havia sido liberada e oxidada (Siegmund et al. 2024). A partir de

então, a taxa de combustão diminuiu gradualmente à medida que a oxidação do *char* se tornou o processo predominante.

Entre as biomassas avaliadas, os pellets produzidos com resíduos de *Apeiba echinata* apresentaram a menor perda de massa, com aproximadamente 90% da massa inicial consumida durante o teste, enquanto os pellets produzidos a partir de *Ocotea* sp. atingiram cerca de 97% de perda de massa, valor comparável ao observado para pellets de *Pinus* (96%). Esse comportamento pode ser justificado devido aos altos teores de cinzas verificados para biomassas lenhosas provenientes de PMFS da Amazônia (Tabela 1), corroborado por Lima et al. (2020). Elevados teores de fração inorgânica reduzem a proporção de material combustível e aumenta a quantidade de resíduo sólido remanescente após a combustão, ao passo que os menores teores de cinzas resultam em uma conversão mais completa do combustível.

Os perfis de perda de massa em função do tempo de ensaio (Figura 3b) foram, de modo geral, semelhantes entre as formulações avaliadas. A maior redução de massa ocorreu entre o primeiro e o quinto minuto, correspondendo à etapa de desvolatilização e ao início da combustão do resíduo carbonáceo (*char*), enquanto pouca perda adicional de massa foi observada após o sexto minuto, indicando que a combustão estava chegando ao fim. Esse comportamento acompanhou de perto os perfis de temperatura da chama (Figura 3c), nos quais as temperaturas máximas foram atingidas entre o quarto e o quinto minuto, coincidindo com o período de maior consumo de combustível.

A temperatura de chama mais elevada foi registrada para pellets produzidos com madeira de *Pinus* (280 °C), enquanto os pellets produzidos com *Parkia pendula* atingiram uma temperatura máxima de apenas 173 °C. Essa temperatura de combustão mais baixa pode ser atribuída principalmente à baixa massa específica desta espécie (Tabela 1), o que pode ter resultado em menor densidade energética volumétrica e em uma quantidade reduzida de material combustível por unidade de volume.

4. Conclusões

De modo geral, os resultados demonstram que os resíduos lenhosos amazônicos provenientes do manejo florestal sustentável constituem matérias-primas promissoras para a produção de pellets de alto valor agregado, apresentando propriedades energéticas comparáveis as dos pellets de madeira comerciais convencionais. Desta forma, as biomassas residuais em estudo demonstraram potencial de valorização por meio da peletização, sendo, portanto, alternativa às tradicionais fontes energéticas à base do petróleo, bem como ao carvão e lenha.

5. Agradecimentos

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES). Agradecemos também à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) pela bolsa de pós-doutorado (códigos financeiros: APQ-05431-24, bolsa ID FAPEMIG/DPE nº. 103658065/2024, e APD-00296-25).

6. Referências bibliográficas

Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2017). NBR 13999: Paper, Board, Pulps, and Wood-Determination of Residue (Ash) on Ignition at 525 °C, 2017.

Deutsches Institut Für Normung. (2010a). DIN EN 14774-1: Determination of moisture content – oven dry method –part 1: total moisture – reference method.

Deutsches Institut Für Normung. (2010b). DIN EN 15103: Determination of bulk density.

EPE - Empresa de Pesquisa Energética. (2018). Potencial energético de resíduos florestais do manejo sustentável e de resíduos da industrialização da madeira. MME/EPE, Rio de Janeiro. https://www.epe.gov.br/pt

Fernandez, B. O., Gonçalves, B. F., Pereira, A. C. C., et al. (2017). Características mecânicas e energéticas de briquetes produzidos a partir de diferentes tipos de biomassa. Revista Virtual de Química, 9(1), 29-38. http://dx.doi.org/10.21577/1984-6835.20170005

Ferreira, G., Brito, T. M., Silva, J. G. M., et al., (2023). Wood waste pellets as an alternative for energy generation in the Amazon region. Bioenergy Res, 16, 472–483. https://doi.org/10.1007/s12155-022-10446-w

Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2026). Forestry Production and Trade. https://www.fao.org/faostat/en/#data/FO

García, R., González-Vázquez, M. P., Rubiera, F., Pevida, C., Gil, M. V. (2021). Co-pelletization of pine sawdust and refused derived fuel (RDF) to high-quality waste-derived pellets. Journal of Cleaner Production, v. 328, 129635. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129635

Lima, M. D. R., Patrício, E. P. S., Barros Junior, U. O., et al. (2021). Colorimetry as a criterion for segregation of logging wastes from sustainable forest management in the Brazilian Amazon for bioenergy. Renewable Energy, 163, 792-806. https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.08.078

Lima, M. D. R., Patrício, E. P. S., Barros Junior, U. O., et al. (2020). Logging wastes from sustainable forest management as alternative fuels for thermochemical conversion systems in

Brazilian Amazon. Biomass and Bioenergy, 140(105660). https://doi.org/10.1016/J.BIOMBIOE.2020.105660

Numazawa, C. T. D., Numazawa, S., Pacca, S., Joh, V. M. (2017). Logging residues and CO_2 of Brazilian Amazon timber: two case studies of forest harvesting. Resources, Conservation & Recycling, 122, 280–285. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.02.016

Paredes, R., Castells, B., Tascón, A. (2024). Thermogravimetric assessment of biomass: Unravelling kinetic, chemical composition and combustion profiles. Fire, 7(396). https://doi.org/10.3390/fire7110396

Sá, I. A., Macedo, L. A., Chaves, B. S., Galvão, L. G. O., Vale, A. T., Ghesti, G. F. et al. (2024). Evaluating the quality of wood waste pellets and environmental impact mitigation for decentralized energy recovery in the Amazon. Renewable Energy, 231. https://doi.org/10.1016/j.renene.2024.120929

Setter, C., F. A. Borges, C. R. Cardoso, R. F. Mendes, T. J. P. Oliveira. (2020). Energy quality of pellets produced from coffee residue: Characterization of the products obtained via slow pyrolysis. Industrial Crops and Products, 154(112731). https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2020.112731

Siegmund, T., Gollmer, C., Scherzinger, M., Kaltschimitt, M. (2024). A review of CO emissions during solid biofuel combustion – Formation mechanisms and fuel-related reduction measures. Journal of the Energy Institute, 116(101762). https://doi.org/10.1016/j.joei.2024.101762

Soteli, R.P., Mascarenhas, A.R.P., de Paula Protásio, T., et al. (2025). Valorization and grouping of wood waste from sawmills in Amazonia for bioenergy. Environ Science and Pollution Research, 32, 18745–18762. https://doi.org/10.1007/s11356-025-36781-x

Influência da preparação da amostra na caracterização bioenergética de pellets: comparação entre pellets íntegros e moídos

Resumo: A crescente demanda por biocombustíveis sólidos densificados, como os pellets, exige metodologias padronizadas e representativas para a avaliação de sua qualidade. O presente trabalho teve como objetivo avaliar a influência da preparação da amostra (comparando pellets inteiros e moídos) sobre os resultados da caracterização bioenergética. Para isso, foram utilizados pellets produzidos a partir de duas biomassas residuais: serragem de pinus e folhas de abacate. As amostras (moídas e inteiras) foram submetidas à análise química imediata (teores de materiais voláteis, cinzas e carbono fixo) e a determinação do Poder Calorífico Superior (PCS), com os dados analisados estatisticamente por ANOVA e teste de Tukey. Os resultados demonstraram que não houve diferença estatística significativa para os teores de materiais voláteis, carbono fixo e PCS entre os pellets íntegros e moídos. Diferenças significativas foram observadas apenas no teor de cinzas, indicando que a moagem atua na homogeneização da fração mineral. Conclui-se que a etapa de redução granulométrica recomendada por normas internacionais não altera as propriedades energéticas intrínsecas da biomassa, servindo predominantemente para reduzir a heterogeneidade e melhorar a repetibilidade analítica.

Palavras-chave: Resíduos; Bioenergia; Preparação de amostra; Normas ISO

Influence of sample preparation on the bioenergetic characterization of pellets: comparison between whole and ground pellets

Abstract: The growing demand for densified solid biofuels, such as pellets, requires standardized and representative methodologies to evaluate their quality. This study aimed to evaluate the influence of sample preparation (comparing whole and ground pellets) on the results of bioenergetic characterization. Pellets produced from two residual biomasses were used: pine sawdust and avocado leaves. The samples (ground and whole) were subjected to proximate analysis (volatile matter, ash, and fixed carbon contents) and Higher Heating Value (HHV) determination, with data statistically analyzed using ANOVA and the Tukey test. The results showed no significant statistical difference for volatile matter, fixed carbon, and HHV between whole and ground pellets. Significant differences were observed only in the ash content, indicating that grinding acts in the homogenization of the mineral fraction. It is concluded that the particle size reduction step recommended by international standards does not alter the intrinsic energetic properties of the biomass, serving predominantly to reduce heterogeneity and improve analytical repeatability.

Key words: Waste; Bioenergia; Sample Preparation; ISO Standards

1. Introdução

A crescente demanda por fontes renováveis de energia tem impulsionado o desenvolvimento e a utilização de biocombustíveis sólidos densificados, especialmente pellets produzidos a partir de biomassa lignocelulósica. Esses combustíveis apresentam elevada densidade energética, uniformidade dimensional, facilidade de armazenamento e transporte, além de maior eficiência logística quando comparados a biomassa in natura (Kaliyan & Vance

Morey, 2009; Pradhan et al., 2018). Em razão dessas características, os pellets vêm sendo amplamente empregados para geração de calor e energia em aplicações residenciais e industriais.

A avaliação da qualidade desses biocombustíveis depende da determinação de propriedades físico-químicas e energéticas, como teor de umidade, materiais voláteis, teor de cinzas, carbono fixo e poder calorifico superior, parâmetros essenciais para estimar o desempenho do combustível durante processos termoquímicos. Para garantir a confiabilidade e comparabilidade dos resultados, essas determinações são realizadas conforme procedimentos estabelecidos por normas ISO 14780, referente à preparação das amostras, ISO 18122 para determinação do teor de cinzas, ISO 18123, para materiais voláteis, e ISO 18125, para determinação do poder calorífico superior.

A ISO 14780 estabelece que as amostras destinadas às análises laboratoriais devem ser reduzidas granulometricamente e homogeneizadas antes da obtenção das subamostras analíticas. Essa etapa tem como finalidade minimizar a variabilidade experimental e assegurar que pequenas massas utilizadas nas análises sejam representativas do lote original, aumentando a repetibilidade e a reprodutibilidade dos resultados (ISO 14780, 2017). Por essa razão, a moagem da biomassa constitui procedimento amplamente adotado em estudos de caracterização energética de pellets (Liu et al., 2020; Protásio et al., 2015).

Entretanto, durante sua utilização prática, os pellets são empregados em sua forma íntegra, preservando características estruturais desenvolvidas durante o processo de densificação, como densidade aparente, porosidade intra e entre pellets, resistência mecânica e continuidade da matriz sólida. Essas propriedades exercem influência sobre fenômenos de transferência de calor e massa, difusão de gases e comportamento térmico durante processos de combustão e pirólise (Gilbert et al., 2009; Kaliyan & Vance Morey, 2009; Stelte et al., 2011). A redução granulométrica realizada para fins analíticos elimina essa estrutura física, modificando significativamente a geometria original do combustível.

Diante desse contexto, o presente trabalho teve como objetivo avaliar a influência da preparação da amostra, utilizando pellets íntegros e moídos, sobre os resultados da caracterização bioenergética, contribuindo para a discussão acerca da representatividade dos procedimentos laboratoriais empregados na avaliação de biocombustíveis sólidos densificados.

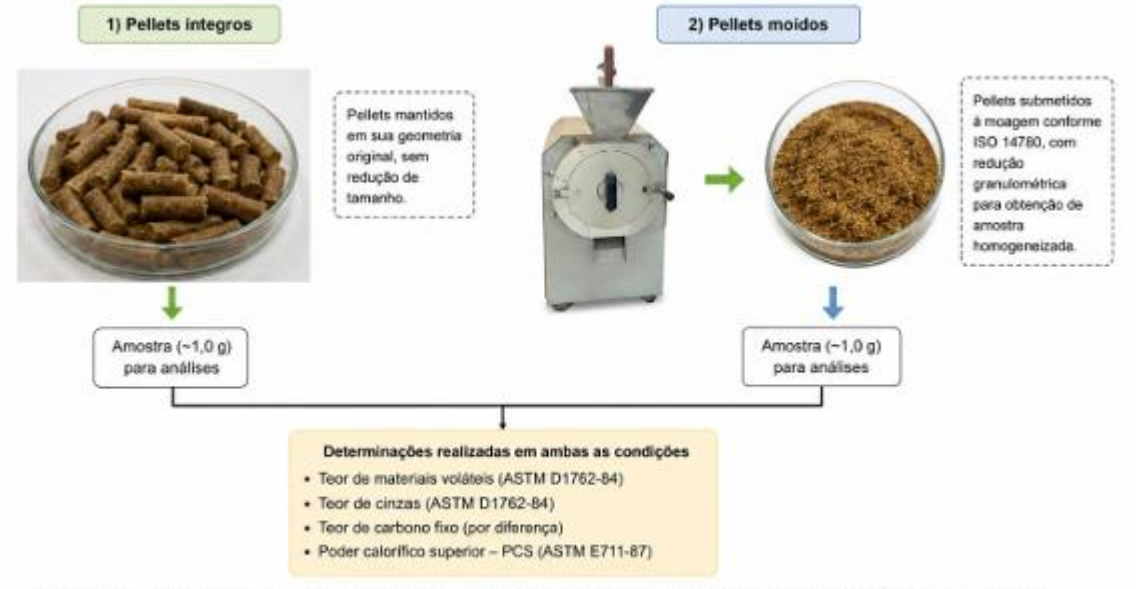
2. Material e Métodos

Os pellets utilizados foram produzidos a partir de duas biomassas provenientes de resíduos: serragem de pinus e folhas de abacate. A biomassa foi moída e classificada em peneira

de 4 mesh para padronizar a granulometria antes da peletização. Para realizar a peletização foi utilizada a peletizadora de escala laboratorial da marca ENG-MAQ modelo ENG 0200V com capacidade de produção de 100 kg/h e com canais de compressão de 6 mm.

Para avaliar exclusivamente a influência da preparação física da amostra sobre os resultados da caracterização bioenergética, cada tipo de pellet foi dividido em duas condições experimentais. Na primeira, os pellets foram analisados em sua forma integra, preservando sua geometria original. Na segunda, os pellets foram submetidos a moagem, conforme recomendado pela ISO 14780, sendo posteriormente utilizados nas mesmas nas mesmas determinações laboratoriais. Dessa forma, foi possível comparar diretamente o efeito da redução granulométrica sobre os parâmetros analisados, mantendo constantes a matéria prima, o processo de peletização e as condições experimentais.

Figura 1 – Esquema representativo das duas condições de preparo das amostras utilizadas: pellets íntegros e moídos.



A análise química imediata foi realizada utilizando pellets íntegros e moídos. Em ambas as condições, foram utilizadas amostras de 1 grama por determinação, com seis repetições (duas séries em triplicata). Antes das análises, as amostras foram secas em estufa a 103 ± 2 ºC até massa constante. Os teores de materiais voláteis e cinzas foram determinados em forno tipo mufla, conforme a norma D 1762-84 (ASTM D1762 – 84, 2021). O teor de carbono fixo foi obtido por diferença (100 – (Cinzas % + Voláteis %)).

A determinação do Poder Calorífico Superior (PCS) foi realizada em bomba calorimétrica digital modelo -200, IKA, segundo a metodologia da norma E711-87 (ASTM

E711 – 87, 2004). A análise foi realizada tanto nos pellets inteiros como nos que foram moídos, para os pellets inteiros teve-se o cuidado de colocar somente uma fração que correspondesse a massa utilizada no ensaio, mantendo assim a repetibilidade e confiabilidade do teste.

Após a obtenção dos dados, eles foram submetidos à análise estatística utilizando o software R (R Core Team). Inicialmente, foi realizada a análise de variância (ANOVA) para verificar a existência de diferenças significativas entre as biomassas avaliadas, sendo previamente verificados os pressupostos de normalidade dos resíduos por meio do teste de Shapiro–Wilk e de homogeneidade das variâncias pelo teste de Levene. Quando a ANOVA indicou efeito significativo ($p < 0,05$), as médias foram comparadas pelo teste de Tukey, em nível de 5% de probabilidade. Adicionalmente, foram calculadas as estatísticas descritivas de cada variável, incluindo média, desvio-padrão.

3. Resultados e discussão

Os resultados da análise química imediata e do poder calorífico (PCS) dos pellets avaliados estão apresentados na Tabela 1. De modo geral, a preparação da amostra não influenciou os teores de materiais voláteis (TMV) e carbono fixo (TCF), sendo observadas médias estatisticamente semelhantes entre pellets moídos e inteiros para ambos os tratamentos. No entanto, diferenças significativas foram encontradas para o teor de cinzas (TCZ), indicando que esse parâmetro pode ter sido mais influenciado pela forma de preparação da amostra.

Tabela 1 – Valores médios da análise química imediata e do poder calorífico superior (PCS) de pellets de pinus e folha de abacate nas condições moídos e inteiros.

Pellets	Condição	TMV (%)	TCZ (%)	TCF (%)	PCS (MJ/kg)
Folha de abacate	Moído	72,43 b (± 4,08)	5,41 a (± 0,04)	22,16 a (± 4,08)	20,36 a (± 1,12)
Folha de abacate	Inteiro	72,07 b (± 0,40)	5,84 b (± 0,11)	22,08 a (± 0,43)	20,74 a (± 0,29)
Pinus	Moído	82,81 a (± 0,80)	0,40 c (± 0,05)	16,79 b (± 0,75)	21,93 a (± 0,24)
Pinus	Inteiro	83,19 a (± 0,87)	0,52 d (± 0,63)	16,29 b (± 0,85)	22,17 a (± 0,31)

TMV: teor de materiais voláteis; TCZ: teor de cinzas; TCF: teor de carbono fixo. PCS: poder calorífico superior. Dados entre parênteses representam o desvio padrão. Valores médios seguidas de mesma letra nas colunas não diferem entre si pelo teste de Tukey.

A estabilidade e a ausência de diferenças significativas para os valores de materiais voláteis e carbono fixo demonstram que a moagem não promoveu alterações na composição

química dos pellets. Esses parâmetros são determinados principalmente pela proporção de celulose, hemiceluloses e lignina presentes na biomassa (Xiao et al., 2020), e estão diretamente relacionados à composição térmica desses constituintes, sendo pouco influenciados pela forma física da amostra quando submetida às temperaturas padronizadas de ensaio. Esse comportamento valida a premissa de normas internacionais (como as ISO 14780, ISO 18122 e ISO 18123) e encontra forte respaldo na literatura (Obernberger e Thek, 2010). De acordo, de acordo com esses autores, a análise imediata reflete predominantemente a química do combustível e a preparação granulométrica (moagem) atua exclusivamente para como etapa para reduzir a heterogeneidade, melhorando a representatividade e a repetibilidade analítica, sem modificar as características energéticas intrínsecas do material.

O teor de cinzas foi o único parâmetro da análise imediata que apresentou diferenças significativas entre pellets moídos e inteiros. Embora diferenças absolutas tenham sido pequenas, esse comportamento evidencia que a distribuição da fração mineral pode ser influenciada pela preparação da amostra. Segundo Vassilev et al. (2010), os minerais presentes na biomassa podem apresentar distribuição heterogênea entre os diferentes tecidos vegetais, podendo ocorrer concentrações distintas em regiões específicas do material vegetal. Assim, a moagem tende a promover maior homogeneização desses constituintes, reduzindo a variabilidade entre as amostras.

Resultados semelhantes foram discutidos por Jenkins et al. (1998), que observaram que a variabilidade do teor de cinzas em biomassas lignocelulósicas está associada não apenas à composição da matéria-prima, mas também à representatividade da amostragem e da preparação do material. Dessa forma, pequenas diferenças observadas entre pellets inteiros e moídos podem estar relacionadas ao grau de homogeneização obtido durante a preparação das amostras e não, necessariamente, a alterações na composição mineral do combustível.

Em relação ao poder calorifico superior independente da preparação da amostra, os pellets de pinus apresentaram maiores valores de PCS em comparação aos pellets produzidos com folhas de abacate, comportamento esperado em função das diferenças na composição química das biomassas utilizadas.

Os valores de PCS permanecem muito próximos entre os pellets inteiros e moídos, indicando que a preparação física da amostra exerceu pouca influência sobre o potencial energético das biomassas. Segundo Telmo & Lousada (2011), o PCS está fortemente relacionado à composição elementar e ao conteúdo de lignina e extrativos da biomassa, sendo

pouco afetado por modificações físicas, desde que não ocorram alterações químicas durante a preparação do material.

Os resultados obtidos corroboram o comportamento descrito por Demirbaş, (2001), que relaciona o poder calorifico superior principalmente à composição química da biomassa, especialmente ao conteúdo de lignina e aos teores de carbono e hidrogênio. Da mesma forma, Telmo & Lousada, (2011) verificaram que a variação do PCS entre diferentes pellets está associada às características da matéria-prima, enquanto modificações exclusivamente físicas, como a granulometria da amostra, exercem influência reduzida. Dessa forma, a ausência de diferenças significativas entre pellets moídos e inteiros indica que a preparação física da amostra não comprometeu a determinação do conteúdo energético dos pellets.

Quando analisados em conjunto, os resultados da análise imediata e do poder calorifico superior indicam que a preparação física da amostra apresentou influência pontual sobre o teor de cinzas, mas não promoveu alterações relevantes nos parâmetros diretamente relacionados ao desempenho energético do combustível. Este comportamento está de acordo com o que foi apresentado por Obernberger e Thek (2010), que ressaltam que o potencial energético dos pellets depende principalmente da composição química da biomassa, enquanto propriedades físicas e operacionais exercem maior influência sobre o comportamento durante armazenamento, manuseio e combustão.

Nesse contexto, os resultados obtidos indicam que a moagem da amostra, embora recomendada para aumentar a homogeneidade e a representatividade analítica, não altera o potencial energético dos pellets, corroborando sua utilização como procedimento de preparo para ensaios laboratoriais.

4. Conclusão

Com base nos resultados obtidos, conclui-se que a preparação física da amostra (moagem) não altera de forma significativa as propriedades bioenergéticas intrínsecas dos pellets, como o teor de materiais voláteis, o teor de carbono fixo e o poder calorífico superior (PCS).

A preparação física da amostra exerceu influência apenas sobre o teor de cinzas, não alterando significativamente os materiais voláteis, o carbono fixo e o poder calorífico superior. Assim, o procedimento de moagem recomendado pelas normas internacionais mostrou-se adequado para a caracterização bioenergética dos pellets.

Portanto, o procedimento de moagem recomendado pelas normatizações internacionais é válido e adequado para a avaliação de biocombustíveis sólidos densificados, pois garante a

representatividade e a repetibilidade dos ensaios sem comprometer ou mascarar a determinação do seu real potencial energético.

5. Agradecimentos

Os autores agradecem ao Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia em Tecnologias da Madeira da Amazônia (INCT Madeiras da Amazônia – Processo CNPq 408800/2024-0) e ao Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia em Biorrefinaria de Materiais Lignocelulósicos (INCT InovaLigno - Processo CNPq 408984/2024-4). Agradecemos, ainda, ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia da Madeira (PPGCTM) e à Universidade Federal de Lavras (UFLA). Os autores também expressam seu agradecimento ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES).

6. Referências

ASTM International. (2004). *ASTM E711-87(2004): Standard test method for gross calorific value of refuse-derived fuel by the bomb calorimeter*. ASTM International.

ASTM International. (2021). *ASTM D1762-84(2021): Standard test method for chemical analysis of wood charcoal*. ASTM International. https://doi.org/10.1520/D1762-84R21

Demirbaş, A. (2001). Relationships between lignin contents and heating values of biomass. *Energy Conversion and Management*, *42*(2), 183–188. https://doi.org/10.1016/S0196-8904(00)00050-9

Gilbert, P., Ryu, C., Sharifi, V., & Swithenbank, J. (2009). Effect of process parameters on pelletisation of herbaceous crops. *Fuel*, *88*(8), 1491–1497. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2009.03.015

International Organization for Standardization. (2017). ISO 14780:2017. Solid biofuels—Sample preparation. ISO.

International Organization for Standardization. (2017). *ISO 18125:2017. Solid biofuels—Determination of calorific value*. ISO.

International Organization for Standardization. (2022). *ISO 18122:2022. Solid biofuels—Determination of ash content*. ISO.

International Organization for Standardization. (2022). *ISO 18123:2022. Solid biofuels—Determination of the content of volatile matter.* ISO.

Jenkins, B. M., Baxter, L. L., Miles, T. R., & Miles, T. R. (1998). Combustion properties of biomass. *Fuel Processing Technology*, *54*(1), 17–46. https://doi.org/10.1016/S0378-3820(97)00059-3

Kaliyan, N., & Vance Morey, R. (2009). Factors affecting strength and durability of densified biomass products. *Biomass and Bioenergy*, *33*(3), 337–359. https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2008.08.005

Liu, X., Feng, X., Huang, L., & He, Y. (2020). Rapid Determination of Wood and Rice Husk Pellets' Proximate Analysis and Heating Value. *Energies*, *13*(14), 3741. https://doi.org/10.3390/en13143741

Obernberger, I., & Thek, G. (2010). *The pellet handbook: The production and thermal utilization of biomass pellets*. Earthscan.

Pradhan, P., Mahajani, S. M., & Arora, A. (2018). Production and utilization of fuel pellets from biomass: A review. *Fuel Processing Technology*, *181*, 215–232. https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2018.09.021

Protásio, T. de P., Trugilho, P. F., Siqueira, H. F. de, Melo, I. C. N. A. de, Andrade, C. R., & Junior, J. B. G. (2015). Caracterização energética de pellets in natura e torrificados produzidos com madeira residual de Pinus. *Pesquisa Florestal Brasileira*, *35*(84), 435–442. https://doi.org/10.4336/2015.pfb.35.84.843

R Core Team. (2025). *R: A language and environment for statistical computing* (Version 4.5.0) [Computer software]. R Foundation for Statistical Computing. https://www.r-project.org/

Stelte, W., Holm, J. K., Sanadi, A. R., Barsberg, S., Ahrenfeldt, J., & Henriksen, U. B. (2011). Fuel pellets from biomass: The importance of the pelletizing pressure and its dependency on the processing conditions. *Fuel*, *90*(11), 3285–3290. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2011.05.011

Xiao, R., Yang, W., Cong, X., Dong, K., Xu, J., Wang, D., & Yang, X. (2020). Thermogravimetric analysis and reaction kinetics of lignocellulosic biomass pyrolysis. Energy, 201, 117537. https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.117537

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Influência da temperatura de pirólise e granulometria na ignição do carvão vegetal de *Eucalyptus* sp.

Tayná Rebonato Oliveira[1]; Hemanuelly Ferreira Breda Lãn Oliveira[1]; Paulo Renato Souza de Oliveira[1]; Gabriela Aguiar Amorim[2]; Fabiola Martins Delatorre[1]; Sabrina Soares da Silva[1]; Gabriela Fontes Mayrinck Cupertino[3]; Ananias Francisco Dias Júnior[1]

[1] Universidade Federal do Espírito Santo - UFES
[2] Universidade de São Paulo – USP
[3] Instituto Tecnológico de Aeronáutica - ITA

Resumo: O comportamento térmico do carvão vegetal é influenciado pelas condições de pirólise e pelas características físicas do material, especialmente pela temperatura final do processo e granulometria. Este estudo avaliou a influência desses fatores sobre a temperatura de ignição de carvão vegetal de *Eucalyptus* sp. O material foi produzido nas temperaturas finais de 350, 450, 550 e 650 °C e separado nas classes granulométricas >40, 40/60 e 60/100 mesh. As alterações químicas decorrentes da pirólise foram avaliadas por espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier, enquanto a evolução térmica das amostras foi monitorada por termografia infravermelha. Os dados foram submetidos à análise de variância, seguida de regressão polinomial para a temperatura de pirólise e teste de Tukey para a granulometria. A interação entre os fatores não foi significativa, enquanto a temperatura de pirólise e a granulometria influenciaram a temperatura de ignição. O aumento da temperatura de pirólise promoveu a redução de grupos funcionais oxigenados e o desenvolvimento de estruturas aromáticas mais estáveis, resultando em aumento quadrático da temperatura de ignição, com elevado ajuste do modelo (R^2 = 0,9999). A fração >40 mesh apresentou maior temperatura média de ignição (330,75 °C) que as frações 40/60 e 60/100 mesh, cujas médias foram, respectivamente, 312,58 e 315,33 °C. Os resultados demonstram que temperaturas mais elevadas de pirólise aumentam a estabilidade térmica do carvão, enquanto partículas de menor granulometria apresentaram menores temperaturas de ignição.

Palavras-chave: Carbonização; Estabilidade térmica; Termografia infravermelha.

Influence of pyrolysis temperature and particle size on the ignition temperature of *Eucalyptus* sp. charcoal

Abstract: The thermal behavior of charcoal is influenced by pyrolysis conditions and the physical characteristics of the material, particularly the final process temperature and particle size. This study evaluated the influence of these factors on the ignition temperature of *Eucalyptus* sp. charcoal. The material was produced at final pyrolysis temperatures of 350, 450, 550, and 650 °C and separated into the particle-size classes >40, 40/60, and 60/100 mesh. Chemical changes resulting from pyrolysis were evaluated by Fourier-transform infrared spectroscopy, whereas the thermal evolution of the samples was monitored using infrared thermography. The data were subjected to analysis of variance, followed by polynomial regression for pyrolysis temperature and Tukey's test for particle size. The interaction between the factors was not significant, whereas both pyrolysis temperature and particle size influenced charcoal ignition temperature. Increasing the pyrolysis temperature reduced oxygen-containing functional groups and promoted the development of more stable aromatic structures, resulting

in a quadratic increase in ignition temperature, with a high model fit (R^2 = 0.9999). The >40 mesh fraction showed a higher mean ignition temperature (330.75 °C) than the 40/60 and 60/100 mesh fractions, which presented mean values of 312.58 and 315.33 °C, respectively. These findings demonstrate that higher pyrolysis temperatures increase charcoal thermal stability, whereas smaller particles exhibited lower ignition temperatures.

Keywords: Carbonization; Thermal stability; Infrared thermography.

1. Introdução

O carvão vegetal é um material carbonáceo obtido pela conversão termoquímica da biomassa em condições de disponibilidade limitada de oxigênio. Durante a pirólise, os constituintes lignocelulósicos são termicamente degradados, promovendo a formação de uma fração sólida rica em carbono, além de vapores condensáveis e gases não condensáveis (Batista & Gomes, 2021). A decomposição da biomassa resulta da sobreposição das reações de seus principais constituintes, sendo a hemicelulose e a celulose degradadas predominantemente em temperaturas inferiores às da lignina, cuja decomposição ocorre em uma faixa térmica mais ampla (Apaydın Varol & Mutlu, 2023).

As características do carvão obtido dependem tanto da composição da matéria-prima quanto das condições empregadas durante a pirólise, como temperatura final, taxa de aquecimento e tempo de residência (Batista & Gomes, 2021). Entre essas variáveis, a temperatura final exerce influência significativa sobre a composição imediata e a estrutura carbonácea do material. Com sua elevação, ocorre redução progressiva do teor de materiais voláteis, acompanhada pelo aumento do teor de carbono fixo e por modificações na organização da matriz carbonácea (Gao et al., 2025).

As transformações químicas promovidas pela temperatura de pirólise podem ser acompanhadas por espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier. Essa técnica permite identificar alterações em grupos hidroxila, carbonila e ligações éter, associados aos constituintes lignocelulósicos e às interações presentes na estrutura da lignina (Kubo & Kadla, 2005). Em carvões produzidos em temperaturas crescentes, observa-se perda gradual de grupos funcionais superficiais, especialmente dos grupos hidroxila, enquanto estruturas aromáticas apresentam maior resistência térmica. Em temperaturas mais elevadas, essa perda torna-se mais intensa e é acompanhada pela condensação das estruturas aromáticas (Janu et al., 2021).

Essas alterações na composição e na estrutura influenciam diretamente a resposta térmica do carvão. Biocarvões com menor teor de materiais voláteis tendem a apresentar maior estabilidade térmica e temperaturas de ignição mais elevadas, enquanto o aumento do carbono

fixo está associado à necessidade de maior aporte térmico para o início da combustão (Bouesso et al., 2025). Além disso, o aumento da temperatura de pirólise pode reduzir a reatividade do carvão e elevar a energia de ativação necessária às reações de combustão, evidenciando a relação entre as condições de produção, a estrutura carbonácea e o comportamento térmico do material (Gao et al., 2025).

A granulometria também interfere na ignição de materiais carbonáceos, pois modifica a área superficial disponível, o transporte de oxigênio e os mecanismos de transferência de calor. Partículas menores apresentam maior área superficial específica e maior área de contato para as reações de oxidação, podendo atingir a ignição em menor tempo do que partículas maiores. Entretanto, essa relação não depende exclusivamente do tamanho individual das partículas, uma vez que a aglomeração, a porosidade da camada e a distribuição granulométrica podem alterar a difusão do oxigênio e a retenção de calor (Li et al., 2020). Para materiais derivados de biomassa, a forma frequentemente irregular ou fibrosa das partículas e as condições do método experimental tornam essa influência ainda mais complexa, não sendo adequado caracterizar o comportamento do material apenas por um único parâmetro granulométrico (Castells et al., 2023).

Embora os efeitos da temperatura de pirólise sobre a composição e a estrutura dos materiais carbonáceos sejam amplamente estudados, ainda são limitadas as avaliações que relacionam diretamente essas alterações químicas à temperatura de ignição do carvão vegetal. Da mesma forma, a influência da granulometria necessita ser considerada para compreender de maneira mais abrangente sua resposta ao aquecimento. Assim, este estudo teve como objetivo avaliar a influência da temperatura final de pirólise e da granulometria sobre a temperatura de ignição do carvão vegetal de *Eucalyptus* sp., relacionando seu comportamento térmico às alterações químicas identificadas por espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier.

2. Material e métodos

Obtenção e preparo dos materiais

O carvão vegetal foi produzido a partir de madeira de *Eucalyptus* sp., proveniente de árvores colhidas aos sete anos de idade. A madeira foi seccionada em cunhas e posteriormente submetida à pirólise em forno mufla, considerando quatro temperaturas finais: 350, 450, 550 e 650 °C. O processo foi conduzido com taxa de aquecimento de 6 °C min^{-1} e tempo de residência de 120 minutos.

Análises realizadas

Foi realizada análise de espectros de infravermelho com transformada de Fourier (FT-IR) usando um espectrofotômetro Bruker, modelo Tensor 27 (Billerica, USA), à temperatura ambiente, em uma faixa de frequência de 400-4000 cm^{-1}, com resolução de 4 cm^{-1}, para identificar os grupos funcionais presentes na estrutura das amostras.

Para a determinação da temperatura de ignição, o carvão foi previamente moído, peneirado e separado em três frações granulométricas: >40 mesh, 40/60 mesh e 60/100 mesh. Posteriormente, cinco gramas de amostra foram acondicionados em cadinhos de porcelana e inseridas em forno mufla com entrada de ar, previamente aquecido a 100 °C. Antes do início do ensaio, as amostras permaneceram nessa condição durante 3 minutos para estabilização térmica.

O ensaio consistiu na exposição das amostras ao calor do forno durante diferentes intervalos de tempo, promovendo o aumento gradual da temperatura. A resposta térmica foi monitorada com uma câmera termográfica Testo 868. O tempo inicial de exposição ao calor foi estabelecido em 20 s, sendo incrementado progressivamente a cada três repetições, de acordo com o comportamento térmico das amostras, a fim de avaliar a suscetibilidade do material à ignição. Ao término de cada período, o forno foi desligado, interrompendo-se o fornecimento externo de calor, e a temperatura da amostra foi monitorada até atingir condição de estabilização. Após essa etapa, o monitoramento foi mantido por mais 5 min para verificar a ocorrência de autoaquecimento do material. Considerou-se como indicativo de autoaquecimento a retomada do aumento da temperatura após sua estabilização sendo superior a 10%, na ausência de aporte térmico externo.

Análises estatísticas

O experimento foi conduzido em delineamento inteiramente casualizado (DIC), sob arranjo fatorial 4 x 3, totalizando 12 combinações de tratamentos com 3 repetições cada (N = 36 unidades experimentais). Os fatores avaliados consistiram em quatro temperaturas de pirólise (350, 450, 550 e 650 °C) e três faixas granulométricas (>40 mesh, 40/60 mesh e >60/100 mesh). Os dados de temperatura de ignição foram submetidos à análise de variância (ANOVA) após a validação dos pressupostos de normalidade dos resíduos (Shapiro-Wilk, $p > 0,05$) e homogeneidade de variâncias (Levene, $p > 0,05$). Diante da ausência de interação significativa entre os fatores ($p = 0,0669$), os efeitos simples foram desdobrados individualmente, aplicando-

se análise de regressão polinomial para o fator quantitativo (temperatura) e o teste de Tukey (α = 0,05) para o fator qualitativo (granulometria). As análises foram realizadas no software R.

3. Resultados e discussão

Os espectros de FTIR evidenciaram alterações estruturais associadas à intensificação do processo de pirólise (Figura 1).

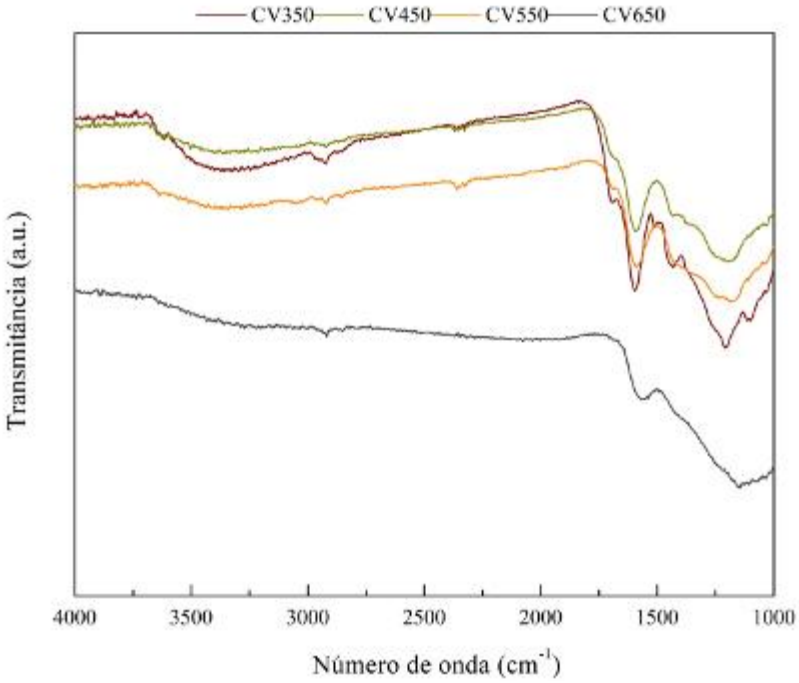


Figura 1 – Espectros de FTIR do material avaliado em diferentes temperaturas.

Observou-se redução progressiva na intensidade das bandas relacionadas aos grupos hidroxila (–OH) e carbonila (C=O), característicos de compostos fenólicos e carboxílicos. Esse comportamento indica a degradação dos componentes hemicelulósicos e celulósicos com o aumento da temperatura de pirólise (Apaydın Varol & Mutlu, 2023). O desaparecimento ou enfraquecimento dessas bandas, associado ao aumento das vibrações correspondentes às ligações aromáticas C=C, próximas a 1600 cm^{-1} (Janu et al., 2021), sugere maior condensação dos anéis aromáticos e, consequentemente, a formação de estruturas carbonáceas mais estáveis.

Além disso, a redução da intensidade das bandas atribuídas às ligações C–O, observadas aproximadamente entre 1050 e 1200 cm^{-1} (Kubo & Kadla, 2005), sugere a perda de oxigênio estrutural e o avanço do processo de carbonização. Essas alterações corroboram o aumento da temperatura de ignição dos carvões produzidos em temperaturas de pirólise mais elevadas

(Figura 2), uma vez que o aumento do teor de carbono fixo e da aromaticidade da matriz carbonácea reduz a reatividade térmica do material.

Figura 2 – Temperatura de ignição do carvão vegetal produzido em diferentes temperaturas de pirólise.

A temperatura de ignição do carvão vegetal aumentou com a elevação da temperatura de pirólise. O carvão produzido a 350 °C apresentou temperatura média de ignição de 273 °C. A amostra obtida a 450 °C, por sua vez, entrou em ignição a 289 °C, representando um aumento de 16 °C em relação ao tratamento anterior. Os carvões produzidos a 550 e 650 °C apresentaram temperaturas de ignição de 337 e 424 °C, respectivamente.

Gao et al. (2025), ao avaliarem madeira de *Robinia pseudoacacia* submetida à pirólise, também observaram aumento da temperatura de ignição com a elevação da temperatura do processo. De modo semelhante, Bouesso et al. (2025), ao estudarem carvão vegetal proveniente de biomassa lenhosa, relataram temperatura de ignição de 371 °C para o material produzido a 600 °C. Esses resultados corroboram a tendência observada no presente estudo e indicam que temperaturas mais elevadas de pirólise conferem maior estabilidade térmica ao carvão vegetal.

Essa estabilidade está relacionada às modificações químicas e estruturais promovidas pela carbonização, entre as quais se destacam a redução do teor de compostos voláteis, o aumento da aromaticidade da matriz carbonácea e a diminuição da presença de grupos funcionais oxigenados (Batista & Gomes, 2021; Uzoagba et al., 2026). Como consequência, o material torna-se mais estável e menos reativo, apresentando maior resistência às reações iniciais de oxidação e necessitando de temperaturas mais elevadas para entrar em ignição.

A Figura 3 apresenta a influência da granulometria sobre a temperatura de ignição do carvão vegetal. As amostras constituídas por partículas maiores (>40 mesh) apresentaram a maior temperatura de ignição, com média de 330,75 °C. Por outro lado, as frações de menor granulometria, correspondentes a 40/60 e 60/100 mesh, entraram em ignição em temperaturas médias de 312,58 e 315,33 °C, respectivamente.

Figura 3 – Temperatura de ignição do carvão vegetal em diferentes granulometrias.

Esse comportamento pode estar relacionado ao aumento da área superficial específica das partículas menores, que amplia o contato do material com o oxigênio atmosférico e favorece

a ocorrência das reações de oxidação (Li et al., 2020). Resultados semelhantes foram relatados por Glushkov et al. (2023) e He et al. (2023), que observaram aumento da temperatura de ignição com o aumento do tamanho das partículas em combustíveis carbonáceos. Portanto, a granulometria influencia diretamente as reações de oxidação e, consequentemente, a temperatura de ignição do carvão vegetal (Castells et al., 2023; Joshi et al., 2012).

Os resultados demonstram que a ignição dos carvões produzidos a 350, 450, 550 e 650 °C ocorreu apenas mediante exposição a temperaturas elevadas. Assim, nas condições avaliadas, os materiais não apresentaram ignição espontânea, uma vez que foi necessário o fornecimento adicional de calor para iniciar o processo de combustão.

4. Conclusões

A temperatura final de pirólise e a granulometria influenciaram a ignição do carvão vegetal. Temperaturas mais elevadas de pirólise aumentaram a estabilidade térmica do material, resultando em maiores temperaturas de ignição, enquanto partículas de menor granulometria apresentaram menores temperaturas de ignição.

Nas condições avaliadas, a ignição dos carvões ocorre mediante exposição a temperaturas elevadas e fornecimento adicional de calor, não sendo observada ignição espontânea. Estudos complementares em condições ambientais e com outras faixas granulométricas são recomendados, a fim de ampliar a compreensão sobre o comportamento térmico e a segurança de armazenamento e manuseio do carvão vegetal.

5. Agradecimentos

Os autores agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação do Espírito Santo (FAPES), à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e à Universidade Federal do Espírito Santo (UFES) pelo apoio financeiro, institucional e estrutural concedido para o desenvolvimento deste trabalho.

6. Referências bibliográficas

Apaydın Varol, E., & Mutlu, Ü. (2023). TGA-FTIR analysis of biomass samples based on the thermal decomposition behavior of hemicellulose, cellulose, and lignin. *Energies, 16*(9), 3674. https://doi.org/10.3390/en16093674

Batista, R. R., & Gomes, M. M. (2021). Effects of chemical composition and pyrolysis process variables on biochar yields: Correlation and principal component analysis.

Floresta e Ambiente, 28(3), e20210007. https://doi.org/10.1590/2179-8087-FLORAM-2021-0007

Bouesso, B., González Martínez, M., & Nzihou, A. (2025). Co-combustion of anthracite coal and biomass-derived biocarbons: Reaction kinetics and combustion performance indicators. *Biomass and Bioenergy, 201*, 108117. https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2025.108117

Castells, B., Tascón, A., Amez, I., & Fernandez-Anez, N. (2023). Influence of particle size on the flammability and explosibility of biomass dusts: Is a new approach needed? *Fire Technology, 59*, 2989–3025. https://doi.org/10.1007/s10694-023-01468-7

Gao, L., Ma, X., Cheng, J., & Liu, Y. (2025). The effect of preparation process on combustibility of Robinia pseudoacacia charcoal and its structure-performance relationship. *Scientific Reports*, 15, 14563. https://doi.org/10.1038/s41598-025-99467-x

Glushkov, D., Zhuikov, A., Zemlyansky, N., Pleshko, A., Fetisova, O., & Kuznetsov, P. (2023). Influence of the composition and particle sizes of the fuel mixture of coal and biomass on the ignition and combustion characteristics. *Applied Sciences*, 13(19), 11060. https://doi.org/10.3390/app131911060

He, J., Guo, D., Zhang, J., Yu, P., Shen, M., & Zhang, G. (2023). Analysis of ignition characteristics and influencing factors of combustible fly ash in boiler start-up stage flue gas. *Energies*, 16(17), 6114. https://doi.org/10.3390/en16176114

Janu, R., Mrlik, V., Ribitsch, D., Hofman, J., Sedláček, P., Bielská, L., & Soja, G. (2021). Biochar surface functional groups as affected by biomass feedstock, biochar composition and pyrolysis temperature. *Carbon Resources Conversion*, 4, 36–46. https://doi.org/10.1016/j.crcon.2021.01.003

Joshi, K. A., Raghavan, V., & Rangwala, A. S. (2012). An experimental study of coal dust ignition in wedge shaped hot plate configurations. *Combustion and Flame*, 159(1), 376–384. https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2011.06.003

Kubo, S., & Kadla, J. F. (2005). Hydrogen bonding in lignin: A Fourier transform infrared model compound study. *Biomacromolecules*, 6(5), 2815–2821. https://doi.org/10.1021/bm050288q

Li, B., Li, M., Gao, W., Bi, M., Ma, L., Qin, Q., & Shu, C.-M. (2020). Effects of particle size on the self-ignition behaviour of a coal dust layer on a hot plate. *Fuel*, 260, 116269. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.116269

Uzoagba, C. E. J., Bello, A., Ngasoh, F. O., & Onwualu, A. P. (2026). Effect of pyrolysis temperature on physicochemical characteristics of biochar derived from rapid pyrolysis of Prosopis africana biomass. *Biofuels*, 17(1), 57–64. https://doi.org/10.1080/17597269.2025.2506857

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Influência das propriedades térmicas da madeira de café na pirólise rápida oxidativa em leito fluidizado

Elém Patrícia Alves Rocha[1,3]; Clara Lisseth Mendoza Martinez[2]; Diego Henrique de Souza Chaves[3]; Taís Resende Costa[3]; Carla Cristina Araújo Parreira[3]; Marcelo Cardoso[3]

[1] Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri - UFVJM
[2] Universidade Politécnica de Lappeenranta - LUT
[3] Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG

Resumo: Este trabalho avaliou a influência das propriedades térmicas da madeira de café (*Coffea arabica L.*) na distribuição dos produtos obtidos por pirólise rápida oxidativa em leito fluidizado. A biomassa foi caracterizada por análise imediata, poder calorífico superior (PCS) e análises termogravimétricas (TG/DTG) a 50 °C min^{-1} sob atmosferas inerte (N2) e oxidante (ar). Os ensaios de pirólise ocorreram em unidade piloto contínua a 500 °C, fluidizada com ar e gases recirculados. A madeira de café apresentou elevado teor de materiais voláteis (80,63%), baixo teor de cinzas (1,50%) e PCS de 16,28 MJ kg^{-1}. A degradação térmica principal ocorreu entre 223 °C e 434 °C, com massa residual de 20,4% em N_2, a qual cai para 2,75% em ar devido à queima do carvão. A pirólise rápida oxidativa resultou em rendimentos de 14,69% de bio-óleo pesado, 23,20% de bio-óleo leve, 14,75% de carvão e 47,35% de gases. Os resultados demonstram que as propriedades térmicas da madeira de café influenciam diretamente a distribuição dos produtos da pirólise, evidenciando o potencial desse resíduo lignocelulósico como matéria-prima para a produção de bioenergia e bioprodutos.

Palavras-chave: Resíduos; Análise Termogravimétrica; Conversão Termoquímica.

Influence of Coffee Wood Thermal Properties on Fast Oxidative Pyrolysis Performance in a Fluidized Bed

Abstract: This study evaluated the influence of the thermal properties of coffee wood (*Coffea arabica L.*) on the product distribution obtained from fast oxidative pyrolysis in a fluidized bed. The biomass was characterized by proximate analysis, higher heating value (HHV), and thermogravimetric analysis (TG/DTG) at 50 °C min^{-1} under inert (N_2) and oxidizing (air) atmospheres. Pyrolysis trials were carried out in a continuous pilot unit at 500 °C, fluidized with air and recirculated gases. Coffee wood featured a high volatile matter content (80.63%), low ash content (1.50%), and an HHV of 16.28 MJ kg^{-1}. The main thermal degradation occurred between 223 °C and 434 °C, with a residual mass of 20.4% under N_2, which dropped to 2.75% under air due to char combustion. Fast oxidative pyrolysis resulted in yields of 14.69% heavy bio-oil, 23.20% light bio-oil, 14.75% char, and 47.35% gases. The results demonstrate that the thermal properties of coffee wood directly influence the distribution of pyrolysis products, highlighting the potential of this lignocellulosic residue as a feedstock for the production of bioenergy and bioproducts.

Keywords: Residues; Thermogravimetric Analysis; Thermochemical Conversion.

1. Introdução

A crescente demanda por fontes renováveis de energia e a necessidade de redução das emissões de gases de efeito estufa têm impulsionado o aproveitamento energético de resíduos lignocelulósicos. No Brasil, políticas públicas como a Política Nacional de Biocombustíveis (RenovaBio) têm estimulado o desenvolvimento de rotas tecnológicas voltadas à produção de biocombustíveis e à valorização de resíduos agroindustriais (Brasil, 2017; Brasil, 2024). Nesse contexto, processos de conversão termoquímica destacam-se pela capacidade de transformar biomassas residuais em combustíveis sólidos, líquidos e gasosos de interesse energético (Basu, 2018; Bridgwater, 2012).

O Brasil é o maior produtor mundial de café e gera quantidades expressivas de resíduos lignocelulósicos ao longo de sua cadeia produtiva (CONAB, 2025). Entre esses resíduos destacam-se os materiais lenhosos provenientes da renovação periódica das lavouras, cuja utilização energética ainda é limitada. Estudos indicam que a madeira de café apresenta características favoráveis à conversão termoquímica, incluindo elevado teor de materiais voláteis e conteúdo significativo de lignina (Martinez *et al.*, 2019). Além disso, a valorização energética desses resíduos tem sido apontada como uma alternativa para a produção sustentável de biocombustíveis e bioprodutos (Martinez *et al.*, 2021).

Entre as tecnologias de conversão termoquímica, a pirólise rápida tem recebido atenção por sua capacidade de converter biomassa em produtos líquidos, sólidos e gasosos. Em reatores de leito fluidizado, a elevada transferência de calor favorece a rápida devolatilização da biomassa, tornando essa tecnologia uma das mais empregadas para a produção de bio-óleo em escala piloto e industrial (Bridgwater, 2012; Joubert *et al.*, 2015). A introdução controlada de oxigênio no processo, caracterizando a pirólise rápida oxidativa, pode reduzir a demanda energética do sistema sem comprometer significativamente a produção de líquidos (Amutio *et al.*, 2012; Sellin *et al.*, 2016).

A distribuição dos produtos obtidos durante a pirólise depende tanto das condições operacionais quanto das propriedades da biomassa. Parâmetros como teor de materiais voláteis, teor de lignina e comportamento de degradação térmica influenciam diretamente a formação de bio-óleo, carvão e gases (Yang *et al.*, 2007; Lu *et al.*, 2022). Nesse contexto, a análise termogravimétrica constitui uma ferramenta importante para avaliar a estabilidade térmica da biomassa e compreender os mecanismos envolvidos em sua conversão termoquímica.

Dessa forma, o objetivo deste trabalho foi avaliar a influência das propriedades térmicas da madeira de café na distribuição dos produtos obtidos por pirólise rápida oxidativa

em leito fluidizado. Para isso, a biomassa foi caracterizada por análises físico-químicas e termogravimétricas, sendo os resultados correlacionados aos rendimentos de líquidos, carvão e gases obtidos em unidade piloto de leito fluidizado.

2. Material e métodos

2.1 Matéria-prima e caracterização

A madeira de cafeeiro (*Coffea arabica* L.), proveniente de plantas com aproximadamente 11 anos de idade, foi obtida em uma propriedade rural localizada no município de Paula Cândido, Minas Gerais, Brasil. Após a coleta, a biomassa foi submetida à redução de tamanho em triturador e classificada granulometricamente segundo a norma ASTM E828-81. As partículas utilizadas nos ensaios apresentaram diâmetro médio de 1,42 mm e densidade aparente de 660 kg m^{-3}.

A caracterização da biomassa foi realizada por meio de análise imediata para determinação dos teores de umidade, materiais voláteis e cinzas, de acordo com as normas EN 14774-2, EN 15148 e EN 14775, respectivamente. O teor de carbono fixo foi calculado por diferença. O poder calorífico superior (PCS) foi determinado em calorímetro bomba Parr 6300, conforme a norma DIN 51900-1. A densidade aparente foi determinada conforme a norma ASTM E873.

O comportamento térmico da biomassa foi avaliado por análises termogravimétricas (TG) e termogravimetria derivada (DTG) utilizando equipamento DTG-60H (Shimadzu). Os ensaios foram conduzidos em atmosferas de nitrogênio e ar, empregando taxa de aquecimento de 50 °C min^{-1} e vazão de gás de 30 mL min^{-1}. As amostras foram aquecidas da temperatura ambiente até 550 °C, sendo registradas as variações de massa em função da temperatura.

2.2 Pirólise rápida oxidativa

Os experimentos de pirólise rápida foram realizados em uma unidade piloto contínua de leito fluidizado borbulhante, composta por sistema de alimentação de biomassa, reator, ciclone para coleta de partículas sólidas, sistema de condensação dos vapores e unidade de recuperação de bio-óleo.

O reator apresenta diâmetro interno de 200 mm e altura de 935 mm. Como material de leito foi utilizada areia de quartzo, enquanto a fluidização foi promovida por uma mistura de ar e gases recirculados. A temperatura média de operação foi mantida em 500 ± 10 °C, com

alimentação de biomassa de 23,79 kg h^{-1}. As vazões dos agentes de fluidização foram de 13 $Nm^3 h^{-1}$ para o ar e 7 $Nm^3 h^{-1}$ para os gases recirculados.

Durante a operação, os vapores gerados foram conduzidos para um sistema de condensação composto por trocador de calor do tipo casco e tubos e separador centrífugo, permitindo a obtenção de duas frações líquidas, denominadas bio-óleo pesado e bio-óleo leve. O carvão produzido foi separado em ciclone e coletado em recipiente apropriado, enquanto a fração gasosa permaneceu como produto não condensável do processo.

A temperatura e a pressão do sistema foram monitoradas continuamente por meio de termopares e transdutores de pressão distribuídos ao longo do reator, possibilitando a avaliação da estabilidade operacional durante os ensaios.

Ao final de cada experimento, as frações líquida e sólida foram coletadas e pesadas. Os rendimentos de bio-óleo pesado, bio-óleo leve e carvão foram calculados em base seca, considerando a massa de biomassa alimentada ao reator. O rendimento de gases foi obtido por balanço de massa.

3. Resultados e discussão

3.1 Caracterização energética da madeira de café

A Tabela 1 apresenta as propriedades físico-químicas e energéticas da madeira de café em comparação com outras biomassas lignocelulósicas utilizadas em processos de conversão termoquímica.

Tabela 1 – Propriedades físico-químicas e energéticas da madeira de café e de biomassas lignocelulósicas reportadas na literatura.

Parâmetros	**Madeira de café**	**Eucalipto (Martinez *et al.*, 2023)**	**Capim Elefante (Sellin *et al.*, 2016)**	**Bagaço de cana (Rocha *et al.*, 2015)**
Densidade (kg m^{-3})	660,0	508	–	610
Materiais voláteis (%)*	80,63	86,34	63,30	90,35
Carbono fixo (%)*	17,88	12,89	15,50	1,02
Cinzas (%)*	1,50	0,76	4,90	8,74
PCS (MJ kg^{-1})	16,28	14,18	14,70	19,10

*Base seca

A densidade aparente da madeira de café (660 kg m^{-3}) foi superior à observada para o eucalipto residual (508 kg m^{-3}) e para o bagaço de cana-de-açúcar (610 kg m^{-3}), indicando maior concentração de energia por unidade de volume. Além disso, o reduzido teor de cinzas (1,5%) constitui uma característica favorável para aplicações termoquímicas, uma vez que minimiza a ocorrência de incrustações, deposição de material inorgânico e outros problemas operacionais frequentemente associados a biomassas com elevada concentração mineral. O elevado teor de materiais voláteis (80,63%) evidencia o potencial da biomassa para geração de vapores durante processos de aquecimento, enquanto o teor de carbono fixo de 17,88% sugere potencial para formação de carvão durante a conversão térmica.

A Figura 1 mostra as curvas obtidas na análise termogravimétrica da madeira de café obtidas em atmosfera de nitrogênio e ar, utilizando taxa de aquecimento de 50 °C min^{-1}.

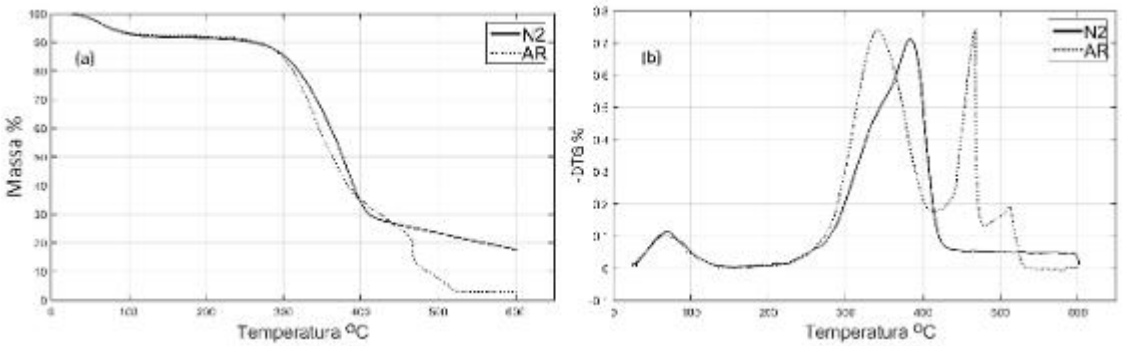


Figura 1 – Curvas TG (a) e DTG (b) da madeira de café obtidas em atmosfera de nitrogênio e ar, utilizando taxa de aquecimento de 50 °C min^{-1}.

O perfil de decomposição observado é coerente com a composição química da madeira de café reportada por Martinez *et al.* (2019), constituída predominantemente por carboidratos estruturais (52,70% de açúcares totais) e lignina total de aproximadamente 29,57%, além de apresentar comportamento semelhante ao observado para outras biomassas lignocelulósicas (Rocha *et al.*, 2015). Em ambas as atmosferas foi observada uma pequena perda de massa em temperaturas inferiores a 120 °C, associada principalmente à remoção da umidade residual presente na biomassa.

A principal etapa de degradação térmica ocorreu entre aproximadamente 223 °C e 434 °C em atmosfera inerte, sendo a máxima taxa de perda de massa observada a 383 °C. Essa faixa de temperatura está associada à decomposição dos principais constituintes lignocelulósicos da biomassa. A degradação inicial é atribuída principalmente às

hemiceluloses, que apresentam menor estabilidade térmica, seguida pela rápida decomposição da celulose, responsável pela maior taxa de perda de massa observada na curva DTG. Em contraste, a lignina apresenta degradação mais lenta e distribuída em uma ampla faixa de temperaturas, característica associada à sua estrutura aromática complexa e elevada estabilidade térmica.

A massa residual de aproximadamente 20,4% observada a 550 °C em atmosfera inerte indica a formação de uma fração carbonácea relativamente estável. Esse resultado é compatível com o teor de lignina presente na biomassa e sugere potencial para produção de carvão durante processos de conversão termoquímica. A lignina é reconhecida como importante precursora da formação de estruturas carbonáceas durante a pirólise devido à sua elevada aromaticidade e à ocorrência de reações de condensação e repolimerização que favorecem a formação de char (Lu *et al.*, 2022).

Em atmosfera oxidante observou-se comportamento distinto, caracterizado pela ocorrência de uma segunda etapa de degradação associada à oxidação do resíduo carbonáceo formado durante o aquecimento. O pico dessa etapa ocorreu em aproximadamente 468 °C, promovendo redução significativa da massa residual. Como consequência, a massa remanescente a 550 °C foi reduzida para apenas 2,75%, enquanto em atmosfera inerte permaneceu próxima de 20%. Esse comportamento evidencia a influência do oxigênio na conversão da fração carbonácea em produtos gasosos, reduzindo significativamente a quantidade de resíduo sólido remanescente.

3.2 Desempenho da pirólise rápida oxidativa da madeira de café

A Tabela 2 apresenta as condições operacionais e a distribuição dos produtos obtidos durante a pirólise rápida oxidativa da madeira de café em comparação com resultados reportados para outras biomassas processadas em reatores de leito fluidizado sob condições semelhantes.

Tabela 2 – Distribuição dos produtos obtidos na pirólise rápida oxidativa de diferentes biomassas em reatores de leito fluidizado.

Biomassa	Alimentação ($kg\ h^{-1}$)	Temperatura (°C)	Bio-óleo pesado (%)	Bio-óleo leve (%)	Carvão (%)	Gases (%)
Madeira de	23,79	500	14,69	23,20	14,75	47,35

café						
Eucalipto (Martinez *et al.*, 2023)	20	500	22,65	17,07	15,35	37,70
Folhas de bananeira (Sellin *et al.*, 2015)	12	500	17,00	10,00	23,30	49,60

Rendimentos expressos em porcentagem mássica com base na biomassa seca alimentada.

Os ensaios foram realizados em um reator de leito fluidizado operando a aproximadamente 500 °C, utilizando ar como agente de fluidização. Nessas condições, a pirólise da madeira de café resultou em rendimentos de 14,69% de bio-óleo pesado, 23,20% de bio-óleo leve, 14,75% de carvão e 47,35% de gases. O rendimento total de líquidos foi de 37,89%.

Comparativamente ao eucalipto estudado por Martinez *et al.* (2023), a madeira de café apresentou rendimento total de líquidos ligeiramente inferior e maior produção de gases, mantendo rendimento de carvão da mesma ordem de grandeza. Em relação às folhas de bananeira avaliadas por Sellin *et al.* (2015), observou-se maior produção de líquidos e menor formação de carvão. Essas diferenças evidenciam a influência das características físico-químicas da biomassa e das condições operacionais sobre a distribuição dos produtos gerados durante a pirólise rápida.

A distribuição dos produtos obtidos pode ser parcialmente explicada pelas características físico-químicas e térmicas da madeira de café. O elevado teor de materiais voláteis (86,35%) favorece a formação de vapores durante o aquecimento, contribuindo para a geração de bio-óleo e gases (Vamvuka, 2011). Por outro lado, o teor relativamente elevado de carbono fixo (17,88%) e a presença de aproximadamente 29,57% de lignina favorecem a formação de resíduos carbonáceos durante a decomposição térmica da biomassa.

Os resultados da análise termogravimétrica mostraram que a principal etapa de degradação da madeira de café ocorreu entre aproximadamente 223 °C e 434 °C, com máxima taxa de perda de massa observada a 383 °C. Considerando que o reator operou a aproximadamente 500 °C, verifica-se que a biomassa foi submetida a temperaturas superiores àquelas correspondentes à principal faixa de devolatilização observada na TG. Dessa forma, as condições operacionais foram suficientes para promover intensa decomposição dos componentes lignocelulósicos e formação de produtos voláteis.

Temperaturas próximas de 500 °C associadas a elevados coeficientes de transferência de calor são características típicas de processos de pirólise rápida em leito fluidizado (Bridgwater, 2012), favorecendo a conversão da biomassa em vapores condensáveis e gases. No presente estudo, a elevada taxa de devolatilização observada na TG foi compatível com a significativa produção de compostos voláteis observada durante a pirólise.

Entretanto, diferentemente da análise termogravimétrica realizada em atmosfera inerte, a pirólise rápida foi conduzida na presença de ar. A influência do oxigênio pode ser observada na curva TG obtida em atmosfera oxidante, na qual ocorreu uma segunda etapa de degradação associada à oxidação do resíduo carbonáceo, com pico próximo de 468 °C. Como a operação do reator ocorreu acima dessa temperatura, parte do carvão e dos vapores provavelmente sofreu oxidação parcial e craqueamento térmico. Isso justifica o elevado rendimento de gases observado (47,35%), que superou o de bio-óleo total (37,89%).

Além disso, a massa residual de aproximadamente 20,4% observada na TG em atmosfera inerte apresentou a mesma ordem de grandeza do rendimento de carvão obtido experimentalmente (14,75%). Embora os resultados não sejam diretamente comparáveis devido às diferenças entre as condições da análise termogravimétrica e da pirólise rápida, essa proximidade sugere que a TG foi capaz de representar adequadamente a tendência de formação da fração sólida da biomassa. A menor quantidade de carvão produzida na planta pode ser atribuída às elevadas taxas de aquecimento e à presença de oxigênio durante o processo, fatores que favorecem a conversão da fração carbonácea em produtos gasosos.

De modo geral, os resultados demonstram que as propriedades térmicas da madeira de café exercem influência direta sobre a distribuição dos produtos obtidos durante a pirólise rápida oxidativa. A elevada devolatilização observada na análise termogravimétrica favoreceu a formação de líquidos e gases, enquanto a fração lignínica da biomassa contribuiu para a geração do carvão produzido durante o processo.

4. Conclusões

A madeira de café apresentou características adequadas para conversão termoquímica, com elevado teor de materiais voláteis (80,63%), baixo teor de cinzas (1,50%) e poder calorífico superior de 16,28 MJ kg^{-1}. As análises termogravimétricas indicaram que a principal etapa de degradação térmica ocorreu entre 223 °C e 434 °C, com máxima taxa de perda de massa em 383 °C. Em atmosfera inerte, a biomassa apresentou massa residual de 20,4%, evidenciando potencial para formação de carvão. Na pirólise rápida oxidativa realizada a 500 °C, foram

obtidos rendimentos de 14,69% de bio-óleo pesado, 23,20% de bio-óleo leve, 14,75% de carvão e 47,35% de gases.

Os resultados mostraram que as propriedades térmicas da madeira de café influenciam a distribuição dos produtos da pirólise rápida oxidativa. A elevada devolatilização favoreceu a formação de líquidos e gases, enquanto a fração lignínica contribuiu para a geração da fração sólida.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), Código de Financiamento 001, e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pelo apoio financeiro concedido por meio do Edital nº 16/2025 (Processo nº 44712/2025-2).

Referências bibliográficas

Amutio, M., Lopez, G., Aguado, R., Bilbao, J., & Olazar, M. (2012). Biomass oxidative flash pyrolysis: Autothermal operation, yields and product properties. *Energy & Fuels, 26*(2), 1353–1362. https://doi.org/10.1021/ef201555x

Basu, P. (2018). *Biomass gasification, pyrolysis and torrefaction: Practical design and theory* (3rd ed.). Academic Press.

Brasil. (2017). *Lei nº 13.576, de 26 de dezembro de 2017. Institui a Política Nacional de Biocombustíveis (RenovaBio).* https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2015-2018/2017/lei/l13576.htm

Brasil. (2024). *Lei nº 15.082, de 30 de dezembro de 2024. Altera a Lei nº 13.576, que dispõe sobre a Política Nacional de Biocombustíveis (RenovaBio).* https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2023-2026/2024/Lei/L15082.htm

Bridgwater, A. V. (2012). Review of fast pyrolysis of biomass and product upgrading. *Biomass and Bioenergy, 38*, 68–94. https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2011.01.048

Companhia Nacional de Abastecimento. (2025). *Acompanhamento da safra brasileira de café: Safra 2025*. CONAB. https://www.conab.gov.br

Joubert, J.-E., Carrier, M., Dahmen, N., Stahl, R., & Knoetze, J. H. (2015). Inherent process variations between fast pyrolysis technologies: A case study on *Eucalyptus grandis*. *Fuel Processing Technology, 131*, 389–395. https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2014.12.014

Lu, X., Zhang, S., Yang, G., Chen, J., & Wang, Y. (2022). A review on lignin pyrolysis: Pyrolytic behavior, mechanism and relevant upgrading for improving lignin valorization. *International Journal of Biological Macromolecules, 209*, 1857–1875. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2022.04.117

Martinez, C. L. M., Rocha, E. P. A., Carneiro, A. C. O., Gomes, F. J. B., Batalha, L. A. R., & Vakkilainen, E. (2019). Characterization of residual biomasses from the coffee production chain and assessment of their potential for energy purposes. *Biomass and Bioenergy, 120*, 68–76. https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2018.11.005

Martinez, C. L. M., Saari, J., Melo, Y., Cardoso, M., Almeida, G. M., & Vakkilainen, E. (2021). Evaluation of thermochemical routes for the valorization of solid coffee residues to produce biofuels: A Brazilian case. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 137*, 110585. https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110585

Martinez, C. L. M., Sermyagina, E., Saari, J., Ramos, V. F., Vakkilainen, E., Cardoso, M., & Rocha, E. P. A. (2023). Fast oxidative pyrolysis of eucalyptus wood residues to replace fossil oil in pulp industry. *Energy, 263*, 126076. https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.126076

Rocha, E. P. A., Gomes, F. J. B., Sermyagina, E., Cardoso, M., & Colodette, J. L. (2015). Analysis of Brazilian biomass focusing on thermochemical conversion for energy production. *Energy & Fuels, 29*(12), 7975–7984. https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.5b01984

Sellin, N., Krohl, D. R., Marangoni, C., & Souza, O. (2016). Oxidative fast pyrolysis of banana leaves in fluidized bed reactor. *Renewable Energy, 96*(Part A), 56–64. https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.04.047

Vamvuka, D. (2011). Bio-oil, solid and gaseous biofuels from biomass pyrolysis processes—An overview. *International Journal of Energy Research, 35*(10), 835–862. https://doi.org/10.1002/er.1804

Yang, H., Yan, R., Chen, H., Lee, D. H., & Zheng, C. (2007). Characteristics of hemicellulose, cellulose and lignin pyrolysis. *Fuel, 86*(12–13), 1781–1788. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2006.12.013

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Influência do teor de farinha de milho no desempenho de briquetes de finos de carvão

Maria Dolores Meza Sanabria[1]; Mariane Silva[1]; Lizbeth Rosario Meza Sanabria[1]; Lúcia Maria Joaquim Assane[1]; Douglas Lamounier Faria[1]; Thiago de Paula Protasio[1]; Paulo Fernando Trugilho[1].

[1] Universidade Federal de Lavras (UFLA), Lavras/MG, Brasil.

Resumo: Este trabalho tem como objetivo avaliar briquetes produzidos com finos de carvão utilizando 4, 6, 8, 10 e 12 % de farinha de milho. Os finos apresentaram 5,9 % de umidade, 69,1 % de carbono fixo, PCS de 6.162 cal g^{-1} e densidade a granel de 0,4732 g cm^{-3}; 72,74 % da massa concentrou-se entre 20 e 40 mesh. Nos briquetes produzidos com finos de carvão, entre 4 e 12% o PCS apresentou resposta quadrática ($p<0,001$; $R^2=0,950$), com redução no intervalo estudado. A carga e a tensão máximas apresentaram resposta cúbica ($p<0,001$; $R^2=0,820$), com máximo estimado próximo de 10 % de farinha. A rigidez apresentou máximo estimado em 8,7%, e a energia até o pico aumentou linearmente. T0 foi utilizado apenas como referência dos finos soltos. Conclui-se que a produção de briquetes de finos de carvão quando associados ao alglutinante à base de farinha de milho possui boas características físicas, mecânicas e energéticas para geração de energia.

Palavras-chave: Bioenergia; Aglutinante natural; Resistência mecânica.

Influence of Corn Flour Content on the Performance of Charcoal-Fines Briquettes

Abstract: This study aimed to evaluate briquettes produced from charcoal fines using 4, 6, 8, 10, and 12 % corn flour. The fines had a moisture content of 5.9 %, fixed carbon content of 69.1 %, a higher heating value (HHV) of 6,162 cal g^{-1}, and a bulk density of 0.4732 g cm^{-3}; 72.74 % of the mass was concentrated between 20 and 40 mesh. In the briquettes produced with charcoal fines and 4 to 12 % corn flour, HHV showed a quadratic response ($p < 0.001$; $R^2 = 0.950$), decreasing within the studied range. Maximum load and apparent stress showed cubic responses ($p < 0.001$; $R^2 = 0.820$), with an estimated maximum near 10 % corn flour. Stiffness reached an estimated maximum at 8 %, whereas energy up to peak increased linearly. T0 was used only as a reference for the loose charcoal fines. It was concluded that briquettes produced from charcoal fines combined with a corn-flour-based binder exhibited suitable physical, mechanical, and energetic properties for energy generation.

Keywords: Bioenergy; Natural binder; Mechanical strength.

1. Introdução

O carvão vegetal é um biocombustível sólido amplamente empregado no Brasil. Entretanto, as operações de retirada dos fornos, peneiramento, transporte, armazenamento e manuseio promovem a fragmentação do produto e a geração de finos. A quantidade formada varia de acordo com as características do carvão e as condições operacionais, podendo representar aproximadamente 20 a 25 % do material produzido ou manuseado (Chipangura *et al.*, 2024). Embora apresentem reduzida granulometria e baixa densidade a granel, esses resíduos conservam parte expressiva do carbono e do potencial energético do carvão de origem, tornando seu aproveitamento por densificação uma alternativa para reduzir perdas e agregar valor ao processo produtivo.

A briquetagem constitui uma alternativa para concentrar a energia dos finos em produtos com forma definida, maior densidade e melhores condições de transporte e armazenamento. Como a carbonização reduz os componentes naturais responsáveis pela ligação entre partículas, a produção de briquetes de carvão geralmente requer a incorporação de aglutinantes. A qualidade final depende da interação entre granulometria, umidade, tipo e teor do ligante, pressão de compactação e secagem, devendo ser avaliada por propriedades energéticas e mecânicas (Obi *et al.,* 2022).

A farinha de milho é um material rico em amido e pode atuar como aglutinante natural quando hidratada e distribuída entre as partículas. O ligante contribui para a coesão do produto, mas sua proporção altera a quantidade relativa de carvão presente na formulação. Estudos com amido de milho e outros ligantes amiláceos demonstram efeitos sobre densidade, resistência à compressão e estabilidade dos briquetes, enquanto níveis excessivos podem reduzir o poder calorífico por substituição parcial da fração carbonizada (Aransiola *et al.*, 2019; Lomunyak *et al.*, 2024).

A avaliação tecnológica dos briquetes deve integrar propriedades energéticas, físicas, químicas e mecânicas. O poder calorífico superior representa a energia disponível por unidade de massa, enquanto sua associação com a densidade aparente permite estimar a densidade energética volumétrica, parâmetro relevante para o armazenamento, o transporte e o uso do combustível. A composição elementar, especialmente os teores de carbono, hidrogênio, nitrogênio e enxofre, auxilia na interpretação do potencial energético, do comportamento durante a combustão e da possível formação de emissões de óxidos de nitrogênio e enxofre.

A caracterização mecânica, por meio da compressão diametral, permite avaliar a coesão e a integridade estrutural dos briquetes. Na compressão diametral, parâmetros como carga máxima, tensão máxima aparente, rigidez e energia absorvida até o pico caracterizam a resistência e a capacidade de deformação do material, enquanto a resistência ao impacto indica sua aptidão para suportar as solicitações decorrentes do manuseio, armazenamento e transporte (Sanka *et al.*, 2024; Owino *et al.*, 2024; Geberehiet *et al.*, 2025).

Diante desse contexto, objetivou-se caracterizar os finos de carvão vegetal e avaliar a influência de cinco proporções de farinha de milho sobre o poder calorífico superior, a densidade aparente, a densidade energética volumétrica, a composição elementar e o desempenho em compressão diametral dos briquetes.

2. Material e métodos

2.1 Matéria-prima e delineamento experimental

O trabalho foi realizado em duas etapas na Universidade Federal de Lavras (UFLA), em Lavras, Minas Gerais. A produção dos briquetes foi conduzida na serraria da UFLA, utilizando-se finos de carvão vegetal, farinha de milho como aglutinante e água para ajuste da mistura. Posteriormente, as análises físicas, químicas, energéticas e os ensaios mecânicos foram realizados no Laboratório Multiusuário de Biomateriais e Energia da Biomassa (LAMBEB), vinculado ao Departamento de Ciências Florestais. Os finos de carvão apresentavam umidade inicial de 5,9 %.

Para padronização, T0 correspondeu aos finos de carvão sem aglutinante, empregados como material de referência, enquanto T1, T2, T3, T4 e T5 corresponderam, respectivamente, a 4, 6, 8, 10 e 12 % de farinha de milho. Os finos apresentavam 5,9 % de umidade, em base úmida; assim, para obter 5,000 kg de matéria seca, foram pesados 5,313 kg na condição de recebimento (Tabela 1).

Tabela 1 – Formulações dos briquetes de finos de carvão vegetal com farinha de milho

Tratamento	Farinha de milho (%)	Finos em base seca (kg)	Farinha (g)	Água (%)
T1	4	5,000	213	33
T2	6	5,000	319	33

T3	8	5,000	425	33
T4	10	5,000	531	33
T5	12	5,000	638	33

2.2 Caracterização dos finos de carvão vegetal

A distribuição granulométrica dos finos foi determinada por peneiramento, com adaptações da ABNT NBR 7402:1982, utilizando-se amostra nominal de 200g e peneiras de 12, 20, 40, 60, 100 e 200 mesh, além do coletor de fundo. Foram calculadas as porcentagens retida, retida acumulada e passante.

A densidade a granel foi determinada por procedimento adaptado da ABNT NBR 6922:1981, pela relação entre a massa de finos e o volume ocupado em proveta graduada.

A análise química imediata compreendeu os teores de umidade, materiais voláteis, cinzas e carbono fixo, conforme a ABNT NBR 8112:1986, sendo o carbono fixo calculado por diferença.

O PCS dos finos foi determinado em bomba calorimétrica, conforme a ABNT NBR 8633:1984, considerando-se três repetições validadas.

Os teores de carbono, hidrogênio e nitrogênio foram determinados conforme a ISO 16948:2015, e o enxofre conforme a ISO 16994:2016, em analisador elementar CHNS e com três repetições.

2.3 Produção e caracterização dos briquetes

A farinha de milho e a água foram incorporadas aos finos de carvão e homogeneizadas até a obtenção de uma massa uniforme. As formulações foram processadas em briquetadeira extrusora NESHERMAQ, modelo Carvopress 200. Após a conformação, os briquetes foram secos em estufa com circulação de ar, durante 48 horas, sob temperatura entre 60 e 90°C. Ao final da secagem, os briquetes apresentaram teores de umidade entre 3,9 e 7,2 % e foram armazenados em recipientes de plástico protegidos da umidade.



Figura 1 – (a) finos de carvão utilizados como matéria prima; (b) farinha de milho; (c) briquetadeira extrusora; (d) briquetes produzidos.

O PCS dos briquetes foi determinado em bomba calorimétrica, conforme a ABNT NBR 8633:1984, com três repetições validadas por tratamento. A análise física consistiu na determinação da densidade aparente, obtida pela relação entre a massa e o volume geométrico, com base na ABNT NBR 18847:2022. O PCS foi convertido de cal g^{-1} para MJ kg^{-1} pelo fator 0,004184, e a densidade energética foi calculada pelo produto entre PCS e densidade aparente, resultando em GJ m^{-3}.

A composição elementar dos briquetes foi determinada em analisador CHNS, com três repetições por tratamento, seguindo-se a ISO 16948:2015 para carbono, hidrogênio e nitrogênio e a ISO 16994:2016 para enxofre. Os resultados foram expressos em porcentagem de massa.

2.4 Ensaio de compressão diametral

A análise mecânica foi realizada por compressão diametral em máquina universal de ensaios, com três corpos de prova por tratamento. O carregamento transversal foi aplicado à velocidade de 1 mm min^{-1}, registrando-se a força máxima antes da ruptura, em procedimento adaptado dos princípios da ABNT NBR 7222:2011 às características geométricas dos briquetes. A partir das curvas carga-deformação, determinaram-se a carga máxima, a tensão máxima aparente, a deformação no pico, a rigidez entre 20 e 60 % da carga máxima e a energia absorvida até o pico.

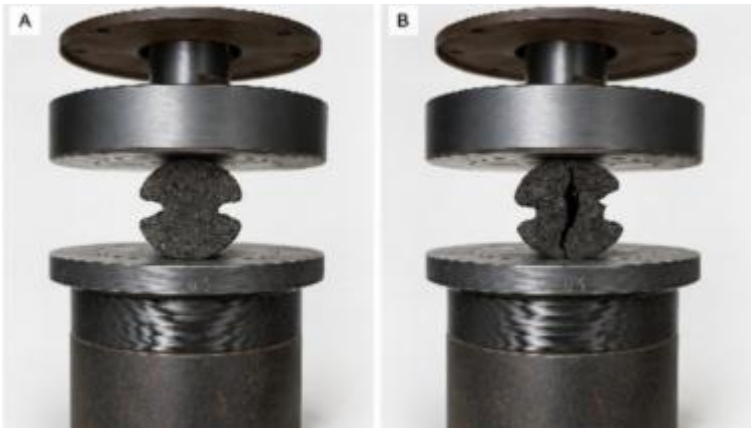


Figura 2 – (a) briquetes antes do ensaio; (b) briquetes depois do ensaio.

2.5 Análise estatística

Os dados de PCS e compressão diametral dos briquetes T1–T5 foram submetidos à ANOVA em delineamento inteiramente casualizado no SISVAR 5.6 (Ferreira, 2019). Como os tratamentos representaram níveis quantitativos de farinha de milho, ajustaram-se regressões polinomiais linear, quadrática e cúbica. O modelo foi selecionado pela significância da regressão e dos coeficientes, ausência de falta de ajuste, R^2 e coerência biológica. Variáveis sem modelo significativo foram apresentadas descritivamente. T0 foi excluído da análise por corresponder aos finos soltos, e não a briquetes com 0 % de farinha.

3. Resultados e discussão

3.1 Caracterização dos finos de carvão vegetal

Os finos de carvão (T0) apresentaram 5,9 % de umidade, 18,6 % de materiais voláteis, 12,3 % de cinzas e 69,1 % de carbono fixo. O PCS médio foi de 6.162 ± 27 cal g^{-1}, equivalente a 25,78 MJ kg^{-1}, e a densidade a granel foi de 0,4732 g cm^{-3}. A composição elementar média foi de 69,87 % de C, 2,69 % de H, 0,35 % de N e 0,031 % de S (Tabela 2). Esses resultados confirmam que a fração fina conserva potencial energético; Martins et al. (2016) também destacaram a viabilidade de recuperar finos de carvão por densificação.

Tabela 2 – Propriedades dos finos de carvão vegetal utilizados na produção dos briquetes

Umidade (%)

Voláteis (%)

Cinzas (%)

Carbono fixo

(%)

PCS
(cal g^{-1})

Densidade a granel (g cm^{-3})

C elementar (%)						
5,9	18,6	12,3	69,1	6.162 ± 27	0,4732	69,87 ± 0,25

A densidade energética a granel dos finos foi estimada em 12,20 GJ m^{-3}, evidenciando a limitação logística do material solto, cujo volume inclui os vazios entre partículas. Segundo Obi et al. (2022), a densificação melhora a uniformidade, o transporte e o armazenamento de biomassas particuladas ao elevar a massa e a energia por unidade de volume.

A maior retenção ocorreu nas peneiras de 20 e 40 mesh, com 40,17 e 32,57 %, respectivamente, totalizando 72,74 % da massa. A fração retida até 60 mesh alcançou 90,84 %. A combinação de classes granulométricas pode favorecer o preenchimento dos vazios durante a compactação, enquanto o excesso de partículas finas aumenta a área superficial a ser recoberta pelo aglutinante, conforme discutido por (Obi *et al*.,2022).

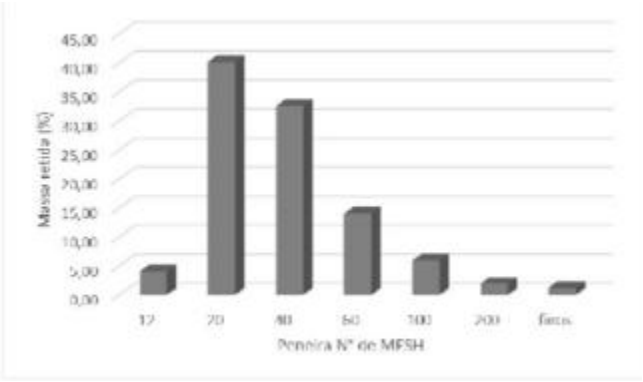


Figura 3 – Distribuição granulométrica dos finos de carvão vegetal.

3.2 Poder calorífico, densidade aparente e densidade energética

O PCS variou de 6.075 a 6.452 cal g^{-1} e apresentou resposta quadrática ao teor de farinha ($p<0,001$; $R^2=0,950$): $\hat{y} = 6.824,267 - 110,074x + 4,054x^2$. No intervalo de 4 a 12 %, houve redução do PCS, com maior média em T1 e menor em T5. A substituição progressiva da fração carbonizada pelo aglutinante pode explicar esse comportamento (Obi *et al.*, 2022; Lomunyak *et al.*, 2024).

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

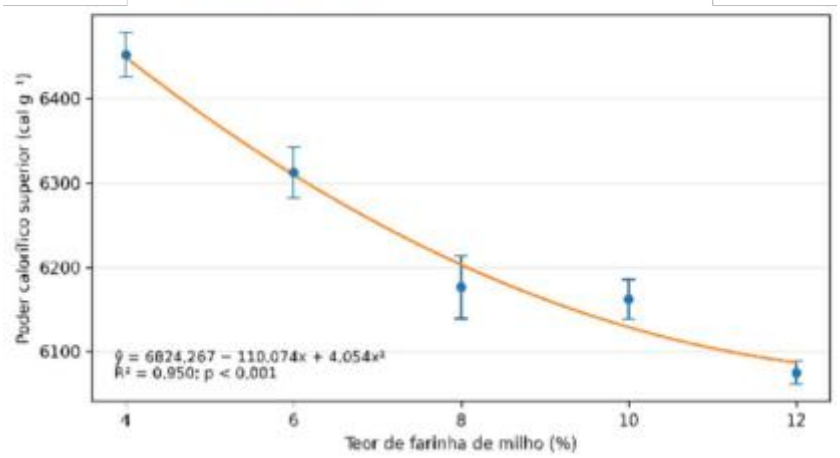


Figura 4 – Regressão do poder calorífico superior dos briquetes em função do teor de farinha de milho. Pontos representam médias ± desvio-padrão (n=3).

A densidade aparente variou de 0,85 a 1,06 g cm^{-3}, com maior valor em T3, seguido por T1 e T4. O menor valor ocorreu em T5. Como a densidade depende do empacotamento, da umidade e da consistência da mistura, o aumento do aglutinante não produz necessariamente resposta proporcional. Aransiola et al. (2019) observaram que a concentração do ligante e a compactação afetam conjuntamente a densidade e a resistência de briquetes carbonizados.

Tabela 3 – Poder calorífico, densidade aparente e densidade energética dos briquetes (média ± desvio-padrão para PCS; n=3).

Tratamento	Farinha (%)	PCS (cal g^{-1})	PCS (MJ kg^{-1})	Densidade (g cm^{-3})	Densidade energética (GJ m^{-3})
T1	4	6452 ± 26	27,00	0,99	26,73
T2	6	6312 ± 30	26,41	0,97	25,62
T3	8	6176 ± 37	25,84	1,06	27,39
T4	10	6162 ± 23	25,78	0,99	25,52
T5	12	6075 ± 13	25,42	0,85	21,61

3.3 Densidade energética e composição elementar

A densidade energética resultou da combinação entre PCS e densidade aparente. O maior valor foi obtido em T3, com 27,3 GJ m^{-3}, enquanto T5 apresentou 21,60G J m^{-3}. Todos os briquetes superaram a densidade energética estimada dos finos soltos. Souza e Vale (2016) destacam que essa variável integra a energia por massa e a compactação do combustível, sendo relevante para transporte e armazenamento.

A composição elementar dos briquetes variou de 66,54 a 75,78 % de C, de 2,98 a 3,21 % de H, de 0,25 a 0,36 % de N e de 0,003 a 0,115 % de S (Tabela 4). T1 e T2 apresentaram os maiores teores de carbono, enquanto T3 a T5 apresentaram maiores valores de hidrogênio. Lomunyak et al. (2024) também verificaram que ligantes amiláceos podem alterar a composição e as propriedades de combustão de briquetes de finos de carvão.

Tabela 4 – Composição elementar dos finos e dos briquetes (média ± desvio-padrão; n=3).

Material	Farinha (%)	C (%)	H (%)	N (%)	S (%)
T0 (finos)	0	69,87 ± 0,25	2,692 ± 0,051	0,350 ± 0,000	0,031 ± 0,012
T1	4	75,78 ± 1,31	2,978 ± 0,055	0,360 ± 0,010	0,003 ± 0,003
T2	6	74,30 ± 0,93	2,986 ± 0,024	0,363 ± 0,015	0,006 ± 0,010
T3	8	68,02 ± 0,26	3,199 ± 0,017	0,250 ± 0,000	0,115 ± 0,069
T4	10	67,29 ± 0,18	3,135 ± 0,027	0,263 ± 0,006	0,036 ± 0,007
T5	12	66,54 ± 1,02	3,207 ± 0,082	0,253 ± 0,006	0,019 ± 0,002

3.4 Desempenho em compressão diametral

A carga e a tensão máximas apresentaram resposta cúbica ao teor de farinha ($p<0,001$; $R^2=0,820$), com máximos estimados em 10,88 %. As maiores médias observadas ocorreram em T4 (6,159 kN e 3,137 MPa), seguidas por T5. A resposta indica maior coesão até uma faixa próxima de 10 %, sem ganho adicional no maior teor avaliado, comportamento também relacionado à proporção de ligantes amiláceos por Aransiola et al. (2019) e Lomunyak et al. (2024).

Tabela 5 – Valores médios das propriedades obtidas no ensaio de compressão diametral dos briquetes e modelos de regressão selecionados (n=3).

Trat.	Farinha (%)	Carga máxima (kN)	Tensão máxima (MPa)	Rigidez (kN mm^{-1})	Energia até o pico (J)
T1	4	2,285	1,163	1,311	2,639
T2	6	2,053	1,045	1,720	2,244
T3	8	3,204	1,632	2,400	2,266
T4	10	6,159	3,137	1,981	5,412
T5	12	5,413	2,757	1,756	4,778

Para carga e tensão, os modelos foram, respectivamente, $\hat{y} = 21,806 - 9,151x + 1,285x^2 - 0,0530x^3$ e $\hat{y} = 11,106 - 4,661x + 0,654x^2 - 0,0270x^3$. A rigidez apresentou resposta quadrática ($p=0,028$; $R^2=0,451$), com máximo estimado em 8,68 %, e a energia aumentou linearmente ($p=0,016$; $R^2=0,371$). Não houve regressão significativa para a deformação no pico. Essas propriedades devem ser avaliadas conjuntamente (Obi *et al.*, 2022).

4. Conclusões

Os finos apresentaram elevado potencial energético, com 69,1 % de carbono fixo, PCS de 6.162 cal g^{-1} e densidade a granel de 0,4732 g cm^{-3}. A distribuição granulométrica concentrou 72,74 % da massa entre 20 e 40 mesh.

Nos briquetes, o PCS apresentou redução com o aumento do teor de farinha de milho. A formulação com 8 % apresentou a maior densidade energética e a maior rigidez média, enquanto o teor de 10 % proporcionou os maiores valores observados de carga e tensão máximas. A análise de regressão indicou uma faixa estimada de maior resistência mecânica próxima de 10 % de farinha. A energia absorvida até o pico aumentou linearmente com o teor de aglutinante.

Assim, teores próximos de 8 % favoreceram o desempenho energético e a rigidez, enquanto a faixa de 10 a 12 % favoreceu a resistência mecânica. O T0 foi utilizado apenas como referência dos finos soltos. A seleção da formulação deve considerar a finalidade do briquete e ser complementada por ensaios de durabilidade e resistência ao impacto.

5. Agradecimentos

À Universidade Federal de Lavras, ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia da Madeira, à FAPEMIG e à CAPES, pelo apoio laboratorial, institucional e financeiro.

6. Referências bibliográficas

Souza, F., & Vale, A. T. (2016). Densidade energética de briquetes de biomassa lignocelulósica e sua relação com os parâmetros de briquetagem. Pesquisa Florestal Brasileira, 36(88), 405-413. https://doi.org/10.4336/2016.pfb.36.88.879

Aransiola, E. F., Oyewusi, T. F., Osunbitan, J. A., & Ogunjimi, L. A. O. (2019). Effect of binder type, binder concentration and compacting pressure on some physical properties of carbonized corncob briquette. *Energy Reports*, *5*, 909–918. https://doi.org/10.1016/j.egyr.2019.07.011

Associação Brasileira de Normas Técnicas. (1981). *ABNT NBR 6922: Carvão vegetal -Ensaios físicos -Determinação da densidade a granel.*

Associação Brasileira de Normas Técnicas. (1982). *ABNT NBR 7402: Carvão vegetal -Determinação granulométrica.*

Associação Brasileira de Normas Técnicas. (1984). *ABNT NBR 8633: Carvão vegetal -Determinação do poder calorífico.*

Associação Brasileira de Normas Técnicas. (1986). *ABNT NBR 8112: Carvão vegetal -Análise imediata.*

Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2011). *ABNT NBR 7222: Concreto e argamassa — Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos.*

Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2022). *ABNT NBR 18847: Biocombustíveis sólidos — Determinação da densidade de partículas de pellets e briquetes.*

Chipangura, W., Masauli, B., Mungwari, C. P., Nyamunda, B. C., Madziwa, T. N., Nyathi, L., Tom, H. T., & Chigondo, M. (2024). Fabrication of briquettes from charcoal fines using tannin formaldehyde resin as a binder. *European Journal of Sustainable Development Research*, *8*(1), Article em0249. https://doi.org/10.29333/ejosdr/14125

Ferreira, D. F. (2019). Sisvar: A computer analysis system to fixed effects split plot type designs. *Brazilian Journal of Biometrics*, *37*(4), 529–535. https://doi.org/10.28951/rbb.v37i4.450

Geberehiet, G. A., Gebreegziabher, T. G., Mekonen, A. G., Hagos, G. K., & Gebresilasie, T. N. (2025). Development of briquettes suitable for energy generation from residue of sorghum stalk and groundnut husk. *Materials for Renewable and Sustainable Energy*, *14*(2), Article 35. https://doi.org/10.1007/s40243-025-00309-7

International Organization for Standardization. (2015). *ISO 16948: Solid biofuels -Determination of total content of carbon, hydrogen and nitrogen.*

International Organization for Standardization. (2016). *ISO 16994: Solid biofuels -Determination of total content of sulfur and chlorine.*

Lomunyak, G., Osodo, B., Njoka, F., & Kombe, E. (2024). Characterization, optimization and emission analysis of manually-made charcoal dust briquettes with starch, paper and algae binders. *Heliyon*, *10*(24), Article e40991. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e40991

Obi, O. F., Pecenka, R., & Clifford, M. J. (2022). A review of biomass briquette binders and quality parameters. *Energies*, *15*(7), Article 2426. https://doi.org/10.3390/en15072426

Owino, C. A., Lubwama, M., Yiga, V. A., Were, F., Bongomin, O., & Serugunda, J. (2024). Mechanical and thermal properties of composite carbonized briquettes developed from cassava (*Manihot esculenta*) rhizomes and groundnut (*Arachis hypogea*. L.) stalks with jackfruit (*Artocarpus heterophyllus*) waste as binder. *Discover Applied Sciences*, *6*(8), Article 428. https://doi.org/10.1007/s42452-024-06123-6

Sanka, P. M., Germain, O., Khalifa, L., Komakech, H., & Magambo, H. (2024). Production of low emission briquettes from carbonized faecal sludge as an alternative source of cooking energy. *Energy, Sustainability and Society*, *14*, Article 14. https://doi.org/10.1186/s13705-024-00449-0

Souza, F., & Vale, A. T. (2016). Densidade energética de briquetes de biomassa lignocelulósica e sua relação com os parâmetros de briquetagem. *Pesquisa Florestal Brasileira*, *36*(88), 405–413. https://doi.org/10.4336/2016.pfb.36.88.879

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Modelos espectrais para classificação de carvões industriais de resíduos Amazônicos

Michael Douglas Roque Lima[1]; Luany Ketlyn Nascimento Sousa[1]; Joabel Raabe[1]; Thiago de Paula Protásio[2]; Paulo Fernando Trugilho[2]; Paulo Ricardo Gherardi Hein[2];

[1] Universidade Estadual da Região Tocantina do Maranhão
[2] Universidade Federal de Lavras

Resumo: O aproveitamento energético de resíduos florestais por meio da produção de carvão vegetal é promissor, porém a variabilidade entre espécies e condições de carbonização afeta a densidade relativa aparente (DRA). O estudo avaliou modelos espectrais para a classificação de carvões vegetais de resíduos amazônicos em diferentes classes de DRA. Resíduos de *Dinizia excelsa*, *Licania* sp., *Caryocar* sp., *Brosimum gaudichaudii*, *Parkia* sp. e *Tapirira guianensis* foram carbonizados em fornos industriais. Os carvões foram classificados quanto à densidade relativa aparente e analisados por espectroscopia NIR e técnicas quimiométricas. As assinaturas espectrais apresentaram relação com a DRA dos carvões, embora a PCA não tenha promovido separação clara entre as amostras. Os modelos PLS-DA discriminaram as classes de DRA, com melhor desempenho após a primeira derivada (81,90%), especialmente para carvões de maior densidade. Os resultados demonstram o potencial da espectroscopia NIR associada à quimiometria como ferramenta rápida e não destrutiva para auxiliar na classificação tecnológica de carvões vegetais produzidos a partir de resíduos amazônicos.
Palavras-chave: NIRS; quimiometria; carvão vegetal

Spectral models for classifying industrial charcoal derived from Amazonian residues

Abstract: The energy utilization of forest residues through charcoal production is promising; however, the variability among species and carbonization conditions affects the apparent relative density (ARD). This study evaluated spectral models for the classification of charcoal produced from Amazonian residues into different ARD classes. Residues of *Dinizia excelsa*, *Licania* sp., *Caryocar* sp., *Brosimum gaudichaudii*, *Parkia* sp., and *Tapirira guianensis* were carbonized in industrial kilns. The charcoal samples were classified according to apparent relative density and analyzed by NIR spectroscopy and chemometric techniques. Spectral signatures showed a relationship with the apparent relative density (ARD) of the charcoals, although PCA did not yield a clear separation between samples. PLS-DA models discriminated between ARD classes, showing better performance after first-derivative processing (81.90%), particularly for higher-density charcoals. The results demonstrate the potential of NIR spectroscopy combined with chemometrics as a rapid, non-destructive tool to assist in the technological classification of charcoal produced from Amazonian residues.
Keywords: NIRS; chemometrics; charcoal

1. Introdução

A demanda por fontes energéticas alternativas tem impulsionado o aproveitamento de resíduos florestais para produção de carvão vegetal. Na Amazônia, os resíduos representam uma alternativa para reduzir desperdícios e agregar valor ao setor (Ferreira et al., 2023). Entretanto, a variabilidade das espécies e da carbonização resulta em carvões com diferentes características,

especialmente quanto à densidade relativa aparente (DRA), parâmetro associado à qualidade do produto (Ramos et al., 2023).

A DRA é uma propriedade importante na caracterização tecnológica do carvão vegetal, estando relacionada à porosidade, resistência mecânica e densidade energética, além de contribuir para a padronização do produto em aplicações industriais (Protásio et al., 2011; Barotto et al., 2024).

A espectroscopia no infravermelho próximo (NIR) destaca-se pela rapidez, caráter não destrutivo e aplicação associada à quimiometria para construção de modelos preditivos (Sobral et al., 2022). Estudos mostram seu potencial na estimativa de propriedades do carvão vegetal e na classificação de materiais carbonizados para controle de qualidade industrial (Abreu Neto et al., 2021; Lima et al., 2025a).

Assim, este trabalho teve como objetivo avaliar a capacidade preditiva de modelos espectrais na classificação de carvões vegetais produzidos a partir de resíduos amazônicos em diferentes classes de densidade relativa aparente.

2. Material e métodos

2.1 Resíduos de madeira precursores

O estudo foi realizado com resíduos de seis espécies florestais provenientes da exploração de florestas nativas em Unidades de Produção Anual (UPA), selecionados na Fazenda do Rio Capim, unidade de manejo florestal do Grupo Keilla, em Paragominas, Pará, Brasil (3°30'–3°45'S; 48°30'–48°50'W; altitude 87 m).

2.2 Seleção das espécies e preparo das amostras

As espécies foram selecionadas conforme classes de densidade básica da madeira (DBM) propostas por Csanády (2015), variando de muito baixa (DBM < 0,400 g cm^{-3}) a muito alta (DBM ≥ 0,950 g cm^{-3}). As espécies avaliadas são descritas na Tabela 1.

Tabela 1 – Lista de espécies selecionadas para o estudo

Nome científico	Família	Nome popular	DBM (g cm^{-3})	Classe de DBM
Dinizia excelsa Ducke	Fabaceae	Angelim-vermelho	0,927	Alta
Licania sp.	Chrysobalanaceae	Casca-seca	0,881	Alta
Caryocar sp.	Caryocaraceae	Pequiarana	0,701	Média
Brosimum gaudichaudii Trécul	Moraceae	Inharé	0,599	Média
Parkia sp.	Fabaceae	Fava-branca	0,501	Baixa
Tapirira guianensis Aubl.	Anacardiaceae	Tapiririca	0,397	Muito baixa

Foram selecionadas seis peças de madeira, uma por espécie, cada uma seccionada em seis toretes de 60 cm. Os toretes foram segmentados em discos de 30 cm, destinados à carbonização industrial, e de 20 cm, dos quais foram obtidas amostras (4 × 4 × 3 cm) para identificação botânica. O preparo do material é apresentado na Figura 1.

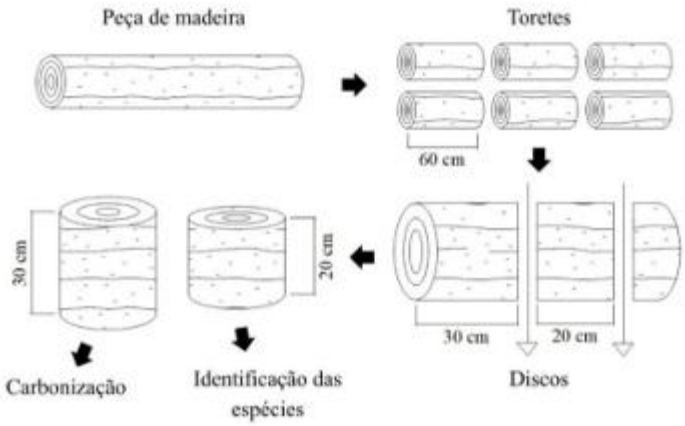


Figura 1 – Representação esquemática da preparação do material experimental.

2.3 Produção e amostragem do carvão vegetal

A carbonização foi realizada em seis fornos de alvenaria de 10 m³, com discos de madeira acondicionados em telas de arame identificadas e posicionadas na região central dos fornos para recuperação das amostras. O ciclo teve duração de 12 dias, sendo coletadas dez amostras da superfície rolante do carvão obtido de cada torete. O processo é ilustrado na Figura 2.

Foram previstas 360 amostras (6 espécies × 6 toretes × 10 amostras), porém, devido à carbonização incompleta de uma tora de *Caryocar* sp., *Parkia* sp. e *Brosimum gaudichaudii*, foram analisadas 330 amostras.



Figura 2 – Etapas do processo de carbonização em fornos de alvenaria.

2.4 Determinação da densidade relativa aparente

A densidade relativa aparente (DRA) foi determinada utilizando o método de Silva e Ataíde (2019). O volume das amostras foi determinado pelo método de imersão por 30 minutos, seguido de secagem em estufa a 105 ± 2 °C por duas horas.

As amostras foram classificadas em três faixas de DRA (Lima et al., 2022): Classe 1 (0,250–0,400 g cm^{-3}), Classe 2 (0,400–0,550 g cm^{-3}) e Classe 3 (≥ 0,550 g cm^{-3}).

2.5 Coleta dos espectros NIR e pré-processamento dos dados espectrais

Foram coletados espectros NIR de 330 amostras de carvão utilizando um espectrômetro Bruker MPA (Bruker Optik GmbH, Ettlingen, Alemanha). As análises foram realizadas a aproximadamente 20 ºC e 65% de umidade relativa. Os espectros foram obtidos na faixa de 3.500 a 12.500 cm^{-1}. Para a calibração e validação dos modelos foi utilizada a região espectral entre 4.000 e 9.000 cm^{-1}.

O pré-processamento dos espectros foi realizado no software OPUS versão 7.5 (Bruker Optik GmbH, Alemanha). Foram aplicadas as derivadas de primeira (1d) e segunda ordem (2d) pelo algoritmo de Savitzky-Golay (Savitzky; Golay, 1964).

2.6 Análise Multivariada (PCA e PLS-DA)

A análise de componentes principais (PCA) e a Análise Discriminante por Mínimos Quadrados Parciais (PLS-DA) foram realizadas no software Chemoface versão 1.74 (Nunes et al., 2012). A PCA teve o objetivo de avaliar a similaridade espectral entre as amostras de carvão vegetal, enquanto a PLS-DA desenvolveu os modelos de classificação.

O número de variáveis latentes foi definido por validação cruzada *leave-one-out*, considerando RMSECV e R^2cv. O desempenho dos modelos foi avaliado por R^2cv, R^2p, RMSECV, RMSEP, taxa de acerto e matriz de confusão.

3. Resultados e discussão

3.1 Densidade relativa aparente dos carvões de madeiras residuais

As médias de DRA das seis espécies estão representadas na Figura 3. A classe 3 reuniu os carvões com maior DRA (*D. excelsa* e *Licania* sp.), enquanto a classe 1 agrupou *Parkia* sp. e *T. guianensis*. As espécies *Caryocar* sp. e *B. gaudichaudii* foram classificadas na classe 2.

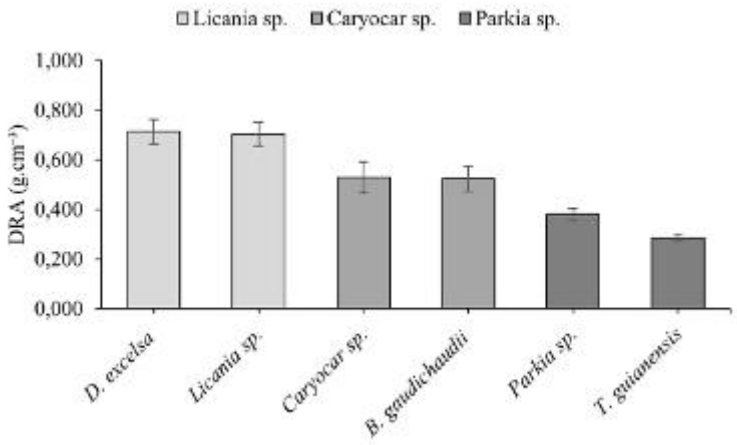


Figura 3 – Densidade relativa aparente (DRA) dos carvões produzidos em fornos de alvenaria.

A DRA é um importante indicador da qualidade do carvão vegetal por estar diretamente relacionada à resistência mecânica. Assim, os carvões da classe 3 tendem a apresentar maior resistência e menor geração de finos durante o manuseio e a operação em altos-fornos (Moraes et al., 2019; Ramos et al., 2023). Já os carvões classificados na classe 1, com menor DRA, tendem a apresentar menor resistência mecânica, tornando-os mais suscetíveis à fragmentação e, consequentemente, à maior geração de finos (Abreu Neto et al., 2021; Abreu Neto et al., 2020; Couto et al., 2023)

3.2 Assinaturas espectrais

As assinaturas espectrais das espécies e das classes de DRA são apresentadas na Figura 4. As maiores absorbâncias foram observadas em *D. excelsa* e na classe 3, enquanto *T. guianensis*, *Parkia* sp. e a classe 1 apresentaram as menores absorbâncias.

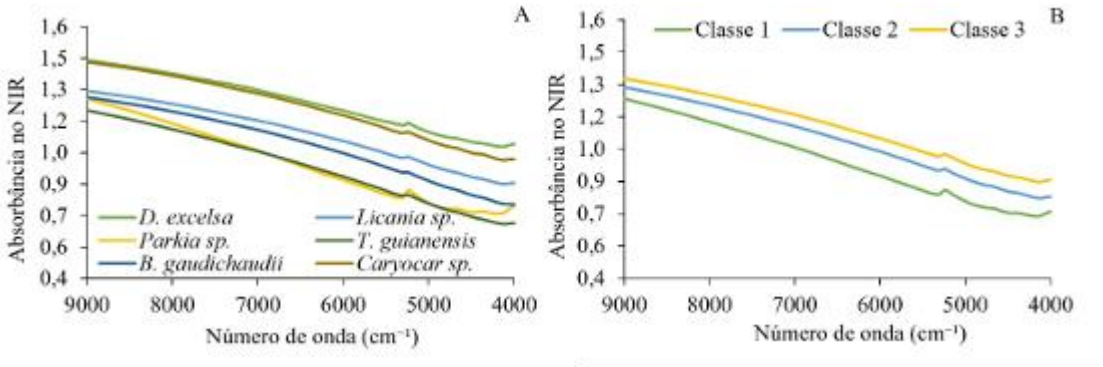


Figura 4 – Assinaturas espectrais dos carvões vegetais por espécie (A) e classe de densidade relativa aparente (B).

As diferenças observadas indicam que os espectros NIR preservam informações relacionadas à estrutura física e às transformações químicas decorrentes da carbonização. Carvões com maior DRA tendem a apresentar maior absorbância aparente, possivelmente em função da menor porosidade e do menor espalhamento difuso da radiação (Abreu Neto et al., 2021; Abreu Neto et al., 2020). Em contrapartida, carvões menos densos apresentam maior porosidade e heterogeneidade estrutural, intensificando o espalhamento da luz e reduzindo a absorbância (Abreu Neto et al., 2021).

3.3 Análise de componentes principais (PCA)

Os gráficos de scores da PCA por espécie (Figura 5) e por classes de DRA (Figura 6) não evidenciaram agrupamentos distintos, independentemente da aplicação de pré-tratamentos.

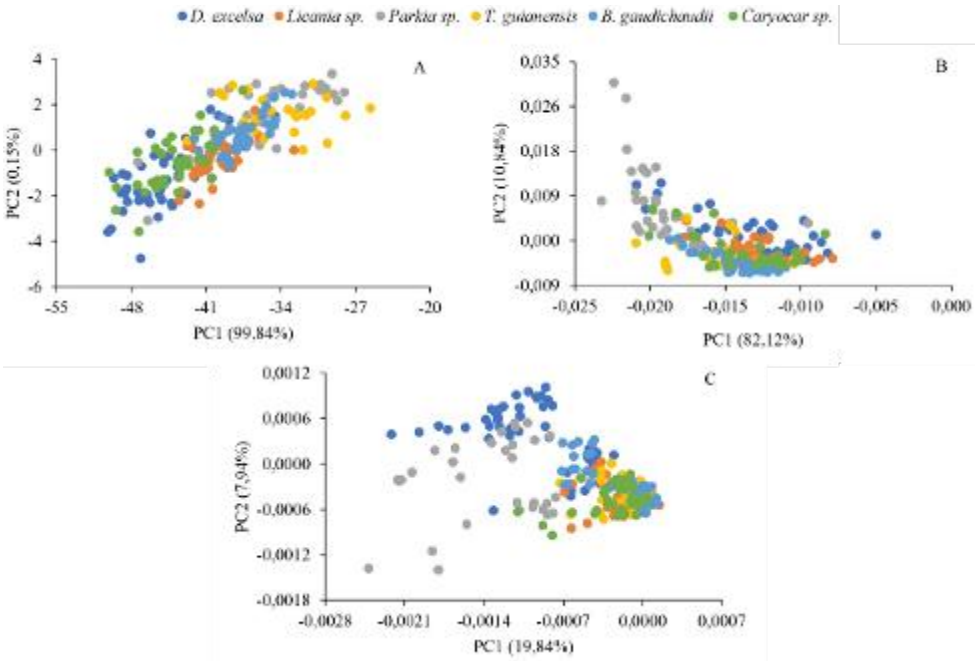


Figura 5 – Scores de análise de componentes principais de dados espectrais dos carvões vegetais por espécie.

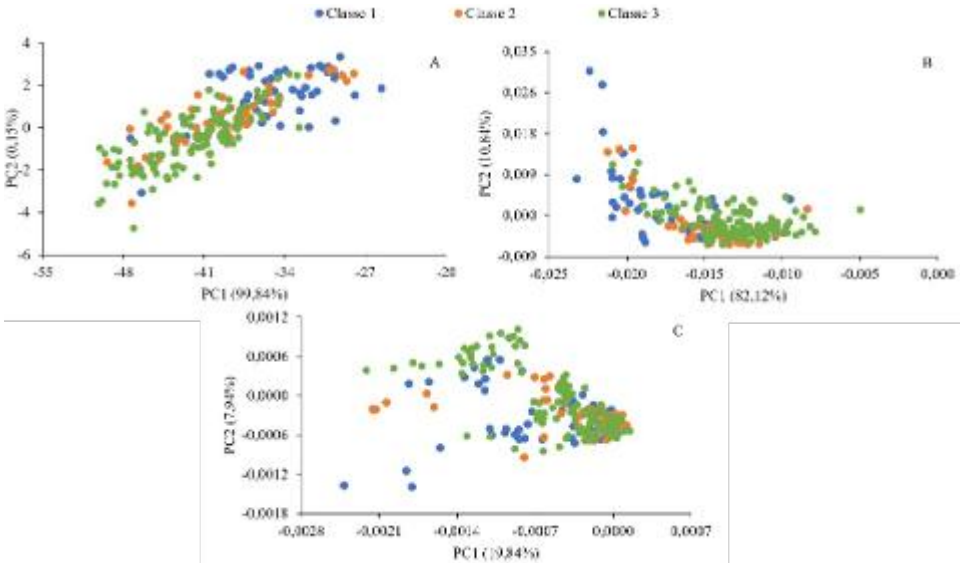


Figura 6 – Scores de análise de componentes principais de dados espectrais por classe de DRA do carvão.

A ausência de separação entre espécies e classes indica que as diferenças espectrais não foram suficientes para discriminar os grupos por meio da PCA. Esse comportamento pode ser explicado pela homogeneização química promovida pela carbonização, que reduz a variabilidade espectral entre as amostras (Martins et al., 2025; Martins et al., 2026; Lima et al., 2025b).

3.4 Análise discriminante de mínimos quadrados parciais (PLS-DA)

Os modelos PLS-DA apresentaram desempenhos distintos conforme o pré-processamento aplicado (Tabela 2). O modelo baseado na primeira derivada apresentou a maior acurácia média (81,90%), superando os modelos com espectros brutos (70,38%) e segunda derivada (46,46%).

Tabela 2 – Resumo de classificações de carvão corretas por meio de análise PLS-DA, considerando os pré-tratamentos matemáticos usados

Classe	ST		1d		2d	
	N°	%	N°	%	N°	%
1	37	75,51	35	71,43	14	28,57
2	24	44,44	44	81,48	8	14,81
3	114	91,20	116	92,80	120	96,00
Média	-	70,38	-	**81,90**	-	46,46

ST: sem tratamento; 1d: primeira derivada; 2d: segunda derivada.

O melhor desempenho da primeira derivada está associado à correção da linha de base e redução de ruídos, favorecendo a identificação de características espectrais relevantes. Já os menores desempenhos dos modelos sem pré-tratamento e com segunda derivada podem estar relacionados aos efeitos de dispersão e intensificação de ruídos nos espectros (Chen, 2023; Abreu Neto et al., 2021; Martins et al., 2025; Martins et al., 2026).

A matriz de confusão do modelo com primeira derivada (Tabela 3) mostrou acurácia global de 81,90%, com maiores taxas de acerto para a classe 3 (92,80%), seguida das classes 2 (81,48%) e 1 (71,43%).

Tabela 3 – Classificação de amostras de carvão considerando dados espectrais tratados com 1d por meio da técnica PLS-DA usando validação cruzada

Classe	**Classificação dos carvões predita pelo NIR**			**Classificação correta**		**Total de amostras**
	1	**2**	**3**	**n°**	**(%)**	
1	35	5	9	35	71,43	49
2	2	44	8	44	81,48	54
3	4	5	116	116	92,80	125
Classificação geral				195	81,90	228

A maior precisão para a classe de maior densidade pode estar relacionada à maior uniformidade estrutural dos carvões, enquanto os maiores erros observados nas classes de menor densidade refletem a maior porosidade, heterogeneidade física e sobreposição espectral entre as amostras (Martins et al., 2026; Abreu Neto et al., 2021; Chen, 2023).

4. Conclusões

A espectroscopia NIR associada à PLS-DA apresentou potencial para classificar carvões vegetais industriais em classes de densidade relativa aparente (DRA).

A PCA não separou claramente as espécies ou classes. Já a PLS-DA apresentou melhor desempenho com a primeira derivada (81,90% de acurácia média), com os maiores acertos ocorreram para carvões de maior DRA.

5. Agradecimentos

Os autores agradecem à Universidade Estadual da Região Tocantina do Maranhão (UEMASUL) e ao Laboratório Multiusuário de Biomateriais e Energia da Biomassa (LAMBEB) da Universidade Federal de Lavras (UFLA) pela infraestrutura disponibilizada

para a realização desta pesquisa. Os pesquisadores Joabel Raabe e Michael Douglas Roque Lima expressam sua gratidão pela bolsa de produtividade da UEMASUL (Edital nº 16/2025 – PROPGI/UEMASUL).

6. Referências bibliográficas

Abreu Neto, R., Assis, A. A., Ballarin, A. W., & Hein, P. R. G. (2020). Effect of final temperature on charcoal stiffness and its correlation with wood density and hardness. SN Applied Sciences, 2(1020), 9. https://doi.org/10.1007/s42452-020-2822-0

Abreu Neto, R., Ramalho, F. M. G., Costa, L. R., & Hein, P. R. G. (2021). Estimating hardness and density of wood and charcoal by near-infrared spectroscopy. Wood Science and Technology, 55(1), 215-230. https://doi.org/10.1007/s00226-020-01232-y

Barotto, A. J., Gauna, J. M., Tonello, M. L., Harrand, L., Mastrandrea, A. C., Martínez, M., Oberschelp, G. P. J., & Raffaeli, N. (2023). Caracterización dendroenergética de la madera y el carbón de diferentes materiales genéticos del género *Eucalyptus*. Revista de la Facultad de Agronomía, 122(1), 1-17. https://doi.org/10.24215/16699513e129

Chen, X. (2023). Classification and analysis of Chinese and German flour samples: handheld near-infrared spectroscopy in combination with chemometric data evaluation (Tese de Doutorado). Universität Duisburg-Essen.

Couto, A. M., Monteiro, T. C., Trugilho, P. F., Lima, J. T., Silva, J. R. M., Napoli, A., & Almeida, D. P. (2023). Influence of physical-anatomical wood variables on charcoal physical–mechanical properties. Journal of Forestry Research, 34(2), 531-538. https://doi.org/10.1007/s11676-022-01462-9

Csanády, E.; Magoss, E.; Tolvaj, L. (2015). Quality of machined wood surfaces. New York City: Springer International Publishing.

Ferreira, G., Brito, F. M. S., Correia, N. P. C. M., & Paes, J. B. (2023). Resíduos de biomassa florestal para produção de combustíveis sólidos compactados: uma revisão contextual. Em J. K. B. de Andrade (Ed.), Estudos e tendências atuais em Ciências Ambientais e Agrárias (pp. 142-152). Editora Licuri.

Lima, M. D. R., Massuque, J., Bufalino, L., Trugilho, P. F., Ramalho, F. M. G., Protásio, T. P., & Hein, P. R. G. (2022). Clarifying the carbonization temperature effects on the production and apparent density of charcoal derived from Amazonia wood wastes. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 166, 105636. https://doi.org/10.1016/j.jaap.2022.105636

Lima, M. D. R., Melo, A. R. D., Raabe, J., Trugilho, P. F., Protásio, T. P., & Hein, P. R. G. (2025a). Multivariate models based on spectral data for the classification of charcoals produced at different final carbonization temperatures. CERNE, 31, e-103530. https://doi.org/10.1590/01047760202531013530

Lima, M. D. R., Soares, A. B. M., Raabe, J., Trugilho, P. F., Protásio, T. P., & Hein, P. R. G. (2025b). Near-infrared spectroscopy for predicting the carbonization temperature of charcoal derived from Amazonian wood wastes. Ciência e Agrotecnologia, 49, e007725. https://doi.org/10.1590/1413-7054202549007725

Martins, C. C. N., de Castro, V. R., Hein, P. R. G., Carneiro, A. D. C. O., Mascarenhas, A. R. P., Bufalino, L., Medeiros, D. T., Scatolino, M. V., Lima, M. D. R., Cunha, J. S., Andressa, I., Cardoso, R. S. G., & Demuner, I. F. (2025). Prediction of the energy properties of charcoal obtained from *Eucalyptus* and *Corymbia* Biomass using portable and benchtop NIR spectrometers. BioEnergy Research, 18(1), 1-13. https://doi.org/10.1007/s12155-025-10882-4

Martins, C. C. N., Castro, V. R., Hein, P. R. G., Carneiro, A. D. C. O., Mascarenhas, A. R. P., Bufalino, L., Peres, L. C., Medeiros, D. T., Batista, F. G., Goulart, C. P., Cardoso, R. S. G., & Oliveira, W. M. (2026). Prediction of wood and charcoal apparent density using benchtop and portable near-infrared instruments based on X-ray densitometry data. Biomass and Bioenergy, 212, 109351. https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2026.109351

Moraes, M. D., Silva, M. D., Barbosa, P. V. G., Marques, R., Silva, R. T., & Sette Junior, C. R. (2019). Characterization of *Khaya ivorensis* (A. Chev) biomass, charcoal and briquettes Caracterização da biomassa, carvão vegetal e briquetes de *Khaya ivorensis* (A. Chev). Scientia Forestalis, 47(121), 34-44. https://dx.doi.org/10.18671/scifor.v47n121.04

Nunes, C. A., Freitas, M. P., & Pinheiro, A. C. M. (2012). Chemoface: a novel free user-friendly interface for chemometrics. Journal of the Brazilian Chemical Society, 23(11), 2003-2010. https://doi.org/10.1590/S0103-50532012005000073

Protásio, T. P., Santana, J. D. D. P., Neto, R. M. G., Júnior, J. B. G., Trugilho, P. F., & Ribeiro, I. B. (2011). Avaliação da qualidade do carvão vegetal de *Qualea parviflora*. Pesquisa Florestal Brasileira, 31(68), 295-295.

Ramos, D. C., Carneiro, A. D. C. O., Siqueira, H. F. D., Oliveira, A. C., & Pereira, B. L. C. (2023). Qualidade da madeira e do carvão vegetal de quatro clones de Eucalyptus com idades entre 108 e 120 meses. Ciência Florestal, 33, e48302. https://doi.org/10.5902/1980509848302

Savitzky, A., & Golay, M. J. E. (1964). Smoothing and differentiation of data by simplified least squares procedures. Analytical Chemistry, 36(8), 1627–1639. https://doi.org/10.1021/ac60214a047

Silva, F. T. M., & Ataíde, C. H. (2019). Valorization of *Eucalyptus urograndis* wood via carbonization: product yields and characterization. Energy, 172, 509–516. https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.01.159

Sobral, C. A. M., Gouvêa, A. D. F. G., & Carvalho, A. M. M. L. (2022). Caracterização anatômica e espectroscópica para identificação de madeiras da família Fabaceae. Brazilian Journal of Biological Sciences, 9(21), 29-48. https://doi.org/10.21472/bjbs.v09n21-003

164. Otimização dos parâmetros de compactação na produção de briquetes de serragem de breu-vermelho (*Protium* spp.)

SANABRIA, M. D. M.[1]; SILVA, M.[1]; SANTOS, J. A.[1]; SANABRIA, L. R. M.[1]; FARIA, D. L.[1]; PROTÁSIO, T. de P.[1]

[1] Universidade Federal de Lavras

Resumo: O estudo avaliou a influência da umidade (10, 12 e 14%) e do tempo de resfriamento (10 e 15 min) na qualidade de briquetes de serragem de breu-vermelho (*Protium* spp.). Foram determinadas a densidade aparente, resistência à queda, resistência à compressão diametral e o poder calorífico superior do material. A densidade a granel da biomassa foi de 0,251 g/cm³, enquanto a densidade aparente dos briquetes variou entre 1,030 e 1,143 g/cm³. A umidade influenciou significativamente a densidade, mas o tempo de resfriamento não apresentou efeito relevante. O melhor tratamento (10% de umidade e 10 min de resfriamento) atingiu carga máxima média de 10,42 kN, sem rupturas prévias. O poder calorífico superior foi de 4.724,7 cal/g (19,77 MJ/kg). Os resultados demonstram que a espécie apresenta potencial energético promissor, com desempenho mecânico satisfatório. Conclui-se que o breu-vermelho é uma alternativa viável para produção de briquetes como fonte de energia limpa e renovável.

Palavras-chave: Bioenergia; Densificação; Durabilidade.

165. Optimization of compaction parameters in the production of Breu-vermelho (*Protium* spp.) sawdust briquettes

Abstract: This study evaluated the influence of moisture content (10, 12 and 14%) and cooling time (10 and 15 min) on the quality of briquettes produced from sawdust of breu-vermelho (*Protium* spp.). Apparent density, drop resistance, diametral compression resistance, and higher heating value of the material were determined. The bulk density of the biomass was 0.251 g/cm³, while the apparent density of the briquettes ranged from 1.030 to 1.143 g/cm³. Moisture content significantly influenced density, whereas cooling time showed no relevant effect. The best treatment (10% moisture and 10 min cooling) achieved a mean maximum load of 10.42 kN, with no prior ruptures. The higher heating value was 4,724.7 cal/g (19.77 MJ/kg). The results demonstrate that the species presents promising energy potential with satisfactory mechanical performance. It is concluded that breu-vermelho is a viable alternative for briquette production as a source of clean and renewable energy.

Keywords: Bioenergy; Densification; Durability.

1. Introdução

A crescente demanda por fontes de energia renováveis e a necessidade de mitigar os impactos ambientais associados ao uso de combustíveis fósseis têm impulsionado a busca por alternativas sustentáveis (Jeffry *et al.*, 2021; Olabi e Abdelkareem, 2022), especialmente no contexto amazônico, onde a abundância de biomassa residual representa um potencial energético ainda pouco explorado. Nesse cenário, Ibitoye et al. (2021) sugerem a tecnologia de compactação, como a briquetagem, como uma tecnologia promissora para o aproveitamento energético de resíduos, transformando o passivo ambiental em biocombustível sólido de valor agregado.

A briquetagem permite concentrar energia em menor volume, reduzindo limitações de armazenamento, manuseio e transporte da biomassa in natura, aspecto especialmente relevante em regiões isoladas da Amazônia, onde os custos logísticos são elevados (Cumplido *et al*., 2026). Além disso, o aproveitamento de resíduos amazônicos favorece a economia circular, reduz impactos ambientais e agrega valor à matéria-prima. A qualidade dos briquetes depende das características da biomassa, como espécie, granulometria e umidade, e de parâmetros operacionais, como temperatura, pressão, tempo de compactação e resfriamento (Campos *et al*., 2024; Marreiro *et al*., 2021). Embora a matéria-prima exerça influência predominante sobre o produto (Furtado *et al*., 2010), a definição da combinação adequada desses fatores exige avaliação específica para cada espécie.

Assim, este trabalho propõe determinar as condições ótimas de umidade e tempo de resfriamento para a produção de briquetes de serragem de Breu-vermelho (*Protium* spp.), espécie amazônica com densidade média de 0,55 g cm^{-3} (Cruz, 2019), visando obter melhores propriedades físicas e mecânicas.

2. Material e métodos

Caracterização da biomassa

A espécie selecionada para o presente estudo foi o breu-vermelho (*Protium* spp., pertencente à família Burseraceae, em razão de sua ampla distribuição e abundância na região amazônica, bem como de sua reconhecida importância social, ambiental e econômica nas áreas de ocorrência.

Inicialmente, a biomassa residual (Figura 1) foi submetida a caracterizações físicas, nas quais se determinou a densidade a granel e a umidade inicial do material, seguindo as recomendações da literatura para biomassas lignocelulósicas. A umidade inicial foi utilizada como referência para os ajustes posteriores.



Figura 1 – Serragem de Breu-vermelho

Delineamento experimental

Adotou-se o delineamento experimental inteiramente fatorial 2 × 3, totalizando 6 tratamentos, com o objetivo de avaliar a influência conjunta de dois fatores variáveis:

Fator A (tempo de resfriamento) em 2 níveis: 10 e 15 minutos;

Fator B (umidade da biomassa) em 3 níveis: 10%, 12% e 14% (base seca).

Com quatro repetições por tratamento, totalizando 24 ensaios experimentais, a fim de garantir a repetibilidade e a representatividade estatística dos resultados. A ordem dos experimentos foi aleatória para minimizar possíveis influências operacionais. A Tabela 1 expõe os tratamentos testados.

Tabela 1 – Delineamento da pesquisa

Tratamento	Umidade (%)	Compactação	Resfriamento	Repetições

		(min)	(min)	
T10-10	10	8	10	4
T10-15	10	8	15	4
T12-10	12	8	10	4
T12-15	12	8	15	4
T14-10	14	8	10	4
T14-15	14	8	15	4

Preparo da biomassa e ajuste das umidades

Após a determinação da umidade inicial, a serragem foi seca em estufa com circulação de ar forçada a 103 ± 2°C até atingir umidade seca a massa constante. Em seguida, as amostras foram reidratadas com volumes controlados de água destilada, por meio de aspersão e homogeneização manual, até alcançarem os teores de água desejados (10%, 12% e 14%). As amostras foram acondicionadas em sacos plásticos por 24 horas para uniformização da distribuição de água.

A densidade a granel da serragem foi determinada por metodologia adaptada da ABNT NBR 6922:1981, relação entre a massa de serragem e o volume ocupado em

proveta. O poder calorífico superior (PCS) foi determinado em bomba calorimétrica, conforme a ABNT NBR 8633.

Produção dos briquetes

A produção dos briquetes foi realizada em briquetadeira de pistão hidráulico, modelo LIPPEL LB-32 (Figura 2), equipada com sistema de aquecimento e controle de pressão. Para cada ensaio, foram utilizados 30g de serragem.



Figura 2 – Prensa de pistão hidráulico (LIPPEL LB-32)

Com base em pré-testes exploratórios, estabeleceram-se parâmetros operacionais fixos com o intuito de otimizar o tempo total dos experimentos, permitindo concentrar a investigação nos efeitos dos fatores variáveis (umidade e tempo de resfriamento) sobre as propriedades finais dos briquetes. São eles: temperatura de compactação: 125°C; pressão aplicada 150 bar (15 MPa); tempo de compactação de 8 minutos.

Após a compactação, os briquetes foram acondicionados em estufa a 20 ± 5°C por 24h. Posteriormente, os briquetes foram conduzidos aos ensaios físicos e mecânicos.

A análise física dos briquetes se deu pela determinação da densidade aparente, determinada pela relação entre a massa e o volume geométrico, com base na ABNT NBR 18847:2022.

A análise mecânica foi realizada por ensaios de compressão diametral e resistência ao impacto. A compressão diametral foi conduzida com velocidade de carregamento de 5 mm/min, registrando-se a força máxima antes da ruptura, com adaptação dos princípios da ABNT NBR 7222 às características dos briquetes.

A resistência ao impacto foi avaliada por cinco quedas sucessivas, de 1,85m, sobre superfície rígida, registrando-se a massa antes e após o ensaio e a condição visual dos corpos de prova. Esse procedimento foi adotado como método adaptado, tomando-se como referência o conceito de durabilidade mecânica da ISO 17831-2:2025.

Os dados foram submetidos à análise de variância (ANOVA) no software SISVAR. Em razão do delineamento desbalanceado, utilizou-se somas de quadrados equivalentes ao Tipo III e as médias foram comparadas pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade

3. Resultados e discussão

Nas caracterizações iniciais da biomassa, a densidade a granel média foi de 0,251 ± 0,004 g/cm³, com reduzida variabilidade entre as quatro determinações (variação de 0,245 a 0,255 g/cm³), indicando elevada homogeneidade física do material analisado. Quanto à caracterização energética, o poder calorífico superior (PCS) apresentou valores de 4.702, 4.723 e 4.749 cal/g, resultando em média de 4.724,7 ± 23,5 cal/g, o que corresponde a 19,77 ± 0,10 MJ/kg. A baixa dispersão dos dados reforça a consistência energética da amostra avaliada.

O valor médio obtido para a espécie estudada é considerado satisfatório, especialmente quando confrontado com o do eucalipto (19,51 MJ/kg), espécie tradicionalmente consolidada como referência energética no país (Jamber *et al*., 2025). Os resultados evidenciam que a biomassa em questão apresenta desempenho energético ligeiramente superior ao do eucalipto, o que destaca seu potencial para aplicações em sistemas de geração de energia limpa, renovável e eficiente.

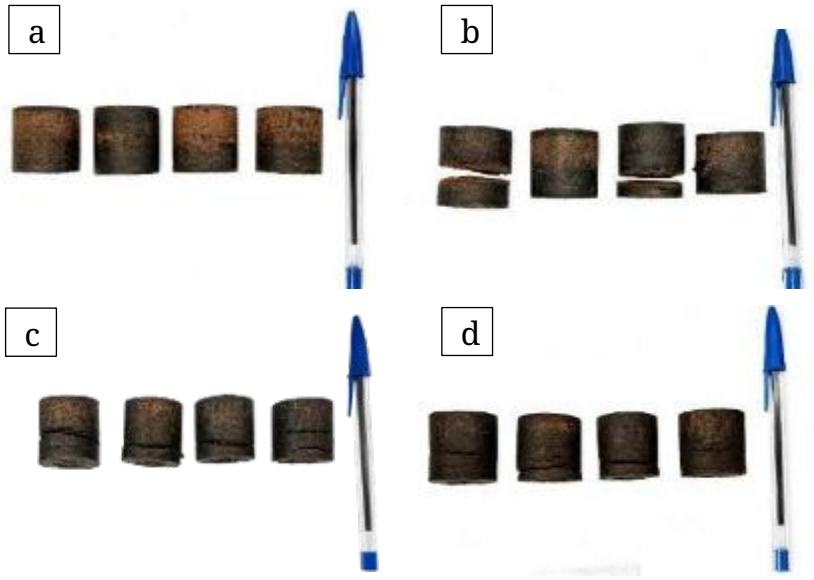




Figura 3 – Briquetes, em que: a) T10-10; b) T10-15; c) T12-10; d) T12-15; e) T14-10 e f) T14-15.

A produção dos briquetes dos tratamentos T10-10, T14-10 e T14-15 seguiram satisfatoriamente, entretanto, entre os tratamento T10-15, T12-10 e T12-15 ocorreram entre as repetições má formação, com briquetes quebrados ou apresentando rachaduras profundas.

Após a compactação, a densidade aparente média dos briquetes foi de 1,080 ± 0,046 g/cm³, correspondendo a um aumento médio de 4,3 vezes em relação à biomassa inicial. Esse ganho confirma a eficiência da compactação para reduzir o volume ocupado pelo resíduo e melhorar sua concentração energética volumétrica, uma das principais vantagens logísticas da briquetagem (Ibitoye *et al.*, 2021).

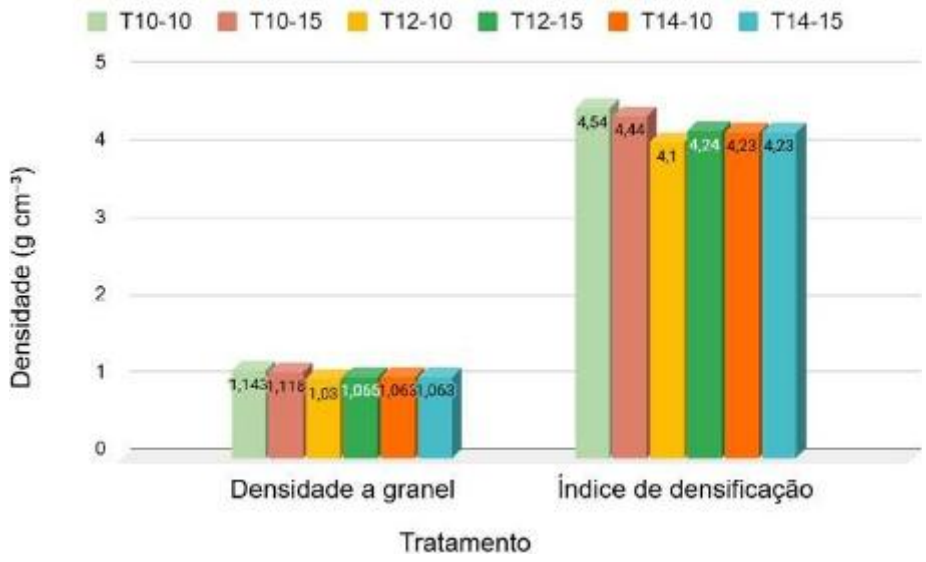


Figura 4 – Densidade e índice de densificação dos tratamentos testados.

Ademais, entende-se que a umidade foi o fator com maior influência sobre a densidade e o desempenho mecânico, em que os briquetes produzidos com menor teor de água apresentaram as maiores densidades e cargas máximas suportadas. Os tratamentos

com 12% registraram a maior frequência de quebras antes do ensaio, o que se explica pela sua má formação durante o processo de compactação.

Tabela 3 – ANOVA e Teste de Tukey para dados de carga máxima suportada e resistência aparente

Tratamento	Repetições	Carga máxima suportada (kN)	Resistência aparente (MPa)	Visual após queda (1,85m)
T10-10	4	10,4228 a	5,3080 a	Inteiro
T10-15	2	9,2845 ab	4,7285 ab	Inteiro
T12-10	2	7,8715 ab	4,0090 ab	Inteiro
T12-15	3	6,5180 b	3,3197 b	Quebrado
T14-10	4	6,9905 b	3,5605 b	Inteiro
T14-15	4	6,5848 b	3,3538 b	Inteiro
166.		**Coeficiente de Variação (%)**	**13,48**	

Médias seguidas de letras distintas diferem entre si pelo Teste de Tukey ($p<0,05$).

O resultado indica a coesão entre as partículas e a eficácia da ligação lignocelulósica promovida pela temperatura e pressão durante a compactação, assim, o comportamento mecânico diferenciou os tratamentos pela carga suportada e pela integridade anterior ao ensaio. O tratamento T10-10 apresentou a maior carga máxima média, 10,42 ± 1,64 kN com todos os quatro briquetes ensaiados, seu resultado sobressaiu a qualquer outro tratamento

aqui experimentado. O tratamento T12-15, T14-10 e T14-15 apresentaram resultados inferiores, sem diferença estatística entre si, sendo entre estes o tratamento T12-15 o único a demonstrar quebra após o ensaio de impacto.

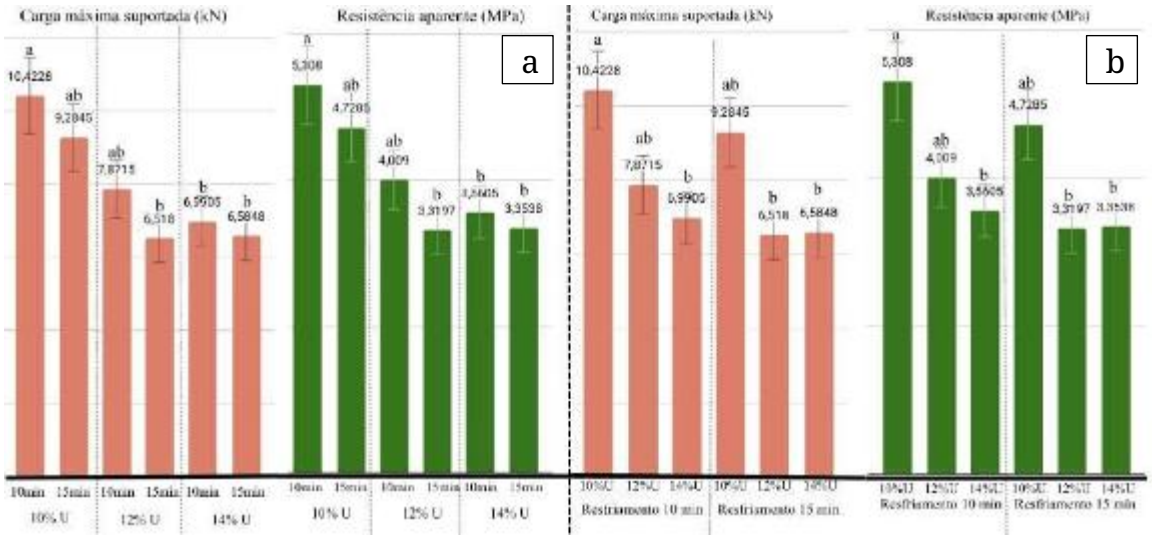


Figura 5 – Carga máxima suportada e resistência aparente, em que a) em função da umidade e b) em função do tempo de resfriamento.

Ao analisar a influência individual dos parâmetros estudados, observa-se que, para os teores de umidade de 10 e 12%, o tempo de resfriamento de 15 min não proporcionou ganhos significativos na qualidade mecânica dos briquetes em comparação ao de 10 min. Esse resultado é vantajoso do ponto de vista operacional, pois permite reduzir o tempo de processamento sem prejuízo à qualidade do produto. Demais achados indicam que o aumento da umidade comprometeu a resistência mecânica dos briquetes, uma vez que o melhor desempenho foi obtido no tratamento com 10%. Essa tendência está em consonância com a literatura, que aponta menor eficiência nas interações interfásicas entre partículas na presença de excesso de umidade, dificultando a formação de pontes sólidas durante a compactação (Abdel Aal *et al*., 2023).

No ensaio de resistência ao impacto, todos os tratamentos apresentaram retenção de massa de 100% após cinco impactos sucessivos de 1,85m. Contudo, a avaliação visual mostrou que briquetes de T12-10 e T12-15 se partiram, ambos com 12% de umidade, enquanto os demais permaneceram íntegros. Esse resultado demonstra que a retenção de massa, quando avaliada sem quantificação de fragmentos, pode não detectar perda de

integridade estrutural. Dessa forma, o índice gravimétrico deve ser interpretado junto ao registro visual conforme o princípio de durabilidade mecânica da ISO 17831-2:2025. Esse resultado também concorda com Abdel Aal et al. (2023), que associaram maiores umidade à redução da resistência mecânica pelo enfraquecimento das ligações entre as partículas.

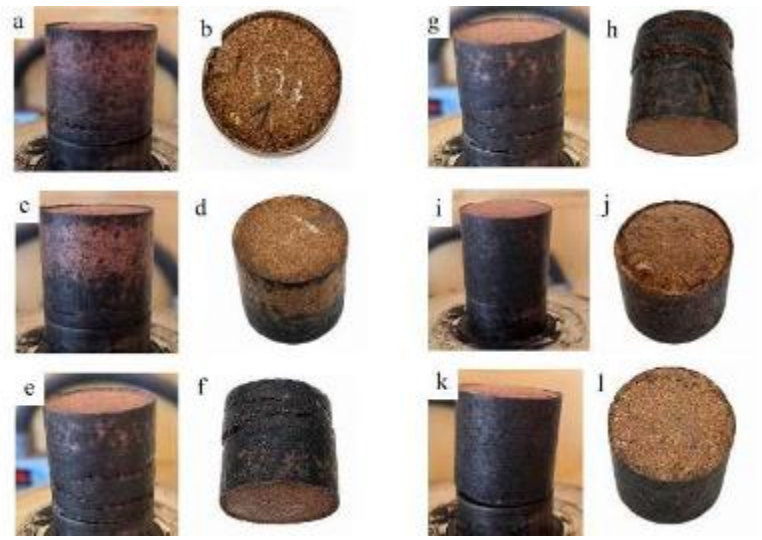


Figura 6 – Briquetes antes e após ensaio de queda, em que a) T10-10 antes, b) T10-10 após, c) T10-15 antes, d) T10-15 após, e) T12-10 antes, f) T12-10 após, g) T12-15 antes, h) T12-15 após, i) T14-10 antes j) T14-10 após, k) T14-15 antes, l) T14-15 após.

4. Conclusões

- A 14% de umidade permite a obtenção de briquetes íntegros em ambos os tempos de resfriamento (10 e 15 min). Para 10% de umidade, a produção de briquetes viáveis só foi possível com resfriamento de 10 min. Já o teor intermediário de 12% mostrou-se inadequado, resultando em briquetes quebrados ou com rachaduras profundas, independentemente do tempo de resfriamento.
- O tratamento com 10% de umidade, 8 min de compactação e 10 min de resfriamento apresentou melhor desempenho conjunto, com densidade de 1,143 g cm^{-3}, carga máxima média de 10,42 kN e ausência de rupturas prévias.
- A espécie estudada possui boas características para atuar no cenário energético quando avaliada as melhores formas de produzir o biocombustível sólido.

Sugere-se os seguintes aprofundamentos: (i) Caracterização física, química e energética da serragem de breu vermelho; (ii) Influência da granulometria da biomassa na qualidade dos briquetes; (iii) Otimização da pressão, temperatura e tempo de compactação para maximizar a densidade e a resistência mecânica; (iv) Avaliação do poder calorífico dos briquetes.

5. Agradecimentos

À Universidade Federal de Lavras, ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia da Madeira, à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelo apoio laboratorial, institucional e financeiro.

6. Referências bibliográficas

Abdel Aal, A. M. K., Ibrahim, O. H. M., Al-Farga, A., & El Saeidy, E. A. (2023). Impact of biomass moisture content on the physical properties of briquettes produced from recycled Ficus nitida pruning residuals. Sustainability, 15, 11762.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. (1981). ABNT NBR 6922:1981: Carvão vegetal - Ensaios físicos. Determinação da massa específica (densidade a granel). ABNT.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. (1984). ABNT NBR 8633:1984: Carvão vegetal. Determinação do poder calorífico. ABNT.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2011). ABNT NBR 7222:2011: Concreto e argamassa. Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos. ABNT.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2022). ABNT NBR ISO 18847:2022: Biocombustíveis sólidos. Determinação da densidade de partículas de péletes e briquetes. ABNT.

Campos, K. D., Faria, L. J. G. de, Andrade, E. L., Sousa, J. O. dos S., Araújo, L. C. C., Silva, O. L. L., & Joele, M. R. S. P. (2024). Use of biomass from Amazonian agro-industrial waste for the production of energy. Revista Brasileira de Geografia Física, 17(06), 4117-4132.

Cruz, E. D. (2019). Germinação de sementes de espécies amazônicas: breu-vermelho [*Protium decandrum* (Aubl.) Marchand]. Comunicado Técnico no. 308. Embrapa. https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1106578/1/COM.TEC30 8.pdf

Cumplido, M. A., Gonçalves, A. R., Poyer, F. H., Martins, F. R., Costa, R. S., Branco, E. A., ... & Pereira, E. B. (2026). Electricity supply in isolated systems in the Brazilian Amazon: Challenges and opportunities. Energy for Sustainable Development, 91, 101902.

Furtado, T. S., Valin, M., Brand, M. A., & Bellote, A. F. J. (2010). Variáveis do processo de briquetagem e qualidade de briquetes de biomassa florestal. Pesquisa Florestal Brasileira, 30(62), 101-101.

Ibitoye, S. E., Jen, T. C., Mahamood, R. M., & Akinlabi, E. T. (2021). Densification of agro-residues for sustainable energy generation: an overview. Bioresources and bioprocessing, 8(1), 75.

International Organization for Standardization. (2025). ISO 17831-2:2025: Solid biofuels. Determination of mechanical durability of pellets and briquettes. Part 2: Briquettes. ISO.

Jambers, V. T., Amorim, C. N., Campos, C. M., da Rocha, L. L., de Cassia OliveiraCarneiro, A., Carvalho, A. M. M. L., ... & Pereira, B. L. C. (2025). Firewood quality of *Eucalyptus spp*. clones for agroindustry supply in Mato Grosso, Brazil. Revista Árvore, 49, e4921.

Jeffry, L., Ong, M. Y., Nomanbhay, S., Mofijur, M., Mubashir, M., & Show, P. L. (2021). Greenhouse gases utilization: A review. Fuel, 301, 121017.

Marreiro, H. M., Peruchi, R. S., Lopes, R. M., Andersen, S. L., Eliziário, S. A., & Rotella Junior, P. (2021). Empirical studies on biomass briquette production: A literature review. Energies, 14(24), 8320.

Olabi, A. G., & Abdelkareem, M. A. (2022). Renewable energy and climate change. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 158, 112111.

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Peletização como estratégia para otimização logística e operacional da produção de biochar de palha de café

Emilly Aparecida Zacarias Miguel Afonso [1]; Danielly Moreira Gomes[1]; Iara Fontes Demuner[1] ; Angélica de Cássia Oliveira Carneiro[1]; Igor Barbosa Silva[1]; Luisa Rosa Guimarães[1]; Miriã de Oliveira Santos[1]

[1] Universidade Federal de Viçosa

Resumo: A palha de café *in natura* apresenta baixa densidade a granel (249,90 kg/m³), o que compromete a logística de transporte e a operação de reatores de pirólise. Este trabalho avaliou os impactos operacionais e logísticos da densificação mecânica por peletização da palha de café (*Coffea arabica* L.) para otimizar a síntese de biochar por pirólise lenta. A biomassa foi seca, pelletizada em prensa laboratorial sem aditivos e pirolisada em mufla nas temperaturas de 450, 550 e 650 °C, com tempos de residência de 60, 90 e 120 minutos. Os pellets apresentaram alta durabilidade (96,5%), ausência de finos e densidade a granel de 559,40 kg/m³, resultando em taxa de compactação de 2,42. O rendimento gravimétrico do biochar diminuiu de 36,75% para 31,15% com o aumento da temperatura, enquanto o carbono fixo aumentou de 58,88% para 66,28%, refletindo maior estabilidade térmica do material. Conclui-se que a peletização é uma estratégia eficaz para otimizar a logística e a qualidade do biochar de palha de café.

Palavras-chave: Biomassa residual; Densificação; Pirólise lenta; Recalcitrância; Economia circular**.**

Pelletization as a strategy for the logistical and operational optimization of coffee husk biochar production

Abstract: Coffee husk *in natura* has low bulk density (249.90 kg/m³), which compromises transport logistics and pyrolysis reactor operation. This study evaluated the operational and logistical impacts of mechanical densification by pelletization of coffee husk (*Coffea arabica* L.) to optimize biochar synthesis via slow pyrolysis. The biomass was dried, pelletized in a laboratory press without additives, and pyrolyzed in a muffle furnace at 450, 550, and 650 °C, with residence times of 60, 90, and 120 minutes. The pellets showed high durability (96.5%), no fines, and a bulk density of 559.40 kg/m³, resulting in a compaction ratio of 2.42. Biochar gravimetric yield decreased from 36.75% to 31.15% with increasing temperature, while fixed carbon increased from 58.88% to 66.28%, reflecting greater thermal stability. It is concluded that pelletization is an effective strategy to optimize both the logistics and the quality of coffee husk biochar.

Keywords: Residual biomass; Densification; Slow pyrolysis; Recalcitrance; Circular economy.

1. Introdução

Os combustíveis fósseis emitem grandes quantidades de CO_2, contribuindo para o aquecimento global e as mudanças climáticas (ZHANG, et al 2007). Nesse contexto, os processos de conversão termoquímica, especialmente a pirólise lenta, surgem como alternativas para a mitigação ambiental, convertendo biomassas residuais em biochar, material sólido rico em carbono, estável e capaz de reter carbono no solo por longos períodos (INTERNATIONAL BIOCHAR INITIATIVE, 2024; LIU, et al 2015).

O Brasil, maior produtor e exportador mundial de café, colheu 54,7 milhões de sacas beneficiadas na safra de 2023, em cerca de 2,25 milhões de hectares (CONAB, 2024), com valor bruto de produção de R$ 48 bilhões no mesmo ano (CONSÓRCIO PESQUISA CAFÉ, 2023). O processamento pós-colheita por via seca gera grandes volumes de palha e casca residual, que podem representar até 50% da massa do fruto beneficiado e, quando descartados de forma inadequada, causam contaminação do solo e da água (URREGO-YEPES, et al 2021). Apesar do elevado potencial dessa biomassa para produção de biochar, dado seu alto teor de voláteis, extrativos e holocelulose (VAN NGUYEN, et al 2023), a palha de café in natura apresenta baixa densidade a granel, o que dificulta a logística de transporte e armazenamento, além de favorecer o arraste de partículas e o entupimento dos reatores durante a pirólise (MOHAMMADI, 2021).

A pelletização apresenta-se como estratégia para superar essas limitações. Biomassas compactadas atingem densidade a granel consideravelmente superior à da biomassa não compactada, reduzindo os volumes a serem transportados e o arraste de material particulado nos reatores (YANG, et al 2025).Além disso,favorecem a carbonização e resultam em biochar de maior densidade, maior poder calorífico volumétrico e resistência física superior ao obtido a partir da biomassa in natura (REZA, et al 2012). Extrativos e lignina presentes na palha de café atuam como plastificantes e ligantes naturais durante a compactação, dispensando o uso de aditivos químicos externos (NIELSEN, et al 2010; CHEN, et al 2011). Ainda assim, há lacunas na literatura quanto aos impactos da compactação prévia sobre o rendimento e a qualidade do biochar, bem como sobre os parâmetros operacionais da pirólise (ZHAO, et al 2013).

Este trabalho teve como objetivo realizar a caracterização física da palha de café (*Coffea arabica* L.) após o processo de densificação mecânica por peletização, bem como avaliar sua viabilidade para a produção de biochar por meio da pirólise lenta.

2. Material e métodos

O experimento foi desenvolvido no Laboratório de Painéis e Energia da Madeira (LAPEM), vinculado ao Departamento de Engenharia Florestal da Universidade Federal de Viçosa (DEF/UFV), localizado no município de Viçosa, MG.

O estudo utilizou amostras de palha de café (*Coffea arabica* L.) obtidas do processamento pós-colheita por via seca. Inicialmente, a biomassa bruta passou por amostragem e homogeneização.

O teor de umidade, base seca, da palha de café foi obtido a partir da destilação com Ciclohexano, conforme procedimentos descritos pela Embrapa Agroindústria Tropical (2008). A densidade a granel da palha in natura foi determinada utilizando um recipiente de volume conhecido, conforme as diretrizes da norma DIN EN 15103.

2.1. Processo de pelletização e avaliação da qualidade dos pellets

A palha de café foi submetida a uma etapa de secagem prévia para adequar o teor de umidade aos níveis de compactação. O processo de densificação foi executado em uma prensa pelletizadora laboratorial com matriz circular horizontal (Amandus Kahl, modelo 14-175) sem adição de ligantes ou aditivos químicos externos. A produtividade horária da máquina foi monitorada continuamente durante a operação.

Os pellets produzidos foram coletados e resfriados à temperatura ambiente para a caracterização física. A umidade final em base seca (Ubs) foi obtido a partir da destilação com Ciclohexano, conforme procedimentos descritos pela Embrapa Agroindústria Tropical (2008).

A densidade a granel dos pellets foi determinada utilizando um recipiente de volume conhecido, conforme as diretrizes da norma DIN EN 15103. A taxa de compactação foi calculada pela razão direta entre a densidade a granel do pellet e a densidade a granel da biomassa in natura. A durabilidade e a porcentagem de finos dos pellets foram determinadas de acordo com a norma DIN EN - 15210-1 (DIN, 2010d), utilizando o equipamento LignoTester.

2.2. Produção e caracterização do biochar

A produção do biochar foi realizada em mufla elétrica de laboratório acoplada a um sistema de condensação de gases. Em cada ciclo, aproximadamente 500 g de pellets de palha de café foram submetidos à pirólise em atmosfera com ausência controlada de oxigênio, nas temperaturas de 450, 550 e 650 °C e tempos de residência de 60, 90 e 120 minutos. Ao final do processo, o biochar foi resfriado à temperatura ambiente para posterior caracterização.

O rendimento gravimétrico do biochar foi determinado com base na relação entre a massa do biochar produzido e a massa da biomassa utilizada para a pirólise. A composição química imediata foi determinada de acordo com a norma ASTM D1762-84 (ASTM, 2013), para obtenção dos teores dos materiais voláteis, cinzas e carbono fixo, expressos em base seca.

A composição elementar (carbono, nitrogênio, hidrogênio e enxofre) foi realizada de acordo com a norma DIN EN 15104 (DIN, 2011c). O equipamento utilizado foi um Vario Micro Cube CHNS, Elementar®. O valor de oxigênio foi determinado pelo somatório dos teores de carbono, nitrogênio, hidrogênio, enxofre e cinzas, decrescido de 100, conforme a norma DIN EN 15296 (DIN, 2011d).

Os resultados foram submetidos a testes de homogeneidade e normalidade. Aplicou-se a Análise de Variância (ANOVA) para verificar efeitos significativos dos fatores. As médias foram comparadas pelo teste de Tukey ao nível de 95% de significância ($p<0,05$).

3. Resultados e discussão

Na Tabela 1 são apresentados os valores médios das propriedades da biomassa residual de café utilizada para a produção dos pellets.

Tabela 1 – Valores médios das propriedades da biomassa in natura

Propriedade	Unidade	Valor médio
Umidade inicial	%	37,32
Umidade pós-secagem	%	9,66
Densidade a granel	kg/m³	249,90

A biomassa de palha de café apresentou teor de umidade inicial de 37,32%, valor compatível com os encontrados na literatura para resíduos de café recém processados, os quais geralmente apresentam teores entre 35% e 50% (VAN NGUYEN et al. 2023). Após o processo de secagem, a umidade foi reduzida para 9,66%, valor adequado para o armazenamento da biomassa evitando o ataque de fungos e favorecendo processos como a pelletização, reduzindo o risco de instabilidades. Observou-se que a densidade a granel do resíduo de café foi de 249,90 kg/m³, valor semelhante ao encontrado por outros autores que também estudaram biomassa de café. Resende et al. (2021), por exemplo, encontraram valores entre 240 e 260 kg/m³. A baixa densidade impacta diretamente na logística de transporte e armazenamento deste material, se tornando uma limitação operacional quando comparadas a biomassas compactadas.

Na Tabela 2 são apresentados os valores médios das propriedades dos pellets produzidos a partir da biomassa residual de café.

Tabela 2 – Valores médios das propriedades dos pellets de café.

Propriedade	Valor médio
Finos (%)	0,00
Durabilidade (%)	96,50
Umidade, base seca (%)	3,33
Densidade a granel (kg/m³)	559,40
Taxa de compactação	2,42

Os pellets de palha de café apresentaram alta durabilidade mecânica (96,5%) e ausência de finos, indicando elevada resistência ao transporte e armazenamento. Esse desempenho pode ser atribuído ao elevado teor de extrativos da biomassa, que atuam como plastificantes naturais durante a pelletização, promovendo maior coesão entre as partículas (GARCÍA-MARAVER et al., 2020). Além disso, a compactação reduziu em 34% o teor de umidade e proporcionou uma taxa de compactação de 2,42, evidenciando aumento da densidade e redução do volume da biomassa, fatores que favorecem a otimização logística e operacional do processo.

Na Tabela 3 são apresentados os valores médios das propriedades dos biochars produzidos.

Tabela 3 – Valores médios das propriedades dos biochars produzidos em diferentes temperaturas.

Propriedade	450 °C	550 °C	650 °C
Rendimento gravimétrico (%)	36,75 a	32,64 b	31,15 c
Materiais voláteis (%)	25,51 a	18,94 b	15,34 c
Cinzas (%)	15,61 b	18,14 a	18,37 a
Carbono fixo (%)	58,88 c	62,92 b	66,28 a

Médias seguidas pela mesma letra na linha não diferem significativamente entre si pelo teste de Tukey a 95% de probabilidade.

O rendimento gravimétrico do biochar diminuiu com o aumento da temperatura de pirólise, variando de 36,75% a 31,15% entre 450 °C e 650 °C. Esse comportamento é esperado e

está associado à maior degradação térmica e volatilização dos constituintes da biomassa. A hemicelulose e os extrativos se degradam em temperaturas mais baixas, seguidos pela celulose, enquanto a lignina apresenta decomposição mais lenta e em uma ampla faixa de temperatura, contribuindo para a formação da fração sólida residual do biochar (MUKHERJEE et al., 2021; SILVA et al., 2020).

O teor de materiais voláteis reduziu de 25,51% para 15,34% com o aumento da temperatura de pirólise de 450 °C para 650 °C, indicando maior estabilidade térmica do biochar devido à volatilização dos compostos orgânicos. Em contrapartida, o teor de cinzas aumentou entre 450 °C e 550 °C, permanecendo estável até 650 °C, comportamento típico de biomassas com elevada fração mineral (FERNANDES et al., 2020; NUNES et al., 2020). O carbono fixo aumentou de 58,88% para 66,28%, refletindo a formação de estruturas aromáticas mais condensadas e, consequentemente, maior estabilidade do biochar (OLIVEIRA, 2020).

4. Conclusões

A peletização da palha de café mostrou-se uma estratégia eficaz para superar as limitações logísticas e operacionais impostas pela baixa densidade a granel da biomassa in natura, resultando em pellets de alta durabilidade mecânica e ausência de finos, sem a necessidade de aditivos químicos externos. O aumento da densidade a granel, associado à taxa de compactação de 2,42, favorece o transporte, o armazenamento e a alimentação contínua dos reatores de pirólise, reduzindo o arraste de partículas. Quanto à qualidade do biochar, a elevação da temperatura de pirólise resultou em menor rendimento gravimétrico e maior teor de carbono fixo, indicando maior estabilidade térmica do material produzido a partir da biomassa pelletizada. Dessa forma, a densificação mecânica por peletização se consolida como uma etapa tecnicamente viável para otimizar tanto os aspectos operacionais quanto a qualidade final do biochar de palha de café.

5. Agradecimentos

À Universidade Federal de Viçosa (UFV), especialmente ao Departamento de Engenharia Florestal e ao Laboratório de Painéis e Energia da Madeira (LAPEM), pelo suporte técnico, infraestrutura e acolhimento fundamentais para a realização deste estudo. Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) (Processo: 444395/2024-5), à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) (Processo:

APQ-05311-24) e à EMBRAPII pelo apoio financeiro indispensável à execução do projeto. E por fim, ao Instituto Superior de Agronomia da Universidade de Lisboa pela parceria técnica estabelecida.

6. Referências bibliográficas

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D1762-84**: Standard Test Method for Chemical Analysis of Wood Charcoal. Philadelphia, USA, 2013.

CHEN, W.-H.; KUO, P.-C. Isothermal torrefaction kinetics of hemicellulose, cellulose, lignin and xylan using thermogravimetric analysis. **Energy**, v. 36, n. 11, p. 6451–6460, 2011.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO (CONAB). Café - Conjuntura mensal – maio 2024.

CONSÓRCIO PESQUISA CAFÉ. Faturamento do café no Brasil para o ano de 2024. Disponível em: <http://www.consorciopesquisacafe.com.br/index.php/imprensa/noticias/1235202407 16174831>. Acesso em: 10 out. 2024.

DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG (DIN). **EN 15103**: Solid biofuels – Determination of bulk density. Alemanha: CEN, 2010. 14 p.

DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG (DIN). **EN 15104**: Determination of total content of carbon, hydrogen and nitrogen – Instrumental methods. Berlim: CEN, 2011c. 15 p.

DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG (DIN). **EN 15210-1**: Solid biofuels - Determination of mechanical durability of pellets and briquettes - Part 1: Pellets. Alemanha: CEN, 2010d. 12 p.

DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG (DIN). **EN 15296**: Conversion of analytical results from one basis to another. Berlim: CEN, 2011e. 15 p.

EMBRAPA AGROINDÚSTRIA TROPICAL. Método para determinação de umidade de plantas aromáticas. **Comunicado Técnico**, n. 136. Fortaleza, 2008.

FERNANDES, B. C. et al. Impact of pyrolysis temperature on the properties of eucalyptus wood-derived biochar. **Materials**, v. 13, n. 24, p. 5841, 2020.

GARCÍA-MARAVER, A. et al. Advances in biomass pelletization: Technologies and quality control. **Fuel Processing Technology**, v. 204, p. 106407, 2020.

INTERNATIONAL BIOCHAR INITIATIVE (IBI). O que é biochar? 2024.

LIU, N.; CHARRUA, A. B.; WENG, C. H.; YUAN, X.; DING, F. **Bioresource Technology**, 2015.

MOHAMMADI, A. Overview of the benefits and challenges associated with pelletizing biochar. **Processes**, v. 9, n. 9, p. 1591, 2021.

MUKHERJEE, A. et al. Pyrolysis kinetics and activation thermodynamic parameters of exhausted coffee residue and coffee husk using thermogravimetric analysis. **The Canadian Journal of Chemical Engineering**, v. 99, n. 8, p. 1683–1695, 2021.

NIELSEN, N. P. K.; GARDNER, D. J.; FELBY, C. Effect of extractives and storage on the pelletizing process of sawdust. **Fuel**, v. 89, n. 1, p. 94–98, 2010.

NUNES, L. J. R. et al. Waste recovery through thermochemical conversion technologies: A case study with several Portuguese agroforestry by-products. **Clean Technologies**, v. 2, n. 3, p. 377–391, 2020.

OLIVEIRA, G. A. et al. Avaliação de biochar obtido da borra de café para a construção de um sensor eletroquímico para determinação de chumbo. Dissertação (Mestrado em Química) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2020.

RESENDE, D. R. et al. Potencial energético dos resíduos do processamento de café combinados com finos de carvão vegetal. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 15, p. e326101523012, 2021.

REZA, M. T. et al. Pelletization of biochar from hydrothermally carbonized wood. **Environmental Progress & Sustainable Energy**, v. 31, n. 2, p. 225–234, 2012.

SILVA, C. M. S. et al. (2020) — pendente: citada nos resultados junto com Mukherjee et al. (2021), mas ausente na lista de referências completa do seu TCC original. Não incluí dados fictícios; preciso que você confirme autores completos, título, periódico e ano para fechar esta entrada.

URREGO-YEPES, W. et al. Incorporating the recovered carbon black produced in an industrial-scale waste tire pyrolysis plant into a natural rubber formulation. **Journal of Environmental Management**, v. 287, n. 112292, 2021.

VAN NGUYEN, D. et al. Data on chemical composition of coffee husks and lignin microparticles as their extracted product. **Data in Brief**, v. 51, n. 109781, 2023.

YANG, Y. et al. Effects of different biomass types on pellet qualities and processing energy consumption. **Agriculture**, v. 15, n. 3, p. 316, 2025.

ZHANG, Q.; CHANG, J.; WANG, T.; XU, Y. **Energy Conversion and Management**, 2007.

ZHAO, L. et al. Heterogeneity of biochar properties as a function of feedstock sources and production temperatures. **Journal of Hazardous Materials**, v. 256–257, p. 1–9, 2013.

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Perfil térmico e balanço de carbono da produção de carvão vegetal a partir dos resíduos do manejo florestal na Amazônia utilizando Sistema fornos-fornalha

Elvis Vieira dos Santos[1]; Samara Teixeira da Silva[2]; Michael Douglas Roque Lima[3]; Patrícia Leonídia dos Santos[1]; Valdenia Medeiros de Araújo[1]; Genilson Maia Corrêa[1]; Paulo Fernando Trugilho[1]; Thiago de Paula Protásio[1]

Universidade Federal de Lavras (UFLA)[1]; Universidade Federal Rural da Amazônia (UFRA)[2]; Universidade Estadual da Região Tocantina do Maranhão (UEMASUL)[3]

Resumo: A produção de carvão vegetal a partir de resíduos do manejo florestal sustentável representa uma alternativa para o aproveitamento energético da biomassa amazônica e a redução de desperdícios da exploração madeireira. Este estudo teve como objetivo avaliar o perfil térmico e o balanço de carbono da produção de carvão vegetal em sistema fornos-fornalha utilizando resíduos lenhosos de baixa e alta densidade básica. As carbonizações foram realizadas em unidade demonstrativa instalada em Paragominas, PA, com monitoramento da temperatura por oito termopares distribuídos em diferentes posições dos fornos. Também foram determinadas as propriedades físicas e químicas da madeira e estimados o carbono retido no carvão vegetal e o carbono volatilizado durante a carbonização. Após 50 h de carbonização, a temperatura variou de 120 a 330 °C entre a base e a copa dos fornos com madeiras de alta densidade e de 146 a 365 °C para madeiras de baixa densidade, evidenciando elevada heterogeneidade térmica. As madeiras de alta densidade apresentaram maior massa inicial de carbono (3.597 kg), com retenção de 1.969 kg no carvão vegetal e volatilização de 1.628 kg. Para madeiras de baixa densidade, a massa inicial foi de 1.544 kg, com retenção de 1.014 kg no carvão vegetal e volatilização de 530 kg. O monitoramento do perfil térmico mostrou-se essencial para compreender a dinâmica da carbonização e aperfeiçoar o controle operacional do sistema.

Palavras-chave: Temperatura de carbonização; Biochar; Biorredutor.

Thermal Profile and Carbon Balance of Charcoal Production from Sustainable Forest Management Residues in the Amazon Using a Furnace-Kiln System

Abstract: Charcoal production from residues generated by sustainable forest management represents an alternative for the energy utilization of Amazonian biomass while reducing waste from timber harvesting. This study aimed to evaluate the thermal profile and carbon balance of charcoal production in a furnace-kiln system using woody residues with low and high basic density. Carbonization trials were carried out in a demonstration unit located in Paragominas, Pará, Brazil, with temperature monitored using eight thermocouples distributed at different positions within the kilns. The physical and chemical properties of the wood were also determined, and the carbon retained in the charcoal and the carbon volatilized during carbonization were estimated. After 50 h of carbonization, the temperature ranged from 120 to 330 °C between the base and the top of the kilns containing high-density wood and from 146 to 365 °C for kilns containing low-density wood, indicating high thermal heterogeneity. High-density wood exhibited a greater initial carbon mass (3,597 kg), with 1,969 kg retained in the

charcoal and 1,628 kg volatilized. For low-density wood, the initial carbon mass was 1,544 kg, with 1,014 kg retained in the charcoal and 530 kg volatilized. Monitoring the thermal profile proved essential for understanding the carbonization process and improving the operational control of the furnace-kiln system.

Keywords: Carbonization temperature; Biochar; Bioreducer.

1. Introdução

O grande desafio da utilização energética de biomassas é otimizar os processos termoquímicos de modo que possam ser obtidos alto rendimento e qualidade dos produtos energéticos com menores custos. A pirólise ou carbonização se destaca entre os processos termoquímicos, pois é amplamente utilizada para obtenção de carvão vegetal para uso siderúrgico e doméstico (Pereira et al., 2022). O Brasil se destaca no uso siderúrgico do carvão vegetal. Em 2024, o país produziu 6,6 milhões de toneladas de carvão vegetal (IBÁ, 2025).

O carvão vegetal brasileiro é geralmente produzido a partir de florestas plantadas. As plantações florestais, visando utilização energética da madeira, fornece m alta produtividade de biomassa com características altamente homogêneas (Pena-Vergara et al., 2022; Protásio et al., 2019). No Brasil, florestas de *Eucalyptus* produzem, em média, 34 $m^3\ ha^{-1}\ ano^{-1}$ de madeira aos 7 anos de plantio (IBÁ, 2025). No entanto, a concentração dessas florestas em regiões específicas do país aliada à alta demanda por madeira para outros setores (IBÁ, 2025) e a necessidade de uso eficiente dos recursos naturais (Schroeder et al., 2019) exige a diversificação das biomassas utilizadas para produção de carvão vegetal no país.

O manejo florestal sustentável na Amazônia visando o comércio de madeira gera grandes quantidades de resíduos (Numazawa et al., 2017) que podem ser utilizados para suprir as necessidades energéticas na região. Segundo Numazawa et al. (2017), para cada 1 tonelada de madeira comercial extraída na floresta, são geradas 2 toneladas de resíduos lenhosos. Muitos estudos foram realizados com estes materiais, demonstrando sua qualidade para produção de carvão vegetal(Lima et al., 2021, 2023; Santos et al., 2025). No entanto, há lacunas do efeito do controle da carbonização na produção e qualidade do carvão vegetal na Amazônia. fornos-fornalha (SFF) é um sistema de carbonização composto por 4 fornos de alvenaria circulares acoplados a uma fornalha que queima os gases formados durante a carbonização. Nesse sentido, este estudo visa avaliar o perfil térmico e o balanço da produção de carvão vegetal a partir dos resíduos de manejo utilizando o sistema forno-fornalha.

2. Material e métodos

2.1 Localização do estudo

O estudo foi conduzido em uma unidade demonstrativa do sistema fornos-fornalha, instalada na Fazenda Rio Capim, no município de Paragominas, Pará, propriedade do Grupo Keilla (Figura 1)**.** Esta unidade foi especialmente projetada para a carbonização de resíduos lenhosos provenientes do manejo florestal sustentável, utilizando como matéria-prima espécies florestais nativas da região. A empresa utiliza resíduos de espécies florestais provenientes do manejo florestal sustentável praticado na fazenda para produção de carvão vegetal em fornos "rabo quente", operando sob licença fornecida pela Secretaria do Estado de Meio Ambiente e Sustentabilidade do Pará (SEMAS - PA).

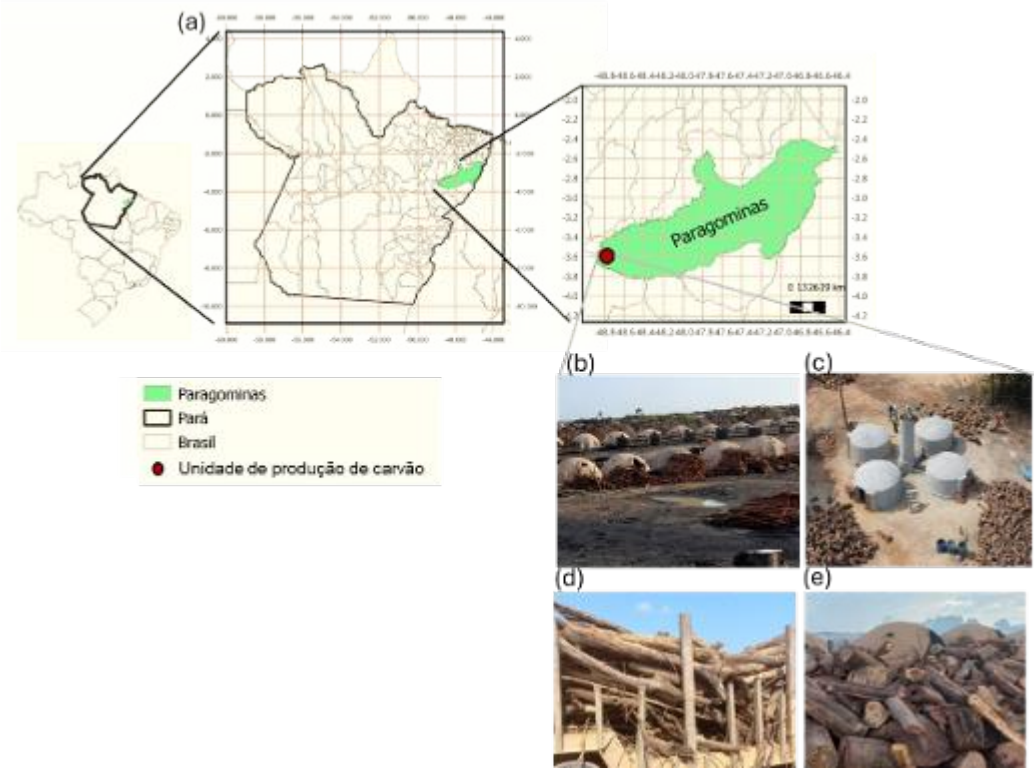


Figura 1 – Localização do experimento; (a) Localização da unidade de manejo e unidade de produção de carvão; (b) Forno tipo "rabo quente" utilizados para carbonização na empresa (c) Unidade demonstrativa do sistema fornos-fornalha utilizada neste experimento; (d) resíduos do manejo florestal; (e) Resíduos seccionados para enchimento dos fornos de carbonização.

2.2 Delineamento experimental

Para avaliação da carbonização, os resíduos foram inicialmente segregados entre madeiras de baixa densidade básica (≤0,500 g/cm³) e alta densidade básica (≥0,750 g.cm³). Para cada um destes tratamentos foi realizada 1 repetição.

Para seleção dos resíduos em campo, a densidade dos materiais foi definida com base na consulta de estudos anteriores e conhecimento empírico do identificador.

2.3 Coleta do material para identificação e análises física e químicas

Todas as espécies utilizadas na carbonização foram identificadas em campo pelo identificador botânico da empresa por nome popular. Em seguida, foi retirado 3 discos (extremidades e meio do galho/fuste) para confirmação da densidade básica, obtenção da umidade da madeira, caracterização química e identificação do nome científico para cada espécie. Quando havia mais de um fuste/galho por espécies, o mesmo procedimento foi feito para cada fuste/galho. Para a obtenção da umidade e densidade por espécie realizou-se a média aritmética entre os valores obtidos por fuste.

A análise química elementar será realizada em um analisador universal da marca Elementar (modelo Vario Micro Cube), sendo obtido os teores de carbono (C), hidrogênio (H), nitrogênio (N), e enxofre (S). O teor de oxigênio é obtido por diferença [O (%)= 100 - C (%) - H (%) – N (%) – S (%) – Cinzas (%)].

A partir dos percentuais de carbono da análise elementar foi possível calcular o carbono retido no carvão vegetal e, por diferença, o volatilizado conforme a equação 1.

$$CR = RGC\left(\frac{C_{carv\tilde{a}o\ vegetal}(\%)}{C_{madeira(\%)}}\right) \quad (1)$$

onde, CR é o carbono retido no carvão vegetal (%, base seca - bs); RGC, rendimento gravimétrico em carvão vegetal (%, bs); $C_{carvão\ vegetal}$, teor de carbono no carvão vegetal (%, bs); e $C_{madeira}$, teor de carbono na madeira (%, bs).

2.4 Avaliação dos perfis térmicos do forno

Para avaliar o perfil térmico dos fornos foram utilizados 8 termopares tipo N com capacidade de medição de até 1200 ºC. Com uma haste de metal, foram feitos furos nos fornos para inserção dos sensores de temperatura. Eles foram alocados na mesma linha vertical dos poços de medição de temperatura por meio de pirômetros. 4 termopares foram alocados em cada lateral dos fornos. Na base do forno (cerca de 0,20 m de altura), lateral direita, 1 termopar foi inserido 0,55 metros da parte frontal do forno. Na mesma linha vertical, foram inseridos 1

termopar no meio do forno (0,84 m de altura) e 1 termopar próximo à copa (1,67 m). 1 metro à frente horizontalmente, próximo da parte dianteira do forno, foram inseridos 1 termopar à 0,84 m de altura.

Na lateral esquerda, à distância de 0,55 metros da parte frontal do forno foram inseridos 1 termopar à cerca de 0,84 m de altura. 1 metro à frente horizontalmente, próximo da parte dianteira do forno foi inserido termopares à 0,20, 0,84 e 1,67 m de altura. Esses sensores foram instalados visando à mensuração da temperatura em todo o seu perfil horizontal e vertical. Os termopares foram acoplados a um datalogger, possibilitando a obtenção dos dados de temperatura a cada minuto.

3. Resultados e discussão

A Figura 2 apresenta a variação vertical e horizontal da temperatura nos fornos com madeira de baixa densidade e alta densidade. A Figura demonstra alta variação da temperatura no interior dos fornos ao longo da carbonização. Às 50 h de carbonização, a temperatura na copa dos fornos de alta densidade apresentou 330 ºC, enquanto a base apresentou média de 120ºC, evidenciando uma diferença significativa entre as posições. Para os fornos com madeira de baixa densidade a variação semelhante 146ºC e 365ºC na base e copa do forno respectivamente.

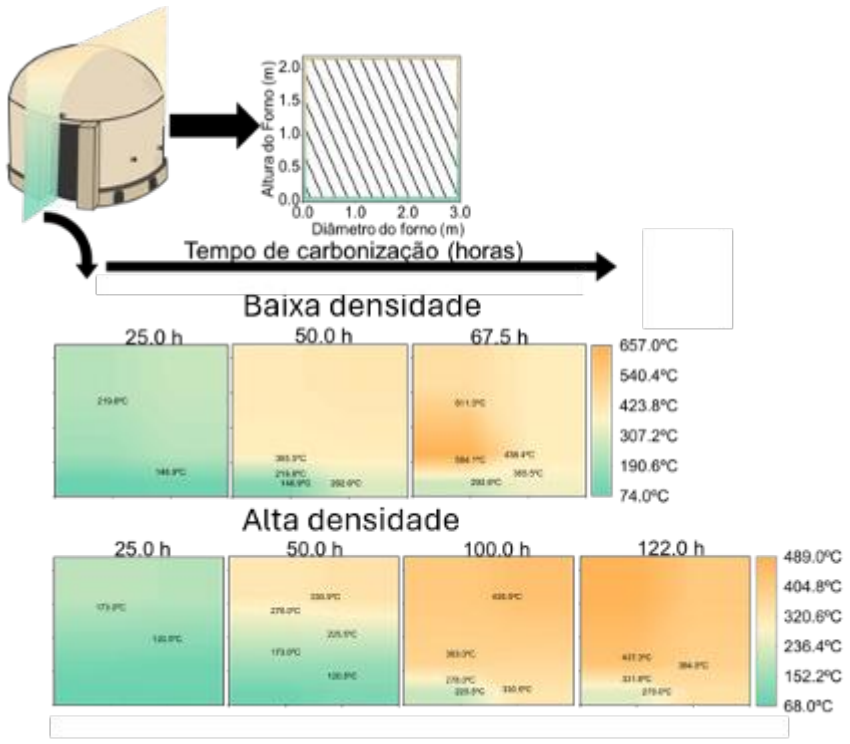


Figura 2 – Variação vertical e horizontal da temperatura de carbonização no sistema fornos-fornalha em diferentes tempos de carbonização para madeira com baixa densidade.

Essa variação de temperatura entre a base e a copa provavelmente influencia negativamente a queima de metano na fornalha, principalmente quando a copa atinge temperaturas próximas de 350 ºC. Nessa condição, ocorre a geração inicial de metano(Abou Rjeily et al., 2023). No entanto, se a base do forno ainda estiver na fase I (secagem da biomassa), haverá liberação de umidade para a fornalha, dificultando a queima do metano e aumentando o consumo de lenha. A variação das fases de carbonização entre as diferentes posições do forno é, portanto, um fator importante para a sincronia dos fornos.

A Figura 3 apresenta o balanço de carbono durante o processo de carbonização de biomassas com diferentes densidades, evidenciando a distribuição da massa de carbono entre o carvão vegetal produzido e as emissões geradas. Para a biomassa de alta densidade, observa-se uma massa inicial de carbono de 3597 kg na madeira. Aproximadamente 1969 kg retidos no carvão vegetal, enquanto 1628 kg são liberados na forma de emissões durante o processo.

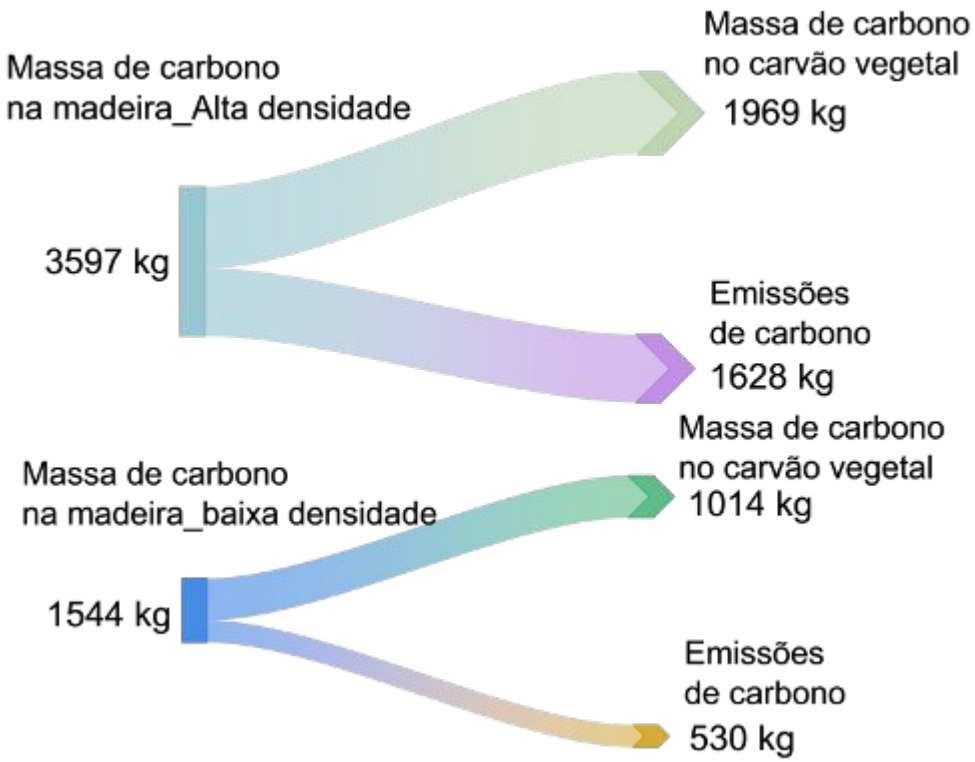


Figura 3 – Massa de carbono contida na madeira enfornada, retida do carvão e volatizada nas diferentes classes de densidade.

Para os fornos com madeira de baixa densidade, a massa inicial de carbono é inferior, totalizando 1544 kg. Deste montante, cerca de 1014 kg permanecem no carvão vegetal, enquanto 530 kg são convertidos em emissões.

4. Conclusões

O sistema fornos-fornalha apresentou elevada variação espacial da temperatura durante a carbonização, evidenciando diferenças significativas entre a base e a copa dos fornos ao longo do processo. A utilização de resíduos lenhosos de diferentes classes de densidade influenciou a quantidade de carbono processada por ciclo de carbonização. Os resultados demonstram que o monitoramento do perfil térmico constitui uma ferramenta importante para compreender a dinâmica da carbonização em Sistemas fornos-fornalha e indicam que o aprimoramento do controle operacional pode contribuir para aumentar a eficiência energética do processo e a qualidade do carvão vegetal produzido a partir de resíduos do manejo florestal sustentável da Amazônia.

5. Agradecimentos

Ao CNPq (processos 406053/2022-7 e 350017/2023-9), FAPEMIG (APQ-05431-24), Grupo Keilla, Embrapa Amazônia Oriental, UFLA e UFRA.

6. Referências bibliográficas

Abou Rjeily, M., Cazier, F., Gennequin, C., & Randrianalisoa, J. H. (2023). Detailed analysis of gas, char and bio-oil products of oak wood pyrolysis at different operating conditions. Waste and Biomass Valorization, 14(1), 325–343. https://doi.org/10.1007/s12649-022-01848-0

IBÁ. (2025). IBÁ annual report 2025. https://www.iba.org/datafiles/publicacoes/relatorios/relatorioiba2025-final.pdf

Lima, M. D. R., Patrício, E. P. S., Barros Junior, U. de O., Silva, R. de C. C., Bufalino, L., Numazawa, S., Hein, P. R. G., & Protásio, T. de P. (2021). Colorimetry as a criterion for segregation of logging wastes from sustainable forest management in the Brazilian Amazon for bioenergy. Renewable Energy, 163, 792–806. https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.08.078

Lima, M. D. R., Bufalino, L., Scatolino, M. V., Hein, P. R. G., Carneiro, A. de C. O., Trugilho, P. F., & Protásio, T. de P. (2023). Segregating Amazonia logging wastes from sustainable forest management improves carbonization in brick kilns. Renewable Energy, 211, 772–788. https://doi.org/10.1016/j.renene.2023.04.126

Numazawa, C. T. D., Numazawa, S., Pacca, S., & John, V. M. (2017). Logging residues and CO_2 of Brazilian Amazon timber: Two case studies of forest harvesting. Resources, Conservation and Recycling, 122, 280–285. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.02.016

Pena-Vergara, G., Castro, L. R., Gasparetto, C. A., & Bizzo, W. A. (2022). Energy from planted forest and its residues characterization in Brazil. Energy, 239, 122243. https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.122243

Pereira, E. G., Fauller, H., Magalhães, M., Guirardi, B., & Martins, M. A. (2022). Potential use of wood pyrolysis coproducts: A review. Environmental Progress & Sustainable Energy, 41(1), e13705. https://doi.org/10.1002/ep.13705

Protásio, T. P., Scatolino, M. V., Araújo, A. C. C., Oliveira, A. F. C. F., Figueiredo, I. C. R., Assis, M. R., & Trugilho, P. F. (2019). Assessing proximate composition, extractive concentration, and lignin quality to determine appropriate parameters for selection of superior Eucalyptus firewood. BioEnergy Research, 12(3), 626–641. https://doi.org/10.1007/s12155-019-10004-x

Santos, P. L., Lima, M. D. R., Bufalino, L., Hein, P. R. G., Silveira, E. A., Candelier, K., Trugilho, P. F., & Protásio, T. de P. (2025). Exploring the effects of slow pyrolysis temperature and species on the quality of charcoal from Amazonian woody wastes. Renewable Energy, 240, 122257. https://doi.org/10.1016/j.renene.2024.122257

Schroeder, P., Anggraeni, K., & Weber, U. (2019). The relevance of circular economy practices to the Sustainable Development Goals. Journal of Industrial Ecology, 23(1), 77–95. https://doi.org/10.1111/jiec.12732

Potencial Bioenergético de Cascas de Cupuaçu (*Theobroma grandiflorum*) e Cacau (*Theobroma cacao*) da Amazônia Ocidental

Vitória Laurinda de Souza[1]; Shara Dias de Amorim[1]; Karen Tawany de Abreu Viana[1]; Iris Izabel da Silva Cavalcante[1]; Erica Vitoria de Almeida Silva[1]; Iwlly Cristina Cavalcante Silva[1]; Patrícia Gomes Ribeiro[1]

[1]Universidade Federal do Acre

Resumo: O aproveitamento energético de resíduos agroflorestais representa uma alternativa sustentável para a diversificação da matriz energética e o fortalecimento da bioeconomia amazônica. Este estudo teve como objetivo avaliar a aptidão das cascas de cupuaçu (*Theobroma grandiflorum*) e cacau (*Theobroma cacao*) para fins energéticos, considerando suas características físicas e químicas. Os resíduos, provenientes da Cooperativa RECA, em Nova Califórnia, Rondônia, foram secos em estufa, triturados e classificados granulometricamente, sendo utilizada a fração de fundo para as análises. Foram determinados a densidade a granel, o teor de umidade, o teor de materiais voláteis, o teor de cinzas e o teor de carbono fixo, mediante procedimentos analíticos adaptados das normas ABNT NBR 6923 e ABNT NBR 8112. A casca de cacau apresentou maior densidade a granel (740,74 $kg.m^{-3}$), enquanto a casca de cupuaçu apresentou 617,28 $kg.m^{-3}$. Ambas apresentaram baixos teores de umidade, de 7,63% e 9,59%, respectivamente, e elevados teores de materiais voláteis, de 84,42% e 85,92%. A casca de cupuaçu apresentou menor teor de cinzas (4,42%) e maior teor de carbono fixo (11,16%), em comparação à casca de cacau, que apresentou 12,56% de cinzas e 1,52% de carbono fixo. Os resultados demonstram potencial energético para ambas as biomassas, com destaque para a casca de cupuaçu, que apresentou características mais favoráveis à conversão termoquímica. Dessa forma, o aproveitamento desses resíduos pode contribuir para sua valorização, agregação de valor às cadeias produtivas regionais e fortalecimento da bioeconomia amazônica.

Palavras-chave: Bioenergia; Análise Imediata; Bioeconomia Amazônica.

173. Bioenergy Potential of Cupuaçu (*Theobroma grandiflorum*) and Cocoa (*Theobroma cacao*) Shells from the Western Amazon

Abstract: The energy utilization of agroforestry residues represents a sustainable alternative for diversifying the energy matrix and strengthening the Amazonian bioeconomy. This study aimed to evaluate the suitability of cupuaçu (*Theobroma grandiflorum*) and cocoa (*Theobroma cacao*) husks for energy purposes, considering their physical and chemical characteristics. The residues, obtained from the RECA Cooperative in Nova Califórnia, Rondônia, Brazil, were oven-dried, ground, and granulometrically classified, with the bottom fraction used for the analyses. Bulk density, moisture content, volatile matter content, ash content, and fixed carbon content were determined using analytical procedures adapted from ABNT NBR 6923 and ABNT NBR 8112 standards. Cocoa husk presented a higher bulk density (740.74 $kg.m^{-3}$), whereas cupuaçu husk presented 617.28 $kg.m^{-3}$. Both biomasses exhibited low moisture contents, 7.63% and 9.59%, respectively, and high volatile matter contents, 84.42% and 85.92%. Cupuaçu husk showed a lower ash content (4.42%) and a higher fixed carbon content (11.16%) compared with cocoa husk, which presented 12.56% ash and 1.52% fixed carbon. The results indicate that both biomasses have potential for energy utilization, with cupuaçu husk standing out due to its more favorable characteristics for thermochemical conversion. The energy recovery of these residues may contribute to adding value to regional production chains and strengthening the Amazonian bioeconomy.

Keywords: Bioenergy; Proximate Analysis; Amazon bioeconomy.

a. 1. Introdução

O aumento da demanda por fontes renováveis de energia e a necessidade de reduzir as emissões de gases de efeito estufa têm impulsionado o aproveitamento sustentável da biomassa residual (Kabir *et al*., 2026). Nesse contexto, resíduos lignocelulósicos oriundos de atividades agroflorestais destacam-se pelo potencial para produção de bioenergia devido à sua ampla disponibilidade e caráter renovável (Kumar *et al*., 2024). Além disso, sua utilização contribui para a diversificação da matriz energética e para a redução dos impactos ambientais associados ao descarte inadequado desses materiais (Conte-Júnior *et al*., 2024; Díaz-González *et al*., 2022; International Energy Agency, 2024).

Na Amazônia, os Produtos Florestais Não Madeireiros (PFNMs) desempenham papel fundamental na geração de renda, na segurança alimentar e na conservação dos ecossistemas florestais, constituindo importantes componentes da bioeconomia regional (Food and Agriculture Organization, 2022; Afonso, 2022). Entre as espécies de maior

relevância destacam-se o cupuaçu (*Theobroma grandiflorum*), o cacau (*Theobroma cacao*), cujas cadeias produtivas geram expressivas quantidades de resíduos, principalmente cascas e sementes (FAO, 2022). Apesar do baixo valor agregado, esses materiais apresentam elevado potencial para conversão energética, contribuindo para a valorização da biomassa e para o fortalecimento da bioeconomia amazônica (Rosa *et al*., 2024; Colpani *et al*., 2022).

O potencial bioenergético dessas biomassas está diretamente relacionado às suas características físico-químicas, especialmente aos elevados teores de celulose, hemicelulose e lignina, que favorecem processos termoquímicos e bioquímicos de conversão energética (Mohan *et al*., 2023; Shen *et al*., 2022). Estudos conduzidos com a casca de cupuaçu demonstram elevada estabilidade térmica e potencial para produção de biochar e bio-óleo por meio da pirólise (Alves *et al*., 2022). Em relação à casca de cacau, pesquisas apontam elevado potencial para produção de biocombustíveis e biochar, reforçando sua aplicabilidade em sistemas de biorrefinaria (Díaz-González *et al*., 2022).

Nesse contexto, a caracterização energética dessas biomassas, por meio da determinação de parâmetros como teor de umidade, materiais voláteis, cinzas e carbono fixo, é fundamental para avaliar sua aptidão como combustível e subsidiar o desenvolvimento de tecnologias voltadas ao aproveitamento sustentável desses resíduos (Protásio *et al*., 2021; Parikh *et al*., 2005; Vassilev *et al*., 2010). Assim, este estudo teve como objetivo avaliar a aptidão das cascas de cupuaçu e cacau para fins energéticos, visando contribuir para a valorização sustentável da biomassa amazônica e a agregação de valor às cadeias produtivas regionais.

b. 2. Materiais e Métodos

O estudo foi conduzido no Laboratório de Anatomia da Madeira da Universidade Federal do Acre (UFAC) e na Fundação de Tecnologia do Estado do Acre (FUNTAC), ambos localizados no município de Rio Branco, Acre. Foram utilizados resíduos agroflorestais de casca de cupuaçu e casca de cacau, provenientes da Cooperativa RECA (Reflorestamento Econômico Consorciado e Adensado), situada em Nova Califórnia, distrito de Porto Velho, Rondônia.

Após a coleta, os resíduos foram submetidos à secagem em estufa a 103 ± 2 °C, até atingirem massa constante. Em seguida, as amostras foram trituradas em moinho de facas e classificadas granulometricamente por peneiramento nas malhas de 14, 28, 35 e 60 mesh e a fração de fundo, conforme ilustrado na Figura 1.



Figura 1 - Frações granulométricas da casca de cupuaçu e casca de cacau obtidas após moagem e peneiramento em 14, 28, 35 e 60 mesh e a fração de fundo.

Para a realização das determinações físico-químicas, foi utilizada exclusivamente a fração de fundo, correspondente às partículas com granulometria inferior a 0,250 mm, obtida após o peneiramento. Essa fração foi previamente homogeneizada, a fim de assegurar maior uniformidade e representatividade do material analisado, e posteriormente acondicionada em recipientes hermeticamente fechados. As amostras foram mantidas em ambiente seco e protegido da umidade até a realização das análises, visando preservar suas características físico-químicas e evitar alterações decorrentes da absorção de umidade do ambiente.

Para cada biomassa, o material correspondente à casca de cupuaçu e à casca de cacau foi preparado e homogeneizado separadamente, constituindo uma amostra composta para cada tipo de resíduo. A partir de cada amostra composta, foram retiradas duas alíquotas para a realização das determinações físico-químicas, caracterizando duplicatas analíticas. Os resultados obtidos foram expressos pela média aritmética das duas determinações realizadas para cada biomassa. As duplicatas foram empregadas para avaliar a repetibilidade dos procedimentos analíticos, não sendo consideradas repetições experimentais independentes, uma vez que foram obtidas a partir da mesma amostra composta.

A análise imediata das biomassas foi realizada mediante adaptação dos procedimentos estabelecidos pelas normas ABNT NBR 6923 e ABNT NBR 8112, originalmente destinadas à caracterização de carvão vegetal. A adaptação dos procedimentos foi realizada considerando as características específicas das amostras lignocelulósicas *in natura* e a finalidade de sua caracterização físico-química.

2.1 Determinação da densidade a granel

A densidade a granel foi determinada conforme a ABNT NBR 6923, utilizando uma caixa de dimensões conhecidas (13,5 × 10 × 3 cm) e volume previamente calculado. A biomassa foi acondicionada sem compactação, simulando as condições naturais de armazenamento. A densidade foi obtida pela relação entre a massa da biomassa e o volume ocupado pela amostra, conforme a Equação 1:

$$\rho_b = m . V^{-1}$$

em que: ρ_b= densidade a granel, em kg.m^{-3}; m = massa da biomassa, em kg; V = volume ocupado pela biomassa, em m^3.

2.2 Determinação do teor de umidade

O teor de umidade foi determinado em duplicata, conforme a norma ABNT NBR 8112, a partir da secagem de amostras de 12,75 e 30,42g em estufa a 105 ± 1 °C por 3 horas. Após resfriamento em dessecador, as amostras foram pesadas em balança analítica. O teor de umidade foi calculado pela Equação 2:

$$U\ (\%) = [(M_i - M_s) . M_i^{-1}] \times 100$$

em que: U = teor de umidade; M_i = massa inicial da amostra antes da secagem, em g; M_s = massa seca da amostra após secagem em estufa, em g.

2.3 Determinação do teor de materiais voláteis

O teor de materiais voláteis foi determinado de acordo com a ABNT NBR 8112. Aproximadamente 1,0 g de biomassa previamente seca foi acondicionada em cadinho com tampa e submetida ao aquecimento em mufla previamente estabilizada a 950 ± 5 °C.

Inicialmente, o cadinho permaneceu por 3 minutos sobre a tampa da mufla, permitindo o aquecimento gradual da amostra, e, em seguida, foi introduzido no interior da mufla, onde permaneceu por 7 minutos, totalizando 10 minutos de ensaio. Após o aquecimento, os cadinhos foram resfriados em dessecador até atingirem temperatura ambiente e, posteriormente, pesados

em balança analítica. O teor de materiais voláteis foi determinado pela diferença de massa, sendo calculado conforme a Equação 3:

$$MV\,(\%) = [(M_s - M_f)\,.\,M_s^{-1}] \times 100$$

em que: MV = teor de materiais voláteis; M_s = massa inicial da amostra seca em estufa, em g; M_f = massa final da amostra após mufla, em g.

2.4 Determinação do teor de cinzas

O teor de cinzas foi determinado conforme a ABNT NBR 8112, utilizando aproximadamente 1,0 g de biomassa seca submetida à calcinação em mufla a 750 ± 5 °C durante 6 horas. Após resfriamento em dessecador, o teor de cinzas foi calculado pela Equação 4:

$$CZ\,(\%) = (M_r\,.\,M_s^{-1}) \times 100$$

em que: CZ = Teor de cinzas; M_s = Massa da amostra seca em estufa, em g; M_r = massa do resíduo mineral (cinzas), em g.

2.5 Determinação do teor de carbono fixo

O teor de carbono fixo foi determinado indiretamente, conforme a ABNT NBR 8112:1986, sendo calculado por diferença em relação aos teores de materiais voláteis e cinzas, conforme a Equação 5:

$$CF\,(\%) = 100 - (CZ + MV)$$

em que: CF = teor de carbono fixo; CZ = teor de cinzas no carvão vegetal (%); MV = teor de materiais voláteis (%).

c. 3. Resultados e discussão

Os resultados obtidos permitiram caracterizar as propriedades físicas e energéticas das biomassas avaliadas, evidenciando seu potencial para utilização como biocombustíveis sólidos. Inicialmente, foi determinada a densidade a granel, parâmetro importante para o transporte, armazenamento e processamento da biomassa (Tabela 1).

Tabela 1 - Densidade a granel das biomassas avaliadas

Biomassa	Massa (kg)	Volume (m^3)	Densidade a granel ($kg\ m^{-3}$)

Casca de cupuaçu	0,25	0,000405	617,28
Casca de cacau	0,3	0,000405	740,74

Conforme observado na Tabela 1, a casca de cacau apresentou maior densidade a granel (740,74 kg.m^{-3}) em relação à casca de cupuaçu (617,28 kg.m^{-3}), indicando maior quantidade de biomassa por unidade de volume. Essa característica favorece o transporte e o armazenamento, reduzindo custos logísticos e aumentando a densidade energética volumétrica. Além disso, biomassas mais densas apresentam maior potencial para produção de briquetes e pellets, ampliando sua viabilidade como combustível sólido (Brand, 2010; Protásio *et al*., 2013). A análise imediata das biomassas contemplou os teores de umidade, materiais voláteis, cinzas e carbono fixo (Tabela 2).

Tabela 2 - Resultados médios e desvio padrão da análise imediata da casca de cupuaçu e da casca de cacau em base seca

Parâmetro	Casca de cupuaçu (%)	Casca de cacau (%)
Umidade (U%)	7,63 ± 0,29	9,59 ± 0,07
Materiais voláteis (MV%)	84,42 ± 6,64	85,92 ± 4,10
Cinzas (CZ%)	4,42 ± 1,59	12,56 ± 1,77
Carbono fixo (CF%)	11,16 ± 5,05	1,52 ± 5,87

Os baixos teores de umidade observados na casca de cupuaçu (7,63 ± 0,29%) e na casca de cacau (9,59 ± 0,07%) indicam condições favoráveis ao aproveitamento energético dessas biomassas, uma vez que reduzem o consumo de energia para evaporação da água durante a combustão e aumentam a eficiência térmica do combustível (Brand, 2010). Valores inferiores a 15% são considerados adequados para processos de conversão termoquímica, como combustão, pirólise e gaseificação, favorecendo o desempenho energético da biomassa (Shah *et al*., 2023).

Os teores de materiais voláteis foram elevados para ambas as biomassas, correspondendo a 84,42 ± 6,64% para a casca de cupuaçu e 85,92 ± 4,10% para a casca de cacau. Esses resultados indicam elevada reatividade térmica, facilidade de ignição e rápida liberação de compostos gasosos durante a combustão, características desejáveis para processos termoquímicos (Mohan *et al*., 2023). Apesar da variabilidade observada entre as repetições, os valores permanecem dentro da faixa normalmente relatada para resíduos lignocelulósicos. Estudos realizados com resíduos de cupuaçu também evidenciaram

potencial para aplicações energéticas, especialmente em processos de pirólise para obtenção de bio-óleo, gases combustíveis e biocarvão (Alves *et al*., 2022).

A casca de cupuaçu apresentou menor teor de cinzas (4,42 ± 1,59%) quando comparada à casca de cacau (12,56 ± 1,77%), indicando maior potencial energético. Biomassas com menores teores de cinzas tendem a apresentar menor formação de escórias, incrustações e corrosão em equipamentos térmicos, contribuindo para maior eficiência operacional e redução dos custos de manutenção (Vassilev *et al*., 2013; Brand, 2010). O elevado teor de cinzas da casca de cacau também foi observado por Brito *et al*. (2020), que atribuíram esse comportamento à maior concentração de minerais presentes nesse resíduo agroindustrial.

Em relação ao carbono fixo, a casca de cupuaçu apresentou valor médio de 11,16 ± 5,05%, superior ao observado para a casca de cacau (1,52 ± 5,87%). Maiores teores de carbono fixo estão associados ao aumento do rendimento gravimétrico durante a carbonização e à produção de biocarvão com maior estabilidade térmica e maior poder calorífico, características importantes para aplicações energéticas (Protásio *et al*., 2013).

d. 4. Conclusões

As cascas de cupuaçu e cacau apresentaram características físico-químicas que evidenciam potencial para aproveitamento energético como biocombustíveis sólidos. A casca de cacau apresentou maior densidade a granel (740,74 $kg.m^{-3}$), enquanto a casca de cupuaçu apresentou menor teor de cinzas (4,42%) e maior teor de carbono fixo (11,16%). Ambas apresentaram baixos teores de umidade e elevados teores de materiais voláteis, características favoráveis à conversão termoquímica. Entretanto, o maior teor de cinzas da casca de cacau (12,56%) pode limitar seu desempenho em determinadas aplicações térmicas. Dessa forma, a casca de cupuaçu apresentou características energéticas mais favoráveis entre os resíduos avaliados. Os resultados reforçam a viabilidade do aproveitamento desses resíduos para agregar valor às cadeias produtivas e contribuir para a bioeconomia amazônica.

e. 5. Agradecimentos

Os autores agradecem à Universidade Federal do Acre (UFAC), ao Laboratório de Tecnologia da Madeira da UFAC e à Fundação de Tecnologia do Estado do Acre (FUNTAC), especialmente ao Laboratório de Anatomia da Madeira da UFAC, pelo apoio institucional e técnico ao desenvolvimento desta pesquisa. Agradecem ainda aos professores e orientadores pelas contribuições científicas e, em especial, à técnica de laboratório Suelen Borges pelo apoio prestado.

f. 6. Referências bibliográficas

Alves, J. L. F., Silva, J. C. G., Mumbach, G. D., Domenico, M. D., Bolzan, A., Machado, R. A. F., & Marangoni, C. (2022). Evaluating the bioenergy potential of cupuassu shell through pyrolysis kinetics, thermodynamic parameters of activation, and evolved gas analysis with TG/FTIR technique. Thermochimica Acta, 711, 179187. https://doi.org/10.1016/j.tca.2022.179187.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. (1986). ABNT NBR 8112: Carvão vegetal - Análise imediata. ABNT.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. (s.d.). ABNT NBR 6923: Carvão vegetal - Determinação da densidade a granel. ABNT.

Brand, M. A. (2010). Energia da biomassa florestal. Interciência.

Brito, E. S., Araújo, M. C. P., Alves, R. E., Carkeet, C., Clevidence, B. A., & Novotny, J. A. (2020). Caracterização físico-química e aproveitamento de resíduos agroindustriais de cacau. Ciência e Tecnologia de Alimentos, 40(Suppl. 1). https://doi.org/10.1590/fst.38719.

Colpani, D., Santos, V. O., Araujo, R. O., Lima, V. M. R., Tenório, J. A. S., Coleti, J., Chaar, J. S., & de Souza, L. K. C. (2022). Bioenergy potential analysis of Brazil nut biomass residues through pyrolysis: Gas emission, kinetics, and thermodynamic parameters. Cleaner Chemical Engineering, 1, 100002. https://doi.org/10.1016/j.clce.2022.100002.

Díaz-González, A., Perez Luna, M. Y., Ramírez Morales, E., Saldaña-Trinidad, S., Rojas Blanco, L., de la Cruz-Arreola, S., Pérez-Sariñana, B. Y., & Robles-Ocampo, J. B. (2022). Assessment of the pretreatments and bioconversion of lignocellulosic biomass recovered from the husk of the cocoa pod. Energies, 15(10), 3544. https://doi.org/10.3390/en15103544.

Faria, D. J., Carvalho, A. P. A., & Conte-Junior, C. A. (2024). Fermentation of biomass and residues from Brazilian agriculture for 2G bioethanol production. ACS Omega, 9(39), 40298–40314. https://doi.org/10.1021/acsomega.4c06579.

Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2022). The state of the world's forests 2022: Forest pathways for green recovery and building inclusive, resilient and sustainable economies. FAO.

International Energy Agency. (2024). Renewables 2024: Analysis and forecast to 2030. IEA.

Kabir, M., López-Cortés, I., Ferrer-Gisbert, C., Moposita-Vasquez, D.-D., & VelázquezMartí, B. (2026). From upstream assessment to downstream energy conversion: A

systematic review of advances in biomass residue utilization techniques. Biomass, 6(2), 24. https://doi.org/10.3390/biomass6020024.

Kumar, A., Samadder, S. R., & Gupta, S. (2024). Lignocellulosic biomass for sustainable bioenergy production: A review on conversion pathways and applications. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 189, 113925. https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113925

Mohan, D., Pittman, C. U., & Steele, P. H. (2006). Pyrolysis of wood/biomass for bio-oil: A critical review. Energy & Fuels, 20(3), 848–889. https://doi.org/10.1021/ef0502397.

Parikh, J., Channiwala, S. A., & Ghosal, G. K. (2005). A correlation for calculating elemental composition from proximate analysis of biomass materials. Fuel, 84(5), 487– 494. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2004.10.010.

Protásio, T. P., Bufalino, L., Tonoli, G. H. D., Guimarães Júnior, M., Trugilho, P. F., & Mendes, L. M. (2013). Brazilian lignocellulosic wastes for bioenergy production: Characterization and comparison with fossil fuels. BioResources, 8(1), 1166–1185.

Protásio, T. P., Guimarães Júnior, M., & Mendes, R. F. (2021). Biomass characterization for energy purposes: A review of methods and applications. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 145, 111081. https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111081.

Rosa, J. S., Moreira, P. I. O., Carvalho, A. V., & Freitas-Silva, O. (2024). Cupuassu fruit, a non-timber forest product in sustainable bioeconomy of the Amazon—A mini review. Processes, 12(7), 1353. https://doi.org/10.3390/pr12071353.

Shah, M. A., Hayder, G., Kumar, R., Kumar, V., Ahamad, T., Kalam, M. A., Soudagar, M. E. M., Shamshuddin, S. Z. M., & Mubarak, N. M. (2023). Development of sustainable biomass residues for biofuels applications. Scientific Reports, 13, 14248. https://doi.org/10.1038/s41598-023-41446-1.

Shen, D. K., Gu, S., & Luo, K. H. (2022). The role of lignin, cellulose and hemicellulose during biomass pyrolysis. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 163, 105434. https://doi.org/10.1016/j.jaap.2022.105434.

Vassilev, S. V., Baxter, D., Andersen, L. K., & Vassileva, C. G. (2010). An overview of the chemical composition of biomass. Fuel, 89(5), 913–933. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2009.10.022.

Vassilev, S. V., Baxter, D., Vassileva, C. G., & Morgan, T. J. (2013). An overview of the composition and application of biomass ash. Part 1: Phase-mineral and chemical

composition and classification. Fuel, 105, 40–76. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2012.09.041.

POTENCIAL DA BIOMASSA DO ESTIPE DE MACAÚBA (*Acrocomia aculeata*) PARA APLICAÇÕES ENERGÉTICAS.

Saulo Affonso Hygino[1]; Amanda Ladeira Carvalho[1]; Ana Márcia Macedo Ladeira Carvalho[1]; Angélica de Cássia Oliveira Carneiro[1]; Hagnes Belta Lelles Barboza [1]; Kezia Ellen Souza Bomfim[1]; Geisianne de Carvalho Almeida[1], Isabelle Genova[2].

[1] Universidade Federal de Viçosa; [2] Universidade Estadual do Mato Grosso do Sul.

Resumo: A busca por soluções sustentáveis e a necessidade de otimizar o uso de recursos naturais têm impulsionado pesquisas por alternativas inovadoras na gestão de resíduos agroflorestais. Este trabalho avaliou o potencial energético do estipe de macaúba (*Acrocomia aculeata*). Para a caracterização da biomassa, determinaram-se a densidade a granel, a composição química imediata, o poder calorífico superior (PCS) e a densidade energética. O material apresentou elevado teor de voláteis, baixas cinzas e PCS comparável ao bagaço de cana-de-açúcar. Embora a baixa densidade a granel limite a logística, a densidade energética confirma seu alto potencial para conversão termoquímica, exigindo para esta, processos associado a densificação. Conclui-se que o estipe de macaúba constitui uma alternativa promissora para o aproveitamento integral da planta e fortalecimento da sustentabilidade da cadeia produtiva.

Palavras-chave: Bioenergia; Energia da biomassa; Resíduos Agroflorestais.

POTENTIAL OF MACAÚBA STIPPE BIOMASS (*Acrocomia aculeata*) FOR ENERGY PURPOSES.

Abstract: The search for sustainable solutions and the need to optimize natural resource utilization have driven research into innovative alternatives for agroforestry waste management. This study evaluated the energy potential of macauba (*Acrocomia aculeata*) stipe. For biomass characterization, bulk density, proximate composition, higher heating value (HHV), and energy density were determined. The material exhibited high volatile matter content, low ash content, and an HHV comparable to sugarcane bagasse. Although its low bulk density limits logistics, the energy density confirms its high potential for thermochemical conversion, which requires associated densification processes. In conclusion, macauba stipe represents a promising alternative for full plant utilization and for strengthening the sustainability of the production chain.

Keywords: Bioenergy; Biomass energy; Agroforestry residues.

1. Introdução.

A palmeira de macaúba (*Acrocomia aculeata*), nativa de regiões tropicais e subtropicais das Américas, destaca-se pela produção de frutos ricos em óleo, com elevado potencial para a produção de biocombustíveis e insumos bioquímicos de alto valor agregado. Além de seu potencial industrial, a macaúba destaca-se pelo uso em sistemas agroflorestais sustentáveis, especialmente em áreas degradadas, onde pode contribuir para a restauração ecológica e a diversificação produtiva. O crescente interesse em seu cultivo no Brasil reflete a convergência entre demandas ambientais, energéticas e econômicas, impulsionando pesquisas e investimentos voltados à sua domesticação e expansão comercial (Lanes et al., 2024). Minas Gerais é o estado com maior concentração da planta da macaúba, tal crescimento do plantio foi influenciado pela criação da Lei Pró-macaúba, vinculada ao Programa Nacional do Biodiesel do Governo Federal impulsionando a formação de cadeias produtivas baseadas em sistemas de monocultivo e agroflorestais (ABREU et al., 2006).

O extrativismo da macaúba envolve práticas tradicionais que fazem parte do cotidiano de diversas comunidades, em áreas rurais e periurbanas. Contudo, processos de mecanização e aproveitamento em escala industrial ainda exige adaptações técnicas que considerem, as condições ambientais e a viabilidade econômica e social (CASTRO et al., 2024).

Diante do cenário energético atual e das exigências por soluções mais sustentáveis, a macaúba consolida-se como uma alternativa estratégica e promissora para a produção de biocombustíveis no Brasil. Sua elevada produtividade, adaptabilidade a solos pobres e baixo impacto ambiental a posicionam como uma opção viável frente às limitações de culturas tradicionais, como a cana-de-açúcar.

O principal objetivo do cultivo da macaúba é a extração de óleos da polpa e da amêndoa dos seus frutos. Estudos recentes têm demonstrado que os resíduos provenientes do processamento desses frutos, como cascas, endocarpo, torta da polpa e da amêndoa, apresentam potencial para diversas aplicações industriais e agrícolas (Vieira e Medeiros et al., 2020; Ampese et al., 2023.). No entanto, outros resíduos da cultura, como folhas, cachos, espata e estipe, permanecem pouco explorados e carecem de estudos que ampliem suas possibilidades de aproveitamento.

Embora esses resíduos gerados no campo ainda não representem um problema ambiental significativo, sua gestão poderá se tornar um desafio à medida que as áreas cultivadas e a produção da macaúba se expandirem. No caso específico do estipe (tronco), a geração de

resíduos ocorre principalmente em situações de morte da planta ou de renovação dos plantios, tornando sua disponibilidade atualmente limitada.

Para que a cadeia produtiva da macaúba se torne ainda mais sustentável, é necessário considerar o aproveitamento integral da planta, incluindo o estipe. Embora, ainda não exista consenso sobre a vida útil produtiva de plantios comerciais, a espécie pode apresentar longevidade produtiva superior a cem anos (Motoike e Hilger, 2024). Dessa forma, o estipe ainda não constitui um resíduo gerado continuamente, por estar associado, em geral, ao encerramento do ciclo produtivo da planta.

Contudo, caso seja necessária a renovação precoce de plantações comerciais, seja em razão de baixo rendimento, problemas fitossanitários ou outros fatores técnicos e econômicos, haverá a geração de uma quantidade expressiva de biomassa proveniente do estipe. Diante desse cenário, torna-se importante investigar alternativas tecnológicas e rentáveis para o aproveitamento desse material, agregando valor ao resíduo e fortalecendo a sustentabilidade da cadeia produtiva da espécie.

Embora haja avanços no desenvolvimento de pesquisas e no interesse do setor privado, a consolidação da macaúba como uma alternativa estratégica para a bioeconomia brasileira depende da adoção de inovações tecnológicas que promovam ganhos em produtividade, sustentabilidade e viabilidade econômica. Diante desse cenário, surge a necessidade de compreender de que forma a inovação pode alavancar o desenvolvimento sustentável e competitivo dessa cadeia (CORREIA et al., 2025). A fim de viabilizar aplicações sustentáveis e eficientes dessa biomassa lignocelulósica, é fundamental compreender suas propriedades morfológicas e físico-químicas e energéticas. No entanto, a literatura científica ainda apresenta escassez de estudos específicos voltados à caracterização da estipe da macaúba.

Por essa razão, este estudo teve como objetivo caracterizar física, química e energeticamente a biomassa do estipe da macaúba, visando avaliar seu potencial para a geração de energia. Adicionalmente, foi realizada uma análise comparativa com o bagaço de cana-de-açúcar, biomassa amplamente disponível e consolidada como fonte de energia em diversos processos industriais.

2. Material e Métodos.

Este trabalho foi realizado em parceria com a empresa S.OLEUM localizada em Viçosa, Minas Gerais. Foram utilizadas quatro palmeiras de *Acrocomia aculeata*, sendo duas com dez

anos e duas com dezesseis anos de idade. Neste trabalho foi avaliada exclusivamente a biomassa do estipe, sendo os demais componentes da planta removidos manualmente.

As estipes foram fragmentadas com motosserra e posteriormente processadas em moinho de facas. Após a moagem, o material foi homogeneizado pelo método de quarteamento, afim de garantir a mistura por completo de todas as quatro estipes disponíveis. A secagem fora realizada em estufa até massa constante para evitar sua deterioração do próprio intemperismo local.

A determinação do teor de umidade, em base seca, será feita de acordo com a norma EN 14774-2 (DIN, 2009), na qual parte da biomassa, já quarteada, fora submetida à secagem em estufa a 105 ± 2 °C até massa constante. o teor de umidade é obtido em porcentagem pela seguinte Equação (1):

$$Teor\,de\,Umidade = 100 \times \frac{MS}{MI} \quad (1)$$

Onde:

MS = Massa Seca.

MI = Massa Inicial.

Usando do material quarteado e o peneirando com granulometria entre 40 e 60 mesh optemos a porção necessária para realizar a composição química imediata segundo a norma ASTM D1762-84 (ASTM, 2013), deste obtemos o teor de materiais voláteis, cinzas e carbono fixo. O Poder calorífico superior é obtido seguindo a norma TAPPI um-250 utilizando bomba colorimétrica. IKA300®. A densidade à granel foi obtida de acordo com a norma EN 15103 (DIN, 2010b) onde pesamos parte da biomassa em caixotes de volume conhecido. A densidade energética foi calculada de acordo com a Equação (2) abaixo:

$$DE = PCS \times DA \quad (2)$$

Onde:

DE: Densidade energética ($MJ.m^{-3}$)

PCS: Poder calorífico superior ($MJ.kg^{-1}$)

DA: Densidade à granel ($kg.m^{-3}$)

Todas as análises foram realizadas em triplicata, exceto a densidade à granel, determinada em cinco repetições. Os resultados foram submetidos ao teste de Tukey ($p \leq 0,05$) para comparação das médias.

3. Resultados e discussão.

As propriedades físico-químicas do caule de macaúba estão apresentadas na Tabela 1 .

Tabela 1 – Propriedades físico-químicas do estipe de Macaúba.

Parâmetros	**Valores**	**Desvio padrão**
Teor de Umidade. (%)	12,5	0,31
Teor de Materiais Voláteis (%)	73,75	0,09
Carbono Fixo (%)	25,09	0,07
Cinzas (%)	1,16	0,08
Densidade a granel ($kg.m^{-3}$**)**	165,31	3,6
PCS ($MJ.kg^{-1}$**)**	19,84	0,18
Densidade energética ($MJ.m^{-3}$**)**	3279,75	0,64

Os resultados apresentados na Tabela 1 demonstram que a biomassa do estipe de macaúba apresenta características promissoras para o aproveitamento energético. O teor de umidade de 12,5% encontra-se dentro da faixa recomendada para processos de combustão, uma vez que elevados conteúdos de água reduzem a eficiência térmica ao consumir parte da energia liberada na evaporação da umidade presente no combustível (MCKENDRY, 2002). Dessa forma, baixos teores de umidade favorecem a ignição, aumentam a estabilidade da combustão e proporcionam maior rendimento energético do processo, além de reduzirem custos associados ao transporte e armazenamento da biomassa (Vershinina et al. 2022)

A composição química imediata do estipe de macaúba evidencia características favoráveis ao seu aproveitamento energético. O teor de materiais voláteis (73,75%) indica elevada reatividade térmica da biomassa, favorecendo a ignição e a rápida liberação de gases combustíveis durante processos de combustão e gaseificação (McKendry, 2002). Biomassas com elevados teores de voláteis apresentam maior facilidade de ignição e combustão mais rápida, características desejáveis em processos de conversão termoquímica destinados à geração de energia.

O teor de carbono fixo (25,09%) complementa esse comportamento, representando a fração sólida que permanece após a liberação dos compostos voláteis e que é responsável pela manutenção da combustão por períodos mais prolongados. Além de contribuir para a estabilidade da queima, essa fração de carbono constitui um importante indicativo do potencial da biomassa para produção de biochar por pirólise, uma vez que o aumento da temperatura de

carbonização promove a concentração de carbono no material, originando um produto com maior estabilidade química e elevado potencial de aplicação energética e ambiental como condicionante de solos (Vershinina et al. 2022).

O teor de cinzas do estipe de macaúba foi de 1,16%, valor considerado baixo para biomassas destinadas à geração de energia. O conteúdo de cinzas é um dos principais parâmetros utilizados para avaliar a qualidade de combustíveis sólidos, uma vez que representa a fração de metais remanescente após a combustão. Elevados teores de cinzas podem reduzir a eficiência energética do processo, diminuir o poder calorífico e favorecer a formação de incrustações, escórias e processos corrosivos em caldeiras, tabulações e outros equipamentos de conversão termoquímica (McKendry, 2002). Assim sendo, o baixo conteúdo de cinzas observado para o estipe de macaúba representa uma característica desejável, contribuindo para maior eficiência operacional e menor necessidade de manutenção dos sistemas de geração de energia.

Quando comparado ao bagaço de cana-de-açúcar, que apresenta aproximadamente 2,3% de cinzas (Almeida et al., 2024), observa-se que o estipe de macaúba possui menor conteúdo de material inorgânico. Em conjunto, os elevados teores de materiais voláteis, o conteúdo moderado de carbono fixo e o baixo teor de cinzas demonstram que essa biomassa reúne características compatíveis com outras biomassas lignocelulósicas empregadas para fins energéticos, reforçando seu potencial como matéria-prima para processos de conversão termoquímica.

O poder calorífico é influenciado pela composição química da biomassa, sendo diretamente relacionado aos teores de carbono fixo e materiais voláteis e inversamente afetado pelos teores de cinzas e de umidade (Njimou et al, 2026). Dessa forma, a combinação dos resultados obtidos para o estipe de macaúba indica uma biomassa com características favoráveis à conversão energética.

O poder calorífico superior de 19,84 MJ kg^{-1} demonstra que o estipe da macaúba apresenta potencial para aplicações energéticas, apresentando desempenho semelhante ao de biomassas amplamente empregadas na geração de energia, como o bagaço de cana-de-açúcar, cujo poder calorífico é de aproximadamente 18,3 MJ kg^{-1} (Silva et al., 2024). Esse resultado reforça a viabilidade do estipe como matéria-prima para processos de combustão, gaseificação e pirólise, ampliando as possibilidades de aproveitamento desse resíduo na cadeia produtiva da macaúba.

No entanto, a densidade a granel de 165,31 $kg.m^{-3}$ caracteriza o estipe como uma biomassa de baixa densidade, condição que pode limitar sua eficiência logística devido ao maior volume ocupado durante o armazenamento e o transporte. Consequentemente, a densidade energética, calculada em 3279,75 $MJ.m^{-3}$, também é influenciada por essa característica física. Entretanto, esse aspecto pode ser significativamente melhorado por meio de processos de densificação, como briquetagem e peletização, que aumentam a quantidade de energia armazenada por unidade de volume, reduzem custos de transporte e facilitam o manuseio do combustível.

Além do aproveitamento direto para geração de energia, o estipe de macaúba apresenta potencial para conversão termoquímica visando à produção de biochar, material que pode ser empregado como condicionador de solos, agente para sequestro de carbono e adsorvente de contaminantes (Guo, et al.,2020; Luo, et al., 2023; DeLuca, et al., 2024). Dessa forma, o aproveitamento dessa biomassa amplia o valor agregado do resíduo e contribui para estratégias de bioeconomia de baixo carbono e economia circular.

10. Conclusões

De modo geral, a estipe de macaúba apresenta potencial para aproveitamento energético, devido ao seu alto teor de voláteis, teor de carbono fixo e baixo teor de cinzas, além de poder calorífico superior compatível com biomassas já utilizadas para geração de energia. Entretanto, sua baixa densidade a granel pode representar uma limitação logística, especialmente quanto ao transporte e armazenamento. Além disso, processos de densificação, como briquetagem e peletização, podem contribuir para aumentar a densidade energética volumétrica e favorecer sua utilização como biocombustível sólido.

Com os resultados obtidos neste estudo demonstram que o estipe da macaúba, uma biomassa ainda pouco explorada, apresenta características favoráveis ao aproveitamento energético, constituindo uma alternativa para a valorização desse material e contribuindo para o uso integral da planta e para a sustentabilidade da cadeia produtiva da macaúba.

11. Referências bibliográficas

Abreu, F. R. e, Vieira, J. N. S., & Ramos, S. Y. (2006). Programa Nacional para a Produção e Uso do Biodiesel: diretrizes, desafios e perspectivas. *Revista de Política Agrícola*, *15*(3), 5–18.

de Almeida, S. G. C., Fogarin, H. M., Costa, M. A. M., & Dussán, K. J. (2024). Study of sugarcane bagasse/straw combustion and its atmospheric emissions using a pilot-burner. *Environmental Science and Pollution Research*, *31*(12), 17706-17717.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM D1762 – 84: Standard Test Method for Chemical Analysis of Wood Charcoal. Philadelphia, USA, 2013.

Ampese, L. C., Tvrzská de Gouvêa, M., Buller, L. S., Sganzerla, W. G., de Moraes Gomes Rosa, M. T., & Forster-Carneiro, T. (2024). Using thermodynamic models for bioenergy recovery and generation assessment: a case study with açaí and macaúba by-products. *Biomass Conversion and Biorefinery*, *14*(15), 17177-17192.

CASTRO, Rafael Peron; SCINOCCA, Francisco; SANTOS, Fabio Lucio. Extrativismo da macaúba em Jaboticatubas, Minas Gerais. [S.l.]: [s.n.], 2024.

Correia, E. A. S., Feliciano, T. D., Dezani, A. A., & Dezani, H. (2025). *Bioenergia, inovação e sustentabilidade: O papel estratégico da macaúba no Brasil*. Faculdade de Tecnologia de São José do Rio Preto.

DeLuca, T. H., Gundale, M., MacKenzie, M. D., Gao, S., & Jones, D. (2024). Biochar effects on soil nutrient transformations. In *Biochar for environmental management*. Taylor & Francis.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION (CEN). EN 14774-1: Solid biofuels — Determination of moisture content — Oven dry method — Part 1: Total moisture — Reference method. Brussels: CEN, 2010.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION (CEN). EN 15103: Solid biofuels — Determination of bulk density. Brussels: CEN, 2010.

Guo, M., Song, W., & Tian, J. (2020). Biochar-facilitated soil remediation: mechanisms and efficacy variations. *Frontiers in Environmental Science*, *8*, 521512.

LANES, E.; FAVARO, S. P.; KUKI, K. N.; MOTOIKE, S. Y. Origem, dispersão, história e estado da arte da domesticação. In: MOTOIKE, S. Y.; HILGER, T. (org.). Macaúba: do plantio à colheita. São Paulo: Oficina de Texto, 2024. p. 288.

LUO, L., WANG, J., LV, J., LIU, Z., SUN, T., YANG, Y., & ZHU, Y. G. Carbon sequestration strategies in soil using biochar: advances, challenges, and opportunities. Environmental Science & Technology, 2023.

MCKENDRY, P. Energy production from biomass (part 1): overview of biomass (part 1): overview of biomass. Bioresource Technology, v. 83, n. 1, p. 1-10, 2002.

MOTOIKE, S. Y. & HILGER, T. Macaúba: do plantio à colheita. Oficina de Texto, 2024.

NJIMOU, J. R., DANGA, G. M. N., BALIKE, M., HAMAN, Z., NGOUYAMNSA-GHENMI, E. M., NJIKE, R. M. T., ... & ELAMBO, N. G. (2026). Optimizing calorific value of energy briquettes from agricultural biomass: a novel approach utilizing maize and cassava residues. Waste Disposal & Sustainable Energy, 1-15.

SILVA, G. C.; SOUZA, M. M.; SANTOS, J. R.; et al. Caracterização energética de biomassas agrícolas e florestais no estado de Pernambuco. *Ciência Florestal*, v. 34, n. 3, 2024. https://doi.org/10.5902/1980509873324

VERSHININA, K., Nyashina, G., & Strizhak, P. (2022). Combustion, pyrolysis, and gasification of waste-derived fuel slurries, low-grade liquids, and high-moisture waste. Applied Sciences, 12(3), 1039.

VIEIRA E MEDEIROS, R. A. C.; CASTRO, A. A. D.; BRANDÃO, M. .; OLIVEIRA, D. A. D., Atividades científicas e tecnológicas desenvolvidas com *Arecaceae*. Revista Brasileira de Gestão Ambiental e Sustentabilidade, 2020.

TAPPI- Technical Association of the Pulp and Paper Industry T 250 cm-85 – Sampling and testing wood pulp shipments for moisture. Atlanta: Technical Association of the Pulp and Paper Industry, 1985.

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Potencial energético de biomassa residual amazônica em processos de combustão direta

Mariane Silva[1]; Maria Cecíllia Ramos Araujo Veloso[2]; Adriano Reis Prazeres Mascarenhas[3]; Niro Higuchi[4]; Thiago Cardoso Silva[3]; Fábio Henrique Della Justina do Carmo[3]; Beatriz Aparecida Nunes Simão[3]; Thiago de Paula Protásio[1]

[1] Universidade Federal de Lavras - UFLA
[2] Universidade Federal de São Carlos - UFSCAR
[3] Universidade Federal de Rondônia, campus Rolim de Moura - UNIR
[4] Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia - INPA

Resumo: Caracterizou-se a biomassa residual de Faveira-Ferro (*Dinizia excelsa*) e Roxinho (*Peltogyne paniculata*) para avaliar seu potencial energético em combustão direta, visando aproveitar volumosos resíduos de serrarias amazônicas e atender localidades isoladas que dependem de termelétricas a fósseis. A análise química imediata revelou teores de voláteis de 72% para ambas, com vantagem para o Roxinho (72,77%), enquanto a Faveira-Ferro destacou-se no carbono fixo (27,08%) e em cinzas significativamente menores (0,59% contra 1,65%). A comparação com dados de literatura do Eucalipto mostrou que as biomassas amazônicas são competitivas, com maior carbono fixo e menor voláteis, garantindo maior estabilidade na combustão. Os resultados indicam características químicas satisfatórias para geração limpa, sendo alternativa viável para o aproveitamento dos resíduos de serrarias na região.

Palavras-chave: Energia sustentável; Sistemas isolados; Aproveitamento de resíduos.

Valorization of Amazonian Residual Biomass in Direct Combustion Processes

Abstract: The residual biomass of Faveira-Ferro (*Dinizia excelsa*) and Roxinho (*Peltogyne paniculata*) was characterized to evaluate their energetic potential in direct combustion systems, aiming to utilize the large volume of waste generated by Amazonian sawmills while supplying isolated communities that depend on fossil-fuel thermoelectric plants. Proximate analysis revealed volatile matter contents of approximately 72% for both species, with a slight advantage for Roxinho (72.77%), whereas Faveira-Ferro stood out for its fixed carbon content (27.08%) and significantly lower ash content (0.59% versus 1.65%). Comparison with literature data for Eucalyptus showed that the Amazonian biomasses are competitive, exhibiting higher fixed carbon and lower volatile matter, ensuring greater combustion stability. The results indicate satisfactory chemical characteristics for clean energy generation, presenting a technologically and environmentally viable alternative for utilizing sawmill residues in the region.

Keywords: Sustainable energy; Isolated systems;Waste utilization.

1. Introdução

O crescimento populacional e o consequente aumento da demanda energética impõem um desafio à sociedade: a necessidade de abastecer uma população em desenvolvimento econômico que pressiona os sistemas energéticos globais (EIA, 2023a; EIA, 2023b), enquanto a matriz atual, fortemente dependente de combustíveis fósseis, é responsável por níveis recordes de emissões de gases de efeito estufa. No ano de 2024 ocorreu um novo pico, em que as emissões globais de CO_2 provenientes da combustão de energia e de processos industriais atingiram 37,6 Gt, aumento de mais de 8% em relação aos últimos 5 anos (IEA, 2025).

Embora a participação de fontes renováveis e nuclear esteja em expansão, o crescimento da demanda, impulsionado pelo aumento populacional, tem superado os ganhos de eficiência energética (Yang *et al*., 2025; Olabi *et al*., 2022), de modo que os combustíveis fósseis ainda representam cerca de 60% da geração elétrica global (IAIS, 2025). Esses dados evidenciam que o avanço das tecnologias limpas não foi suficiente para reverter a trajetória de crescimento das emissões sob as leis e regulamentações atuais (EIA, 2023a).

Diante desse cenário, a demanda por energia continuará a crescer, tornando-se necessário que a matriz energética passe por mudanças estruturais (Jeffry *et al*., 2021; Olabi & Abdelkareem, 2022). Nesse contexto, a transição para fontes renováveis e de baixo carbono surge como uma necessidade imediata para mitigar os impactos das mudanças climáticas e construir um futuro energético mais sustentável.

Na Amazônia brasileira existem 160 localidades isoladas energeticamente, que dependem majoritariamente de usinas termelétricas movidas a combustíveis fósseis para acesso à eletricidade, gerando custos elevados, tanto econômica quanto ambientalmente (EPE, 2025). Simultaneamente, as serrarias da região enfrentam seu principal gargalo pela baixa eficiência do setor no aproveitamento da madeira durante o processo de desdobro de madeira, o que produz grandes volumes de resíduos, frequentemente superiores a 50% do volume processado (Luz *et al*., 2021). Esse baixo rendimento deve-se, sobretudo, ao nível tecnológico das serrarias e à qualidade das toras, de modo que a Resolução CONAMA 474/2016 estabelece um coeficiente máximo de rendimento volumétrico de 35%. Como resultado, a maior parte da madeira é transformada em resíduos, subutilizando um capital natural que a floresta demandou anos para acumular.

Diante do cenário explicitado, a pesquisa propõe realizar a caracterização de duas biomassa amplamente exploradas na Amazônia brasileira, Faveira-Ferro (*Dinizia excelsa*) e Roxinho (*Peltogyne paniculata*), com aproximadamente 1657,92 e 3029,51 m^3 explorados em 2025, respectivamente. A finalidade consiste em avaliar o potencial das espécies para geração

de energia limpa e sustentável em sistemas de combustão direta dos sistemas isolados da Amazônia, de acordo com suas características de química imediata.

2. Material e métodos

Resíduos madeireiros de duas espécies da Amazônia, Faveira-Ferro (*Dinizia excelsa*) e Roxinho (*Peltogyne paniculata*), foram coletados em março de 2026, na empresa MADEFLONA Indústria Madeireira LTDA, localizada no município de Itapuã do Oeste – Rondônia (Figura 1). O resíduo, composto por serragem gerada tanto no desdobro primário quanto no secundário das madeiras, é oriundo de uma área de concessão florestal situada na Floresta Nacional do Jamari.



Figura 1 – Coleta do material residual

A madeira de faveira-ferro foi trabalhada com densidade à granel de 310,43 kg/m^3, densidade aparente de 601,39 kg/m^3 e 4,43% de umidade. Já a madeira de roxinho apresentava 342,66 kg/m^3 de densidade à granel, 551,14 kg/m^3 de densidade aparente e, 5,00% de umidade.

A caracterização das biomassas foi realizada com base na análise química imediata, compreendendo o teor de cinzas, material volátil e carbono fixo, seguindo a ABNT NBR 8112. As determinações foram feitas em triplicata (n = 3), e os dados foram analisados por meio da média aritmética e do desvio padrão (DP), adotando-se intervalo de confiança de 95 % para a validação dos resultados.

Dados do eucalipto obtidos em literatura foram usados como comparativo para os respectivos resultados desta pesquisa.

3. Resultados e discussão

A análise química imediata da biomassa evidenciou que diferentes espécies de madeira apresentam diferentes concentrações influenciadas pelos fatores intrínsecos e extrínsecos a essa matéria (Figura 1).

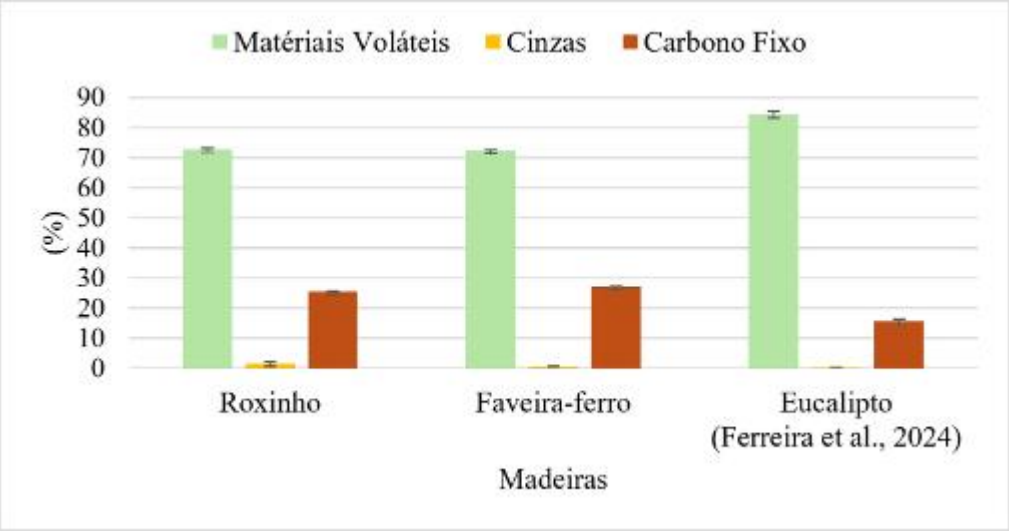


Figura 1 – Análise química imediata dos resíduos florestais das espécies avaliadas.

Para a análise do teor de materiais voláteis, os valores encontrados foram mais evidentes para a madeira de roxinho, brevemente acima da faveira-ferro, com menos de 1% de diferença encontrada. A concentração de matéria volátil influencia a dinâmica da queima de biomassa, uma vez que a degradação térmica dos componentes moleculares químicos que compõem a parede celular permite a ignição do material sólido à medida que os níveis de volatilidade aumentam (Protásio *et al*., 2019; Massuque *et al*., 2021). Ademais, tal componente contribui tipicamente com cerca de 70% de calor para o processo de combustão (Williams *et al*., 2012) e afeta, em particular, a estabilidade da chama, a formação de poluentes e a eficiência global da combustão. Como resultado da elevada quantidade de matéria volátil, a biomassa apresenta uma elevada reatividade que influencia o processo de combustão, na medida em que uma parte do combustível de biomassa é vaporizado antes de ocorrerem às reações de combustão em fase gasosa (Fernandes, 2015).

Para o teor de cinzas, os resultados encontrados nesta pesquisa mostram-se abaixo de 2%, indicando resultados mais satisfatórios para a madeira de Faveira-ferro, pois quanto maior o teor de cinzas na biomassa, maior será a quantidade de energia consumida para fundi-la, reduzindo a transmissão térmica para a aplicação de interesse energético (Soteli *et al*., 2024), além de indicar sobre possível existência de contaminação da biomassa (Vassilev *et al*., 2010). Altos teores de cinzas podem ainda levar à corrosão do queimador e a desgaste de todos os equipamentos por abrasão, o que se torna mais crítico quando o superior a 4% (Mande, 2009). Petricoski (2017) salienta que as cinzas são substâncias compostas de material inorgânico e tem relação inversa com o poder calorífico, enquanto os materiais voláteis durante a queima da biomassa volatilizam rapidamente diminuindo o tempo de residência do combustível dentro do aparelho de combustão. Ambos os fatos podendo contribuir para uma baixa eficiência energética dos briquetes a serem produzidos.

Para a determinação do carbono fixo, foi visto maior resultado para a madeira de faveira-ferro, com 5,50% de superioridade acima do roxinho. Chaves et al. (2013) relatam que o teor de carbono fixo tem relação direta com o poder calorífico, sendo que quanto maior o teor, maior o tempo de residência dentro do aparelho de queima. Desta forma é demonstrada a importância desse elemento. Conforme Vale, Brasil e Leão (2002), o teor de carbono fixo depende principalmente do teor de material volátil, já que os teores de cinzas para madeira são baixos, logo, madeiras com maiores teores de material volátil tem menores teores de carbono fixo. Desta forma, os resultados obtidos nessa pesquisa entram em concordância, uma vez que a madeira de faveira-ferro apresenta o maior teor de carbono fixo (27,08%), ao mesmo passo que apresenta o menor valor de material volátil (72,33%). Com igualdade acontece inversamente, quando o menor teor de carbono fixo visto na madeira de roxinho (25,59) apresenta o maior teor de material volátil (72,77%).

Para melhor entendimento da potencialidade das biomassas amazônicas estudadas, os resultados foram comparados com dados médios para diferentes espécies de Eucalipto, cujo qual trata-se de uma espécie amplamente utilizada na finalidade energética do Brasil. Observou-se que a madeira de Eucalipto apresenta maior teor de materiais voláteis e, consequentemente, menor concentração de carbono fixo, o que está associado a uma combustão mais rápida e menos estável. Em contrapartida, os resultados para o teor de cinzas foram superiores a ambas as espécies amazônicas, um aspecto desfavorável, pois altas concentrações de cinzas reduzem o rendimento energético efetivo e podem favorecer a formação de escórias e incrustações em equipamentos de combustão, além de aumentar os custos de manutenção.

Diante desse cenário, a estratégia mais promissora não se restringe à substituição do Eucalipto, mas sim à otimização de blendas entre espécies nativas, buscando-se o equilíbrio que compense os elevados teores de cinzas com o alto PCS. Nesse contexto, a vasta biodiversidade amazônica torna-se seu maior aliado, pois possibilita combinar resíduos de espécies com alto teor de cinzas a outras com baixo teor, viabilizando a produção de combustíveis com propriedades físico-químicas ajustadas, maximizando o aproveitamento energético e reduzindo impactos ambientais associados ao descarte inadequado da biomassa residual.

A análise comparativa revela uma competitividade promissora das espécies amazônicas avaliadas. Esse resultado indica que a biomassa amazônica possui potencial energético equivalente ou superior ao de espécies tradicionalmente cultivadas, o que fortalece seu protagonismo em matrizes energéticas alternativas.

4. Conclusões

A análise imediata demonstra valores de voláteis e carbono fixo promissores quando comparados aos resultados obtidos em literatura para o eucalipto, espécie consolidada no setor energético do Brasil

Para a concentração de cinzas, ambas as espécies apresentam maiores teores que a espécie referência, entretanto a vasta biodiversidade da Amazônia permite a formulação de blendas de modo a diluir as frações inorgânicas.

As espécies amazônicas investigadas possuem características químicas satisfatórias para fins energéticos, possibilitando a geração de energia limpa e sustentável em sistemas de combustão direta para atender demandas energéticas dos sistemas isolados da Amazônia, além de ser uma alternativa tecnológica e ambientalmente viável para o aproveitamento dos volumosos resíduos gerados por serrarias na região.

5. Agradecimentos

Os autores agradecem à Universidade Federal de Lavras (UFLA) e ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia da Madeira pela infraestrutura e suporte técnico concedidos. À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão de bolsas de estudo. Agradecemos ainda ao INCT Madeiras da Amazônia, projeto financiado pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) (Processo 406053/2022-7), ao INPA e à empresa MADEFLONA Ltda. pela disponibilidade das

biomassas estudadas nesta pesquisa. Por fim, expressamos nossos agradecimentos à Forest Ark pelo apoio.

À Pró-Reitoria de Pesquisa da Universidade Federal de Rondônia (UNIR) pela concessão de recursos financeiros por meio dos Editais nº 001/2023/DPESQ/PROPESQ/UNIR e nº 003/2023/DPESQ/PROPESQ/UNIR. Agradecemos, ainda, à Fundação Rondônia de Amparo ao Desenvolvimento das Ações Científicas e Tecnológicas e à Pesquisa do Estado de Rondônia (FAPERO) pela concessão de recursos financeiros por meio da Chamada Pública nº 005/2023 – FAPERO/DITT, conforme os Termos de Outorga nº 163/2024 e nº 190/2024.

6. Referências bibliográficas

Chaves A. M. B., Vale, A. T., Melido, R. C. N., & Zoch, V. P. (2013). Características energéticas da madeira e carvão vegetal de clones de *Eucalyptus spp*. Enciclopédia Bioesfera., 9(17), 533-542.

Empresa de Pesquisa Energética. (2025). Planejamento do atendimento aos sistemas isolados horizonte: Ciclo 2025. Rio de Janeiro: EPE.

Energy Information Administration. (2023a). EIA projects global energy consumption will outpace efficiency gains in most cases. https://www.eia.gov/todayinEnergy/detail.php?id=60642.

Energy Information Administration. (2023b). EIA projections indicate global energy consumption increases through 2050, outpacing efficiency gains and driving continued emissions growth. https://www.eia.gov/pressroom/releases/press542.php.

Fernandes, P. I. C. (2015). Estudo da biomassa florestal residual consumida em centrais termoelétricas. (Dissertação de mestrado). Universidade de Lisboa.

Institute for Advanced International Studies. (2025). Global electricity generation in 2024: Balancing carbon inertia and the green turn [PDF]. https://iais.uz/storage/files/1/Policy%20report%202_Afghan%20transport_FINAL%20+%20COVER.pdf/en/outputnew/global-electricity-generation-in-2024-balancing-carbon-inertia-and-the-green-turn

International Energy Agency. (2025). CO2 emissions. In Global Energy Review 2025. https://www.iea.org/reports/global-energy-review-2025/co2-emissions.

Jambers, V. T., Amorim, C. N., Campos, C. M., Rocha, L. L., Carneiro, A. C. O., A., Carvalho, A. M. M. L., ... & Pereira, B. L. C. (2025). Firewood quality of *Eucalyptus spp*. clones for agroindustry supply in Mato Grosso, Brazil. Revista Árvore, 49, e4921.

Jeffry, L., Ong, M. Y., Nomanbhay, S., Mofijur, M., Mubashir, M., & Show, P. L. (2021). Greenhouse gases utilization: A review. Fuel, 301, 121017.

Luz, E. S., Soares, Á. A. V., Goulart, S. L., Carvalho, A. G., Monteiro, T. C., & Protásio, T. P. (2021). Challenges of the lumber production in the Amazon region: relation between sustainability of sawmills, process yield and logs quality. Environment, Development and Sustainability, 23(4), 4924-4948.

Mande, S. P. (2009). Thermo chemical conversion of biomass. Em V. V. N. Kishore (Ed.), Renewable energy engineering and technology (pp. 705-728). The Energy and Resources Institute.

Massuque, J., Assis, M. R., Loureiro, B. A., Matavel, C. E., & Trugilho, P. F. (2021). Influence of lignin on wood carbonization and charcoal properties of Miombo woodland native species. European Journal of Wood and Wood Products, 79(3), 527-535.

Olabi, A. G., & Abdelkareem, M. A. (2022). Renewable energy and climate change. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 158, 112111.

Olabi, A. G., Obaideen, K., Elsaid, K., Wilberforce, T., Sayed, E. T., Maghrabie, H. M., & Abdelkareem, M. A. (2022). Assessment of the pre-combustion carbon capture contribution into sustainable development goals SDGs using novel indicators. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 153, 111710.

Petricoski, S. M. (2017). Briquetes produzidos com mistura de podas urbanas, glicerina e resíduos de processamento de mandioca. (Dissertação de mestrado). Universidade Estadual do Oeste do Paraná.

Protásio, T. P., Scatolino, M. V., Araújo, A. C. C., Oliveira, A. F. C. F., Figueiredo, I. C. R., Assis, M. R., & Trugilho, P. F. (2019). Assessing proximate composition, extractive concentration, and lignin quality to determine appropriate parameters for selection of superior Eucalyptus firewood. BioEnergy Research, 12(3), 626-641.

Soteli, R. P., Rodrigues, L. D. O., Pereira, B. L. C., Protásio, T. P., Carneiro, A. C. O., & Oliveira, A. C. (2024). Management and classification of waste from the primary processing of Brazilian Amazon tropical wood for energy-generation purposes. Environment, Development & Sustainability, 26(6).

Vale, A. T., Brasil, M. A. M., & Leão, A. L. (2002). Quantificação e caracterização energética da madeira e casca de espécies do Cerrado. Ciência Florestal, 12(1), 71-80.

Vassilev, S. V., Baxter, D., Andersen, L. K., & Vassileva, C. G. (2010). An overview of the chemical composition of biomass. Fuel, 89(5), 913-933.

Williams, A., Jones, J. M., Ma, L.; & Pourkashanian, M. (2012). Pollutants from the combustion of solid biomass fuels. Progress in Energy and Combustion Science, 38(2), 113-137.

Yang, L., Xu, W., Liu, Y., Zhao, G., Cui, P., Wang, Y., & Zhu, Z. (2025). Comparative analysis of life cycle carbon emission calculation in low-pressure methanol production process using biomass and coal as raw materials. Journal of Cleaner Production, 503, 145409.

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Potencial Energético de Resíduos da Cafeicultura na região do Triângulo Mineiro

Shoraia Germani Winter[1]; Antônio José Vinha Zanuncio[2]; Olívia Pereira Lopes[2]; Bárbara Lopo de Lima[1]; Amélia Guimarães Carvalho[2]

[1] Instituto de Química, Universidade Federal de Uberlândia; Uberlândia- Minas Gerais
[2] Instituto de Ciências Agrárias, Universidade Federal de Uberlândia; Monte Alegre- Minas Gerais

Resumo: A energia está cada vez mais presente na sociedade e desta forma a geração de energia de fontes renováveis se torna ainda mais importante, para que a produção energética tenha baixo impacto ambiental. Devido à grande importância do café e a alta geração de resíduos, o presente trabalho tem como objetivo estudar o potencial energético da palha de café na região do Triângulo Mineiro. Foi considerado os dados produtivos de 2022 a 2025 e previsão para 2026 do Ministério da Agricultura e Pecuária e para visualizar o potencial energético a palha de café foi submetida a testes de Poder Calorífico Superior (EN 15103), Teor de Hidrogênio (EN 15296) e Poder Calorífico Inferior, sendo obtido a Tonelada Equivalente de Petróleo (tep) da palha de café. Os resultados demonstraram um alto potencial para a geração de energia, onde a previsão produtiva para 2026 garantiria o suprimento energético anual para 60 mil pessoas.

Palavras-chave: Energia renovável; Sustentabilidade; Palha de café.

Energy Potential of Coffee Farming Waste in the Triângulo Mineiro Region

Abstract: Energy plays an increasingly pervasive role in modern society; consequently, the generation of energy from renewable sources assumes heightened importance to ensure low environmental impact in energy production. In view of the major socioeconomic relevance of coffee cultivation and the substantial generation of its associated residues, the present study aims to investigate the energy potential of coffee straw in the Triângulo Mineiro region. Production data from 2022 to 2025, along with the 2026 forecast provided by the Ministry of Agriculture and Livestock, were taken into consideration. To evaluate the energy potential, the coffee straw samples were subjected to testing for Gross Calorific Value (EN 15103), Hydrogen Content (EN 15296), and Net Calorific Value, enabling the calculation of the Tonne of Oil Equivalent (toe) for the coffee straw. The findings reveal a significant energy generation potential, whereby the estimated production for 2026 would be sufficient to meet the annual energy supply needs of 60,000 inhabitants.

Keywords: Renewable energy; Sustainability; Coffee straw.

1. Introdução

A necessidade energética do mundo vem crescendo, cada vez mais se desenvolvem tecnologias com alta demanda energética e com isso a dependência de combustíveis fósseis a nível global se evidencia (IEA, 2023). A dependência de combustíveis fósseis leva a uma série de problemas ambientais e mudanças climáticas, visto que são grandes emissores de gases do efeito estufa (Sun et.al., 2027).

A necessidade constante de energia e as preocupações ambientais tornam as biomassas constante alvo de estudo, pois apresentam grande potencial energético, são produzidas em grande quantidade em todo o mundo e são consideradas neutras em carbono, uma vez que o carbono emitido durante a combustão pode ser compensado pela absorção de CO_2 absorvido no processo de fotossíntese no decorrer do seu crescimento (Kien et. al., 2026)

A matriz energética do Brasil conta com 50% advinda de energia renovável, sendo que mais de 50% dessa energia corresponde a energia advinda de biomassas, como cana, lenha e carvão (Ministério de Minas e Energia, 2025). O uso de biomassas residuais de agroindústrias surge como uma oportunidade de produção de energia limpa aliado a uma gestão sustentável de resíduos, garantindo a valorização e um destino de baixo impacto (García-Mateos et.al., 2026).

O Brasil corresponde a mais de 1/3 da produção mundial de café, liderando no consumo e exportação, e Minas Gerais o estado que lidera a produção no país, especialmente na região do Triângulo Mineiro (MAPA, 2026). A produção do café é de grande importância socioeconômica, porém acarreta na geração de um alto volume de resíduos, visto que a cada 1 kg de grão de café colhido é gerado 0,5 kg de café beneficiado e 0,5kg de palha de café (Machado et. al., 2026).

Atualmente a destinação mais comum para a palha de café é o uso como adubo, mas essa ação pode apresentar riscos ao meio ambiente, uma vez que podem levar ao desbalanceamento do solo e da água, além do aumento da emissão de CO_2 pela decomposição (Gil-Gómez, Florez-Prado, Leguizamón-Vargas, 2024; Fernandes et al., 2025). Estudos recentes demonstram que o uso da palha de café na produção de para fins energéticos tem grande potencial e quando bem manejado pode alcançar altos padrões de qualidade em normativas internacionais (Carneiro et.al., 2025; Winter et.al., 2026).

O presente trabalho tem como objetivo demonstrar o potencial da palha de café para a produção energética na região do Triângulo Mineiro- Minas Gerais, como forma de aumentar a geração de energia limpa na região e oferecer um adequado manejo para a palha de café, dada a grande produção da região e sua importância socioeconômica.

2. Material e métodos

Os dados de produção de café foram obtidos através do Sumário Executivo Café (MAPA, 2026) dos anos 2022 a 2025 e da previsão produtiva para 2026, afim de observar o efeito da bienalidade do café na produção de energia e a energia que não foi aproveitada nos últimos anos. Foi selecionado dados de produtividade, sacas (60 kg) por hectare (10000 m²), levando em consideração o café arábica e robusta, para a região do Triângulo Mineiro, Minas Gerais e a quantidade de hectares dedicados a cafeicultura.

Para encontrar a quantidade de palha de café produzida foi respeitada a proporção de Machado et. al. (2026), sendo assim foi considerado que 50% das sacas de café foi transformada em resíduos após beneficiamento.

A palha de café foi obtida na Universidade Federal de Uberlândia, campus Monte Carmelo, para realizar os testes de caracterização e assim obter um valor base para os cálculos energéticos para a palha de café na região. O poder calorífico superior (PCS) da palha de café foi obtido de acordo com a norma EN 14918 (DIN, 2010).

O teor de hidrogênio foi obtido através da de análise imediata de acordo com a norma EN 15296 (DIN, 2011) com o auxílio de um analisador CHNS Vario Micro Cube (Elementary ®, Langenselbold, Alemanha). O poder calorífico inferior (PCI) foi obtido através da equação abaixo, de acordo com Hafford et.al. (2018).

$$PCI = PCS - 2{,}443 \times 8{,}936 \times \left(\frac{Teor\ de\ hidrogênio}{100}\right)$$

Para a melhor visualização do potencial energético da palha de café o poder calorífico inferior foi utilizado para encontrar a Toneladas Equivalentes de Petróleo (tep), que corresponde a 41,868 gigajoules, que é utilizado em âmbito internacional para comparação das fontes energéticas (Ministério de Minas e Energia, 2025). A organização dos dados e os cálculos foram realizados com o auxílio do software Excel ® (Microsoft, 2016) afim de maior padronização e visualização dos resultados.

$$tep = \frac{Massa\ da\ Biomassa\,(kg) \times PCI\left(\frac{GJ}{kg}\right)}{41{,}868}$$

3. Resultados e discussão

Na Tabela 1 é possível observar os valores da produtividade total, referente aos grão de café colhidos sem beneficiamento, o café beneficiado, que corresponde a 50% do café total colhido e a palha de café, que corresponde aos 50% do que é colhido e vira resíduo após o beneficiamento e a área plantada na região dos anos escolhidos.

Tabela 1- Produtividade, geração de resíduos de café e área para os anos de 2022 a 2026

Dados Triângulo Mineiro	Produtividade (kg/hectare)			Área plantada (hectare)
	Total	Café beneficiado	Palha de café	
2022	1386	693	693	181703
2023	2280	1140	1140	199471
2024	1644	822	822	195258
2025	1464	732	732	195941
2026	2088	1044	1044	219410

A Tabela 2 apresenta os valores encontrados para a palha de café, afim de obter as características comuns para a região do Triângulo Mineiro.

Tabela 2 – Poder calorífico superior (PCS), hidrogênio e poder calorífico inferior (PCI) da palha de café na região do Triângulo Mineiro

Características	Palha de café
PCS	18,10 MJ/kg
Hidrogênio	5,54 %
PCI	16,65 MJ/kg

A palha de café apresentou teor poder calorífico superior (PCS) de 18,10 MJ/Kg, o que é semelhante com outros estudos, como Winter et. al. (2025) que encontrou valores de 17,51 e 19,86 MJ/kg para casca de café e pergominho, que constituem a palha de café e Carneiro et. al. (2025) que variou de 15,89 a 17,92 MJ/kg em diferentes granulometrias. O teor de hidrogênio, que está ligado ao PCI, ficou abaixo do encontrado por Winter et. al. (2025) de 6,33 e 6,7% e

acima do encontrado por Carneiro et. al. (2025) de 5,2 %. O PCI responde diretamente com o aumento do teor de hidrogênio, causando uma queda de 1,45 MJ/kg, o que demonstra a necessidade de conhecer a constituição da biomassa.

A Tabela 3 mostra as informações sobre o potencial energético da palha de café para a região do Triângulo Mineiro.

Tabela 3 – Potencial energético da palha de café para o Triângulo Mineiro

Potencial energético	**Palha de café**				
	2022	**2023**	**2024**	**2025**	**2026**
Gigajoule por hectare	11,54	18,98	13,98	12,19	17,38
Gigajoule no Triângulo Mineiro	2096570,98	3786159,05	2672359,57	2388089,72	3813916,27
Toneladas Equivalentes de Petróleo por hectare	0,2756	0,4534	0,3269	0,2911	0,4152
Toneladas Equivalentes de Petróleo por hectare	50075,74	90430,86	63828,21	57038,54	91093,83

A partir do valorares obtidos na Toneladas Equivalentes de Petróleo (tep) é possível observar que a palha de café tem um alto potencial para o uso energético, uma vez que, ao observar apenas a área de café do Triângulo Mineiro, segundo as estimativas seria possível gerar o correspondente a mais de 91 mil toneladas de petróleo em energia renovável. Segundo dados do Ministério de Minas e Energia (2025) a média de consumo per capta da população brasileira é de 1,518 tep por ano, sendo assim apenas com o incremento da palha de café poderia suprir a necessidade de cerca de 60 mil pessoas no ano de 2026. Esta geração de energia possibilitaria o

aumento da oferta energética do país, uma correta destinação dos resíduos da cafeicultura e maior independência de fontes não renováveis de energia.

4. Conclusões

A palha de café demonstra alto potencial para a transformação energética quando observamos o tep médio para a região do Triângulo Mineiro. É importante observamos que o café é uma planta que apresenta bienalidade, o que causa um ano de safra mais elevada e o seguinte de safra mais baixa, que a área destinada ao café também influencia na geração total dos resíduos e por se tratar de uma biomassa pode apresentar diferenças no poder calorífico superior e inferior, o que irá alterar a geração de energia. Porém, se tratando de uma biomassa residual permite a produção de energia de baixo custo, além de possibilitar a produção energética de forma local e diretamente nas unidades produtivas.

Estudos voltados a melhoria na conversão energética ainda são necessários para que as taxas de conversão sejam maiores e aumentem a eficiência, tais como tecnologias de peletização, briquetagem, co-gaseificação, combustão e produção de etanol de 2º geração, o que permitirá que uma maior quantidade da energia advinda da palha de café seja transformada em energia no dia-a-dia da sociedade.

5. Agradecimentos

Este trabalho foi viabilizado, em parte, pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) - Processo APQ-05311-24; APQ-04599-25; APQ 04100-23 e pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) - Processo n° 444395/2024-5.

6. Referências bibliográficas

Carneiro, A. de C. O.; Zanuncio, A. J. V.; Carvalho, A. G.; Jorge, J. A. C. G.; Santos, R. J. C. dos; Demuner, I. F.; Peres, L. C.; Winter, S. G.; Castro, V. R. de; Branco-Vieira, M.; Araújo, S. de O. (2025) Sustainable Production of Coffee Husk Pellets: Applying Circular Economy in Waste Management and Renewable Energy Production. 14, 26. https://doi.org/10.3390/resources14020026

EN 14918; Solid Biofuels – Method for the Determination of Calorific Value. Deutsches Institut für Normung: Berlin, Germany, 2010.

Fernandes, M. A. de O.; Baêta, B. E. L.; Adarme, O. F. H.; Fonseca, A. (2025). LCA-based carbon footprint analysis of anaerobic digestion of coffee husk waste. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 207, 114993. https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.114993

García-Mateos, R.; Arranz, J. I.; Romero, P.; Sepúlveda, F. J.; Cuéllar-Borrego, S.; Miranda, M. T. (2026). Fuel pellet production from corn crop residue at semi-industrial scale: Effects of residue type, initial moisture content and process variables on pellet quality. Fuel Processing Technology, 290, 108510. https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2026.108510

Gil-Gómez, J. A.; Florez-Prado, L. M.; Leguizamón-Vargas, Y. C. (2024). Valorization of coffee by-products in the industry, a vision towards circular economy. Discover Applied Sciences, 6:480. https://doi.org/10.1007/s42452-024-06085-9

Haraford, L. M.; Ward, B.J.; Weimer, A. W.; Linden, K. (2018). Fecal sludge as a fuel: characterization, cofire limits, and evaluation of quality improvement measures. Water Sci Technol, 78, 12, 2437-2448. https://doi.org/10.2166/wst.2019.005

International Energy Agency- IEA. (2023). World Energy Outlook. France. https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2023

Kien, N. S. T.; Dobashi, R.; Shoyama, M.; Kwangseok, C. (2026). Analysis of dust explosion hazards and risk assessment of dust from biomass fuel: Wood pellets. Fire Safety Journal, 163, 104771. https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2026.104771

Machado, M.; Fernandes, I.; Fernandes, A.; Freitas, V. de; Santo, L. E.; Passos, C. P.; Roade-Pérez, P.; Cardelle-Cobas, A.; Coimbra, M. A.; Oliveira, M. B.P. P.; Ferreira, H.; Alves, R. C. (2026). Digestive stability and prebiotic potential of coffee husks: chemical characterization and in vitro lactobacilli fermentation. European Food Research and Technology, 252, 204. https://doi.org/10.1007/s00217-026-05106-8

Microsoft. (2016). Microsoft Excel (versão 16.0). https://www.microsoft.com/excel

Ministério da Agricultura e Pecuária (MAPA). Brasil. (2026). Sumário Executivo Café. https://www.gov.br/conab/pt-br/atuacao/informacoes-agropecuarias/safras/safra-de-cafe/safra-de-cafe-1

Ministério de Minas e Energia. (2025). BEN – Balanço Energético Nacional – Ano base 2024. Brasília: MME (on-line). https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2025

Sun, Z.; Chen, J.; Xiong, M.; Li, Z.; Zhang, G.; Liu, Y.; Gao, C.; Guo, F. (2027). Utilizing coal gasification fine slag as a bifunctional microwave absorber and catalyst for microwave-assisted pyrolysis of corn stalk. Fuel, 428, 140075. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2026.140075

Winter, S. G.; Zanuncio, A. J. V.; Carvalho, A. G.; Ferreira, M. V.; Lopes, O. P.; Carneiro, A. de C. O.; Araújo, S. de O. (2025). Sustainable Production from Coffee Byproducts: Characterization and Pelletization of Husk and Parchment. Resources, 14, 188. https://doi.org/10.3390/resources14120188

Winter, S. G.; Zanuncio, A. J. V.; Santos, R. J. C. dos; Carneiro, A. de C. O.; Lima, B. L.; Carvalho, A. G.; Jorge, F. de J.; Demuner, I. F.; Peres, L. C.; Vieira, T. S. (2026). Production and Characterization of Pellets from Blends of Residual Biomass of Pinus Wood and Coffee Straw. Sustainability, 18, 5586. https://doi.org/10.3390/su18115586

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Potencial energético dos resíduos da Fava-d'anta (*Dimorphandra mollis* Benth)

Bárbara Lôpo de Lima[1]; Antônio Jose Vinha Zanuncio[2]; Shoraia Germani Winter[1]; Fernando Colen[3]; Amélia Guimarães Carvalho[1]; Talita Baldin[4]; Lorena dos Santos Almeida Silva[3]; Eliane Favalessa[5]

[1] Universidade Federal de Uberlândia, Instituto de Química, Uberlândia, Minas Gerais, Brasil 01
[2] Universidade Federal de Uberlândia, Instituto de Ciências Agrárias, Monte Carmelo, Minas Gerais, Brasil 02
[3] Universidade Federal de Minas Gerais, Instituto de Ciências Agrárias, Montes Claros, Minas Gerais, Brasil 03
[4] Universidade Federal de Santa Maria, Departamento de Ciências Florestais, Santa Maria, Rio Grande do Sul, Brasil 04
[5] Universidade Federal de São Carlos, Departamento de Educação, São Carlos, São Paulo, Brasil 05

Resumo: A exploração da fava-d'anta (*Dimorphandra mollis* Benth.) no Cerrado para extração de flavonoides gera grande quantidade de resíduos lignocelulósicos com potencial para aproveitamento energético. Este estudo teve como objetivo caracterizar quimicamente e energeticamente esses resíduos, visando identificar seu potencial para aplicações bioenergéticas. A caracterização química compreendeu a determinação dos teores de extrativos, lignina e holocelulose, enquanto a análise imediata avaliou os teores de materiais voláteis, carbono fixo, cinzas e o poder calorífico superior. O comportamento térmico foi investigado por termogravimetria em atmosfera de nitrogênio. Os resíduos apresentaram elevados teores de extrativos (48,25%), lignina (31,69%), materiais voláteis (68,17%) e carbono fixo (30,16%), além de baixo teor de cinzas (1,67%) e poder calorífico superior de 16,39 MJ kg^{-1}. A degradação térmica apresentou perfil característico de biomassas lignocelulósicas. Os resultados demonstram o potencial dos resíduos da fava-d'anta para aproveitamento energético, indicando perspectivas de aplicação na produção de biocombustíveis sólidos e na valorização da cadeia extrativista do Cerrado.

Palavras-chave: Bioenergia; Biomassa lignocelulósica; Economia circular.

Energy Potential of Fava-d'anta (*Dimorphandra mollis* Benth.) Residues

Abstract: The exploitation of *Dimorphandra mollis* Benth. (fava-d'anta) in the Brazilian Cerrado for flavonoid extraction generates large amounts of lignocellulosic residues with potential for energy recovery. This study aimed to chemically and energetically characterize these residues to assess their potential for bioenergy applications. Chemical characterization included the determination of extractives, lignin, and holocellulose contents, while proximate analysis evaluated volatile matter, fixed carbon, ash content, and higher heating value. Thermal behavior was investigated by thermogravimetric analysis under a nitrogen atmosphere. The residues exhibited high contents of extractives (48.25%), lignin (31.69%), volatile matter (68.17%), and fixed carbon (30.16%), along with low ash content (1.67%) and a higher heating value of 16.39 MJ kg^{-1}. Thermogravimetric analysis revealed a thermal degradation profile typical of lignocellulosic biomass. These findings demonstrate the potential of fava-d'anta residues for energy recovery, highlighting their prospective application in the production of solid biofuels and the valorization of the Cerrado extractive production chain.

Keywords: Bioenergy; Circular economy; Lignocellulosic biomass.

1. Introdução

Em 2024, a demanda global por energia cresceu 2,2% acima da média da última década, impulsionada principalmente pelo setor elétrico, cuja demanda aumentou 4,3% (EIA, 2025). Isso evidencia a necessidade de diversificar a matriz energética e ampliar o uso de fontes renováveis. A biomassa contribui para reduzir a dependência de combustíveis fósseis em países emergentes e se apresenta como uma alternativa sustentável para geração de energia (Mumbach et al., 2024).

O Brasil se destaca como referência mundial em energias renováveis, com 50% da oferta interna de energia e 88,2% da eletricidade provenientes de fontes renováveis em 2024. Segundo o Balanço Energético Nacional, desse total, 11,6% corresponde à energia hidráulica, 16,7% à biomassa de cana-de-açúcar, 8,5% à lenha e carvão vegetal, e 8,1% a outras fontes renováveis. Além disso, 40,6% da geração térmica em 2024 teve origem em biomassa, reforçando o papel estratégico desse recurso na matriz energética nacional (Ministério de Minas e Energia, 2025).

Nesse cenário, a cadeia agroindustrial brasileira, que gera milhões de toneladas de resíduos anualmente, apresenta um grande potencial energético. Quando mal manejados, esses resíduos podem causar impactos ambientais e sociais (Siqueira et al., 2022). No entanto, eles representam oportunidades econômicas pouco exploradas e podem ser convertidos em energia sustentável, agregando valor aos sistemas (Jamil et al., 2024).

Entre os resíduos agroindustriais com potencial energético, destaca-se a fava-d'anta (*Dimorphandra mollis* Benth.), uma fabaceae que ocorre em formações do bioma Cerrado. Seus frutos são coletados por comunidades extrativistas, devido ao elevado teor de bioflavonoides, compostos vegetais que têm importante aplicação na indústria farmacêutica e são amplamente utilizados na produção de medicamentos (Porfírio et al., 2024). A extração desses compostos gera resíduos vegetais que podem ser valorizados como fonte adicional de energia, alinhando-se aos princípios da economia circular.

A gestão eficiente de resíduos lignocelulósicos requer tecnologias que possibilitem seu aproveitamento energético e agreguem valor. Entre elas, a pirólise se destaca como um processo termoquímico que decompõe a matéria orgânica em produtos sólidos, líquidos e gasosos, apresentando operação simples, custo moderado, baixas emissões e resíduos ambientais. Por essas características, a pirólise tornou-se uma alternativa eficaz para converter resíduos agroindustriais lignocelulósicos em produtos energéticos (Mumbach et al., 2024). A análise termogravimétrica é útil no estudo da combustão de biomassa, pois monitora a perda de massa

durante a decomposição térmica e fornece informações sobre os mecanismos de reação. O uso dessa análise possibilita identificar matérias-primas com alto potencial energético, adequadas para integração na cadeia de fornecimento de energia, contribuindo diretamente para a valorização de resíduos agroindustriais lignocelulósicos (Mumbach et al., 2024) e se alinha aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável, especialmente o ODS 7, ao promover fontes de energia mais limpas e acessíveis, e ao ODS 12, ao incentivar práticas de consumo e produção responsáveis.

Este estudo teve como objetivo caracterizar o potencial energético dos resíduos de fava-d'anta a partir de análises termogravimétricas, com o intuito de contribuir para o desenvolvimento de estratégias de aproveitamento desses subprodutos. O trabalho busca, ainda, reforçar os princípios da economia circular, demonstrando o potencial dos resíduos do processamento da fava-d'anta como recursos energéticos de valor agregado.

2. Material e métodos

2.1 Caracterização da biomassa

Os resíduos de fava d'anta utilizados neste estudo foram fornecidos por comunidades extrativistas que coletam os flavonoides da planta para comercialização junto à indústria em Montes Claros, Minas Gerais, Brasil (16°42'56"S; 43°51'58"W; 624 m). Determinamos o teor de umidade conforme a norma ASTM D 1762-84 (2011), utilizando estufa a 105 ± 2 °C. O teor de cinzas e de material volátil foi obtido de acordo com procedimentos padrão, enquanto o carbono fixo foi calculado pela diferença. Aferimos o poder calorífico da biomassa em bomba calorimétrica IKA C5003 Control, seguindo a norma NBR 8633 (Brazilian Association of Technical Standards, 1984). O conteúdo de extrativos em álcool-tolueno foi determinado segundo a norma T204 cm-97 (1997), e a lignina Klason foi quantificada de acordo com a norma T222 om-98 (1997), ambas da Associação Técnica da Indústria de Papel e Celulose.

2.2 Análise termogravimétrica da biomassa

A perda de massa dos resíduos de fava d'anta durante as reações de pirólise foi quantificada e registrada usando um instrumento termogravimétrico modelo DTG-60H. Aproximadamente 5mg da biomassa foi colocada em cadinho de alumina e aquecida de 28 a 900°C em diferentes razões de aquecimento. Utilizamos taxas de aquecimento variáveis de 5, 10, 15 e 20ºC min^{-1} sob uma atmosfera inerte de nitrogênio com uma vazão de 50 mL min^{-1}.

3. Resultados e discussão

3.1 Caracterização química da biomassa

Os resíduos de fava-d'anta apresentaram teor de extrativos de 48,25%, valor consideravelmente superior ao relatado para a maioria das biomassas lignocelulósicas de interesse energético. Em madeiras de eucalipto, os teores de extrativos normalmente variam entre 2 e 5%, enquanto estudos com bagaço de cana-de-açúcar reportam valores entre 5 e 15% (Carvalho et al., 2015). Dessa forma, o valor encontrado neste estudo é aproximadamente quatro a dez vezes superior ao de referências típicas de biomassa lenhosa e agroindustrial. Essa discrepância provavelmente está relacionada à natureza do material estudado. Os resíduos de fava-d'anta correspondem à fração remanescente do processo industrial de obtenção de flavonoides, principalmente rutina e quercetina, compostos naturalmente abundantes em seus frutos (Ferreira, 2023). Embora o processo tenha como objetivo concentrar esses compostos, parte dos metabólitos secundários pode permanecer na biomassa residual após as etapas de extração e purificação (Ferreira, 2023). Assim, é provável que compostos fenólicos, taninos e outros constituintes solúveis em álcool-tolueno tenham contribuído para o elevado teor de extrativos observado.

O teor de lignina Klason (31,69%) também se mostrou superior à faixa reportada para biomassas lignocelulósicas convencionais, que normalmente varia entre 20 e 30% (Yoo et al., 2020), e aos observados para madeiras de *Eucalyptus* spp., que geralmente apresentam teores entre 25 e 30% (Penín et al., 2020). Teores elevados de lignina são favoráveis à valorização energética, pois esse polímero apresenta maior densidade energética que a holocelulose, contribuindo tanto para o aumento do carbono fixo quanto do poder calorífico (Ramos et al., 2024). Além disso, por atuar como ligante natural durante processos de compactação, a lignina favorece a formação de briquetes e pelletes com maior integridade mecânica, uma vez que sua plastificação sob temperatura promove maior coesão interparticular (Falemara et al., 2018).

3.2 Caracterização imediata da biomassa

O teor de materiais voláteis (68,17%) foi inferior ao normalmente observado para biomassas lignocelulósicas, cujos valores geralmente variam entre 65 e 85%, dependendo da espécie (Silva et al., 2021). Em resíduos de *Eucalyptus saligna*, por exemplo, foi reportado teor de 81,1% de materiais voláteis (Silveira et al., 2020), valor superior ao obtido neste estudo. Essa diferença é coerente com o elevado teor de lignina do material, uma vez que a lignina se degrada de forma mais lenta e em faixa de temperatura mais ampla que a holocelulose, contribuindo proporcionalmente menos para a fração volátil e mais para o resíduo carbonoso final (Massuque et al., 2021).

Consequentemente, o teor de carbono fixo (30,16%) foi superior ao normalmente observado para biomassas lignocelulósicas, cujos valores geralmente variam entre 10 e 25%, dependendo da espécie e da composição química (Vassilev et al., 2010). Esse resultado está diretamente relacionado ao elevado teor de lignina da biomassa, uma vez que esse polímero apresenta maior resistência à degradação térmica e favorece a formação de carvão durante a conversão termoquímica (Yang et al., 2007). Do ponto de vista energético, maiores teores de carbono fixo são desejáveis, pois promovem combustão mais lenta e sustentada, aumentando o tempo de residência do combustível e a disponibilidade de energia durante a queima (Bonfatti Júnior et al., 2025).

O teor de cinzas (1,67%) foi baixo, indicando elevada qualidade energética da biomassa. Esse valor está abaixo do limite de 6% estabelecido pela ISO 17225-7:2021 para briquetes não lenhosos Classe A, evidenciando seu potencial para aplicação como biocombustível sólido. Além disso, baixos teores de cinzas são desejáveis por reduzirem a formação de escórias, incrustações e particulado durante a combustão, contribuindo para maior eficiência operacional e menor desgaste dos equipamentos (Puri et al., 2024).

3.3 Poder calorífico da biomassa

O poder calorífico superior (PCS) dos resíduos de fava-d'anta foi de 16,39 MJ kg^{-1}, valor compatível com o observado para diversas biomassas lignocelulósicas empregadas na geração de bioenergia. Segundo Vassilev et al. (2010), resíduos lignocelulósicos apresentam, em geral, PCS entre 15 e 21 MJ kg^{-1}, variando conforme a composição química e o teor de lignina. De forma semelhante, Protásio et al. (2013)reportaram valores entre aproximadamente 16 e 21 MJ kg^{-1} para diferentes resíduos lignocelulósicos brasileiros destinados à produção de bioenergia. Assim, o PCS obtido para a fava-d'anta demonstra que o resíduo possui potencial para aproveitamento energético na forma in natura ou após densificação em briquetes e pellets.

3.4 Comportamento térmico

As curvas de TG (Figura 1A) apresentam o comportamento típico de biomassas lignocelulósicas, com perda de massa em três etapas. A primeira, entre a temperatura ambiente e aproximadamente 150 °C, corresponde à evaporação da umidade e de compostos de baixa massa molar, resultando em perda de massa de cerca de 8%. Em seguida, observa-se relativa estabilidade até aproximadamente 200 °C, quando se inicia a principal etapa de degradação térmica.

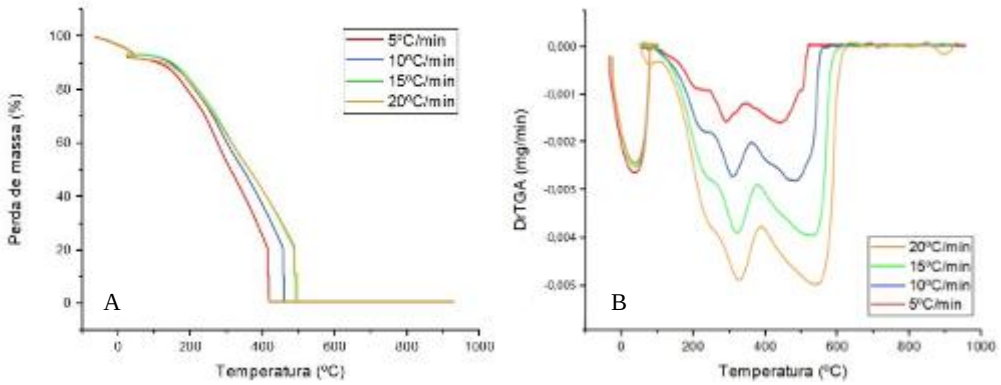


Figura 1 - Curvas de TG (A) e DTG (B) dos resíduos de fava-d'anta obtidas em diferentes taxas de aquecimento (5, 10, 15 e 20 °C min^{-1}).

Entre 200 e 400 °C ocorre a maior perda de massa, associada principalmente à decomposição da hemicelulose e da celulose, cujas faixas de degradação são de aproximadamente 220–315 °C e 315–400 °C, respectivamente (Apaydın Varol & Mutlu, 2023). As curvas de DTG (Figura 1B) confirmam esse comportamento, apresentando um ombro entre 280 e 320 °C, relacionado à degradação da hemicelulose, e um pico principal entre 360 e 390 °C, correspondente à decomposição da celulose, em concordância com o comportamento descrito para biomassas lignocelulósicas (Sanchez-Silva et al., 2012).

A lignina apresenta degradação mais lenta, distribuída entre aproximadamente 160 e 900 °C, contribuindo continuamente para a perda de massa após o principal evento de pirólise (Yang et al., 2007). Esse comportamento explica a redução gradual da massa até elevadas temperaturas e reforça o elevado teor de lignina determinado quimicamente (31,69%), uma vez que esse polímero é o principal responsável pela formação de carvão durante a pirólise.

3.5 Efeito da taxa de aquecimento sobre as curvas de TG/DTG

A comparação entre as taxas de aquecimento (5, 10, 15 e 20 °C min^{-1}) mostra o deslocamento das curvas de TG e DTG para temperaturas mais elevadas com o aumento da taxa de aquecimento, comportamento atribuído ao atraso térmico. Em taxas mais altas, o menor tempo para transferência de calor da superfície ao interior da partícula gera gradientes de temperatura que retardam a degradação da biomassa em relação à temperatura do forno (Mishra et al., 2023). Esse efeito é observado tanto no início da degradação quanto no pico de DTG, que ocorre em temperaturas mais elevadas à medida que aumenta a taxa de aquecimento. Além disso, os picos tornam-se mais intensos, indicando que a decomposição ocorre em um intervalo de tempo menor e, consequentemente, com maior taxa instantânea de perda de massa (Chen et al., 2020). Esse comportamento é característico de biomassas lignocelulósicas e deve ser

considerado no dimensionamento de processos termoquímicos, uma vez que taxas mais baixas favorecem uma degradação mais gradual, enquanto taxas mais elevadas representam condições mais próximas às encontradas em sistemas industriais de combustão e gaseificação (Apaydın Varol & Mutlu, 2023).

4. Conclusões

Os resíduos provenientes do processamento da fava-d'anta (Dimorphandra mollis Benth.) apresentaram características químicas e energéticas favoráveis ao aproveitamento bioenergético. Os elevados teores de lignina e carbono fixo, associados ao baixo teor de cinzas e ao poder calorífico superior, evidenciam seu potencial como matéria-prima para produção de biocombustíveis sólidos, como por exemplo briquetes e pellets. O comportamento térmico observado confirmou a natureza lignocelulósica do resíduo, indicando sua adequação para processos termoquímicos, especialmente pirólise e combustão. Do ponto de vista da contribuição científica, este é, até onde se tem conhecimento, um dos primeiros estudos a caracterizar quimicamente e energeticamente os resíduos de fava-d'anta (*Dimorphandra mollis*) com foco em aproveitamento bioenergético. A literatura disponível sobre a espécie concentra-se predominantemente em aspectos de biometria, fenologia e composição fitoquímica voltada à indústria farmacêutica, o que reforça o caráter inédito da caracterização aqui apresentada e sua relevância para subsidiar estratégias de valorização energética alinhadas à economia circular da cadeia extrativista do Cerrado.

5. Agradecimentos

Este trabalho foi viabilizado, em parte, pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) - Processo APQ-05311-24; APQ-04599-25; APQ 04100-23 e pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) - Processo n° 444395/2024-5.

6. Referências bibliográficas

Apaydın Varol, E., & Mutlu, Ü. (2023). TGA-FTIR Analysis of Biomass Samples Based on the Thermal Decomposition Behavior of Hemicellulose, Cellulose, and Lignin. *Energies*, *16*(9), 3674. https://doi.org/10.3390/en16093674

ASTM D 1762-84. (2011). Standard Test Method for Chemical Analysis of Wood Charcoal. *ASTM International*, *84*(Reapproved 2007), 1–2. https://doi.org/10.1520/D1762-84R07.2

Bonfatti Júnior, E. A., Oliveira, R. S., Lengowski, E. C., Andrade, A. S. de, & Silva, D. A. da. (2025). Correlation between the heating value and the chemical characteristics of Eucalyptus biomass. *Ciência Rural*, *55*(4). https://doi.org/10.1590/0103-8478cr20240100

Brazilian Association of Technical Standards. (1984). *NBR 8633: Charcoal – Determination of calorific value.*

Carvalho, D. M. de, Sevastyanova, O., Penna, L. S., Silva, B. P. da, Lindström, M. E., & Colodette, J. L. (2015). Assessment of chemical transformations in eucalyptus, sugarcane bagasse and straw during hydrothermal, dilute acid, and alkaline pretreatments. *Industrial Crops and Products*, *73*, 118–126. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2015.04.021

Chen, W.-H., Eng, C. F., Lin, Y.-Y., & Bach, Q.-V. (2020). Independent parallel pyrolysis kinetics of cellulose, hemicelluloses and lignin at various heating rates analyzed by evolutionary computation. *Energy Conversion and Management*, *221*, 113165. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.113165

EIA. (2025). *Global Energy Review 2025*. https://iea.blob.core.windows.net/assets/5b169aa1-bc88-4c96-b828-aaa50406ba80/GlobalEnergyReview2025.pdf

Falemara, B. C., Joshua, V. I., Aina, O. O., & Nuhu, R. D. (2018). Performance Evaluation of the Physical and Combustion Properties of Briquettes Produced from Agro-Wastes and Wood Residues. *Recycling*, *3*(3), 37. https://doi.org/10.3390/recycling3030037

Ferreira, G. S. (2023). *Desenvolvimento de metodologia de extração de rutina em frutos de fava-d'anta (Dimorphandra mollis Benth.)*. Universidade Federal de Minas Gerais.

Jamil, F., Inayat, A., Hussain, M., Akhter, P., Abideen, Z., Ghenai, C., Shanableh, A., & Abdellatief, T. M. M. (2024). Valorization of Waste Biomass to Biofuels for Power Production and Transportation in Optimized Way: A Comprehensive Review. *Advanced Energy and Sustainability Research*. https://doi.org/10.1002/aesr.202400104

Massuque, J., De Assis, M. R., Loureiro, B. A., Matavel, C. E., & Trugilho, P. F. (2021). Influence of lignin on wood carbonization and charcoal properties of Miombo woodland native species. *European Journal of Wood and Wood Products*, *79*(3), 527–535. https://doi.org/10.1007/s00107-021-01669-3

Ministério de Minas e Energia. (2025). *BRAZILIAN ENERGY BALANCE 2025*. https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-885/topico-771/Relatório Final_BEN 2025.pdf

Mishra, A., Nanda, S., Ranjan Parida, M., Jena, P. K., Dwibedi, S. K., Manjari Samantaray, S., Samantaray, D., Mohanty, M. K., & Dash, M. (2023). A comparative study on pyrolysis kinetics and thermodynamic parameters of little millet and sunflower stems biomass using thermogravimetric analysis. *Bioresource Technology*, *367*, 128231. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.128231

Mumbach, G. D., da Silva, J. C. G., Di Domenico, M., Liborio, D. de O., Pacheco, J. G. A., & Alves, J. L. F. (2024). Unlocking the potential of pequi (Caryocar brasiliense) residues for bioenergy and renewable chemicals: Multicomponent kinetic modeling, thermodynamic parameter estimation, and characterization of volatile products through TGA and Py-GC/MS experiments. *Industrial Crops and Products*, *209*, 117928. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2023.117928

Penín, L., López, M., Santos, V., Alonso, J. L., & Parajó, J. C. (2020). Technologies for Eucalyptus wood processing in the scope of biorefineries: A comprehensive review. *Bioresource Technology*, *311*, 123528. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.123528

Porfírio, K. de P., Ribeiro, A., Farias, S. G. G. de, Sousa, T. S. de, Ciccheto, D. F., Barroso, P. A., Santos, F. S. dos, Silva, D. Y. B. de O., & Ferraz Filho, A. C. (2024). Genetic Parameters Estimated in the Early Growth of Dimorphandra mollis Benth. Progenies. *Forests*, *15*(7), 1184. https://doi.org/10.3390/f15071184

Protásio, T. d. P., Bufalino, L., Tonoli, G. H. D., Guimarães Junior, M., Trugilho, P. F., & Mendes, L. M. (2013). Brazilian lignocellulosic wastes for bioenergy production: Characterization and comparison with fossil fuels. *BioResources*, *8*(1), 1166–1185.

Puri, L., Hu, Y., & Naterer, G. (2024). Critical review of the role of ash content and composition in biomass pyrolysis. *Frontiers in Fuels*, *2*. https://doi.org/10.3389/ffuel.2024.1378361

Ramos, R. D., Longue Júnior, D., Gomes, F. J. B., & Medeiros, N. C. G. de. (2024). Influence of basic density and chemical composition of wood on the pulp and paper industry: a case study. *Ciência Florestal*, *34*(3), e85566. https://doi.org/10.5902/1980509885566

Sanchez-Silva, L., López-González, D., Villaseñor, J., Sánchez, P., & Valverde, J. L. (2012). Thermogravimetric–mass spectrometric analysis of lignocellulosic and marine biomass pyrolysis. *Bioresource Technology*, *109*, 163–172. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.01.001

Silva, D. A. da, Hansted, A. L. S., Nakashima, G. T., Padilla, E. R. D., Pereira, J. C., & Yamaji, F. M. (2021). Volatile matter values change according to the standard utilized? *Research, Society and Development*, *10*(12), e291101220476. https://doi.org/10.33448/rsd-v10i12.20476

Silveira, J. H. da, Dorneles, R. H. T., Sebben, V. H. A., Gasparin, F. P., & Ries, L. A. da S. (2020). Characterization of residual biomass from the harvest of Eucalyptus saligna for thermal conversion processes. *Revista Eletrônica Em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental*, *24*, e13. https://doi.org/10.5902/2236117062679

Siqueira, M. U., Contin, B., Fernandes, P. R. B., Ruschel-Soares, R., Siqueira, P. U., & Baruque-Ramos, J. (2022). Brazilian Agro-industrial Wastes as Potential Textile and Other Raw Materials: a Sustainable Approach. *Materials Circular Economy*, *4*(1), 9. https://doi.org/10.1007/s42824-021-00050-2

Vassilev, S. V., Baxter, D., Andersen, L. K., & Vassileva, C. G. (2010). An overview of the chemical composition of biomass. *Fuel*, *89*(5), 913–933. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2009.10.022

Yang, H., Yan, R., Chen, H., Lee, D. H., & Zheng, C. (2007). Characteristics of hemicellulose, cellulose and lignin pyrolysis. *Fuel*, *86*(12–13), 1781–1788. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2006.12.013

Yoo, C. G., Meng, X., Pu, Y., & Ragauskas, A. J. (2020). The critical role of lignin in lignocellulosic biomass conversion and recent pretreatment strategies: A comprehensive review. *Bioresource Technology*, *301*, 122784. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.122784

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Potencial energético dos resíduos de Angelim-pedra (*Hymenolobium pulcherrimum* Ducke) na Amazônia Ocidental

Erleide Paula Santos Veríssimo[1]; Maria Jhulia Cordeiro dos Santos[1]; Beatriz Aparecida Nunes Simão[1]; Amanda dos Santos Ferreira[1]; Thiago Cardoso da Silva[1]; Adriano Reis Prazeres Mascarenhas[1]; Fábio Henrique Della Justina do Carmo[1]; Maíra Reis de Assis[2]

[1] Universidade Federal de Rondônia
[2] Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia

Resumo: O objetivo deste estudo foi avaliar o potencial energético dos resíduos madeireiros da espécie Angelim-pedra (*Hymenolobium pulcherrimum* Ducke) a partir da caracterização de suas propriedades físicas, químicas e energéticas. Foram determinadas as densidades básicas e a granel, o teor de umidade, as análises químicas imediata e elementar, os poderes caloríficos superior, inferior e líquido e a densidade energética, seguindo normas técnicas. Os resultados indicaram que a densidade básica foi de 610±0,01 kg/m³, a umidade em base úmida foi de 20,46±1,55 % e em base seca foi de 25,78±2,42 %. Na análise imediata, o teor de materiais voláteis foi de 77,41±0,35 %, o teor de cinzas de 0,11±0,06 % e o carbono fixo de 22,47±0,30 %. O poder calorífico superior foi estimado em 20,02±0,05 MJ/kg e a densidade energética foi de 12.230,60±31,88 MJ/m³. O alto poder calorífico, a baixa produção de cinzas e a alta densidade energética confirmam a viabilidade desse material para o uso energético.

Palavras-chave: Biomassa; Energia; Rondônia; Resíduos Madeireiros Amazônicos

Energy potential of Angelim-pedra (Hymenolobium pulcherrimum Ducke) residues in the Western Amazon

Abstract: The objective aim of this study was to evaluate the energy potential of wood residue from the species Angelim-pedra (*Hymenolobium pulcherrimum* Ducke) based on the characterization of its physical, chemical, and energetic properties. Basic and bulk densities, moisture content, proximate and ultimate chemical analyses, higher, lower, and net calorific values, and energy density were determined following technical standards. The results indicated that the basic density was 610±0.01 kg/m³, the moisture content on a wet basis was 20.46±1.55%, and on a dry basis was 25.78±2.42%. In the proximate analysis, the volatile matter content was 77.41±0.35%, the ash content was 0.11±0.06%, and the fixed carbon was 22.47±0.30%. The higher heating value was 20.02±0.05 MJ/kg and the energy density was 12,230.60±31.88 MJ/m³. The high calorific value, low ash production, and high energy density confirm the feasibility of this material for energy use.

Keywords: Biomass; Energy; Rondônia; Amazonian wood waste

1. Introdução

As crescentes necessidades energéticas para suprir as demandas das atividades agroindustriais, siderúrgicas e agropecuárias tornam os resíduos madeireiros florestais alternativas viáveis (Lima et al., 2020). De acordo com a Resolução Conama nº 497/2020 (Brasil, 2020), o rendimento volumétrico médio da indústria madeireira na Amazônia Legal é fixado em 35%. No entanto, muitas empresas do setor, em particular as voltadas para a exportação, operam com índices inferiores ao exigido pela legislação (Andrade et al., 2023), gerando um volume expressivo de resíduos que frequentemente sofrem descarte inadequado ou subaproveitamento.

Nesse contexto, a crescente demanda energética promove a valorização da biomassa residual para a geração de energia, transformando esse material e reduzindo o passivo ambiental. conhecer as propriedades físico-químicas dos resíduos de angelim-pedra (*Hymenolobium pulcherrimum* Ducke) possibilita a conversão de um passivo ambiental em subprodutos economicamente viáveis para sistemas de combustão direta, como caldeiras e fornos (Soteli et al., 2025).

Contudo, embora existam na literatura informações relacionadas à qualidade energética de resíduos madeireiros amazônicos, como teor de umidade, cinzas e densidade a granel, ainda são limitadas as informações específicas sobre as propriedades energéticas dos resíduos de *Hymenolobium pulcherrimum* Ducke. Nesse sentido, as características considerando suas propriedades físicas, químicas e energéticas, pode corroborar para ampliar o conhecimento sobre o potencial desses resíduos para o aproveitamento energético.

Com base nesse cenário de valorização da biomassa, o objetivo deste estudo foi avaliar o potencial energético do resíduo madeireiro da espécie Angelim-pedra (*Hymenolobium pulcherrimum* Ducke) a partir da caracterização de suas propriedades físicas, químicas e energéticas.

2. Material e métodos

2.1. Coleta e Origem do Material

O material residual analisado foi coletado na Madeflona Indústria Madeireira LTDA, localizada no município de Itapuã do Oeste, Rondônia, de onde se obtiveram cerca de 3 kg de resíduos na forma de refilos e destopos. Visando à preservação das características originais das

amostras, como o teor de umidade, o material foi acondicionado em sacos plásticos. O material coletado foi considerado como amostra composta, da qual foram retiradas subamostras para a realização das análises.

O estudo caracteriza-se como experimental, com abordagem quantitativa, voltado à caracterização físico-química e energética de resíduos lignocelulósicos de madeira amazônica.

2.2. Determinação das propriedades físicas

A densidade básica (ρb) foi determinada em 15 amostras oriundas do destopo pelo método do máximo teor de umidade, seguindo as diretrizes da norma NBR 11941 (ABNT, 2003). Por sua vez, a densidade a granel (ρg) foi obtida em quatro repetições, utilizando o material em condição de umidade de equilíbrio. Para a determinação da ρg, o material particulado foi vertido em um béquer de volume conhecido (250 mL) para a quantificação de sua massa, sendo o resultado expresso pela razão entre a massa da amostra e o volume ocupado.

Para a determinação da umidade em base seca (Ubs) e umidade úmida (Ubu) foram utilizadas 15 amostras seguindo a norma ASTM E871-82 (ASTM, 2019). As propriedades físicas analisadas foram selecionadas por sua influência direta na densidade energética, armazenamento e transporte da biomassa.

2.3. Caracterização química imediata e composição elementar estimada

O material moído e peneirado foi submetido à secagem em estufa de circulação forçada de ar e temperatura controlada (103 ± 5 °C) até atingir a massa constante. Posteriormente, o material foi utilizado para determinação do teor de materiais voláteis (MV), seguindo a norma ASTM D1762-84 (ASTM, 2021), e do teor de cinzas (CZ), conforme a norma TAPPI T211 om-93 (TAPPI, 1993), ambas realizadas em triplicatas. A partir dos resultados obtidos, o teor de carbono fixo (CF) foi calculado pela expressão: 100% - (MV + CZ).

Os teores de carbono (C), hidrogênio (H) e oxigênio (O) foram estimados com base nos valores de MV e CF obtidos na caracterização química imediata, conforme Parikh et al. (2007). A análise imediata foi empregada por sua ampla utilização na avaliação do comportamento térmico e energético de materiais lignocelulósicos.

2.4. Poder calorífico superior, inferior e líquido, densidade energética

O Poder Calorífico Superior (PCS) foi estimado através da análise imediata (CF, MV e CZ) com o modelo ajustado por Parikh et al. (2005). O Poder Calorífico Inferior (PCI) e o Poder Calorífico Líquido (PCL) foram estimados conforme sugerido por Brand (2010). A densidade energética (DE) foi calculada pelo produto entre PCS e ρb (Lima et al., 2020). A utilização de

modelos empíricos permite estimar o desempenho energético da biomassa de forma confiável, sendo amplamente adotada em estudos dessa natureza.

2.5. Análises estatísticas

Os dados foram analisados por meio de estatística descritiva, indicando a média e o desvio-padrão, sendo esse procedimento adequado para estudos de caracterização inicial, permitindo avaliar a variabilidade dos parâmetros analisados.

3. Resultados e discussão

3.1. Propriedades físicas

O resíduo lignocelulósico avaliado apresentou uma ρb de aproximadamente 54% maior em relação à ρg (Figura 1A). Além disso, a umidade em base seca mostrou-se superior à em base úmida (Figura 1B)

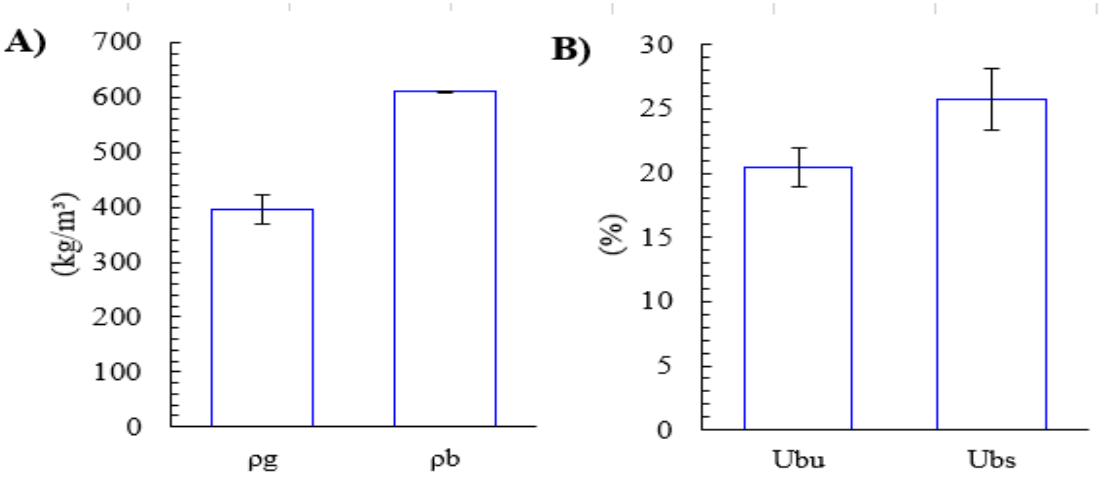


Figura 1 - Valores médios de densidade a granel (ρg) e densidade básica (ρb) (A), e teor de umidade em base úmida (Ubu) e base seca (Ubs) (B).

A densidade básica apresentou-se superior à densidade a granel devido à presença de espaços vazios entre as partículas do material solto deste, diferentemente da densidade básica, que considera a matriz contínua do material. Quando o material está na forma particulada, o ar ocupa os espaços interparticulares, o que eleva o volume total sem alterar a massa, consequentemente, a razão entre essas variáveis massa/volume tende a diminuir. De acordo com Yan et al. (2020), a densidade a granel tem relação com forma, tamanho das partículas e o teor de umidade.

No entanto, quando esse material particulado é transformado em pellets ou briquetes, ocorre a compactação da biomassa para atingir uma determinada densidade. Esse processo

reduz os espaços vazios e eleva a massa específica aparente, trazendo inúmeras vantagens, tais como, redução nos custos de transporte, otimização da logística de distribuição e armazenamento, maior estabilidade química e menor teor de umidade.

No que diz respeito à conversão energética de materiais lignocelulósicos, verifica-se uma correlação direta em que, quanto maior a densidade do material, maior será o seu potencial energético por unidade de volume. Segundo Cirilo et al. (2023), essa relação positiva ocorre porque materiais com maior densidade liberam energia de forma mais lenta e gradual, o que otimiza o aproveitamento do calor gerado durante o processo de combustão.

Ainda visando o potencial energético da biomassa o controle da umidade do material é um fator crítico e determinante, pois teores elevados de umidade comprometem negativamente o potencial energético do material no seu uso *in natura* (Dionizio et al., 2019). A umidade da matéria-prima afeta não apenas a eficiência energética e o processo de conversão, mas também pode determinar os custos com transporte e agregar valor no produto (Kizha & Han, 2017).

3.2. Caracterização química imediata e composição elementar

Como observado na Figura 2A, o maior constituinte da análise imediata é o MV com 77,41±0,35% e sua menor composição é o teor de CZ com 0,11±0,06%, restando cerca de 22% de CF. Já na composição elementar estimada o maior constituinte foi o C seguido pelo O.

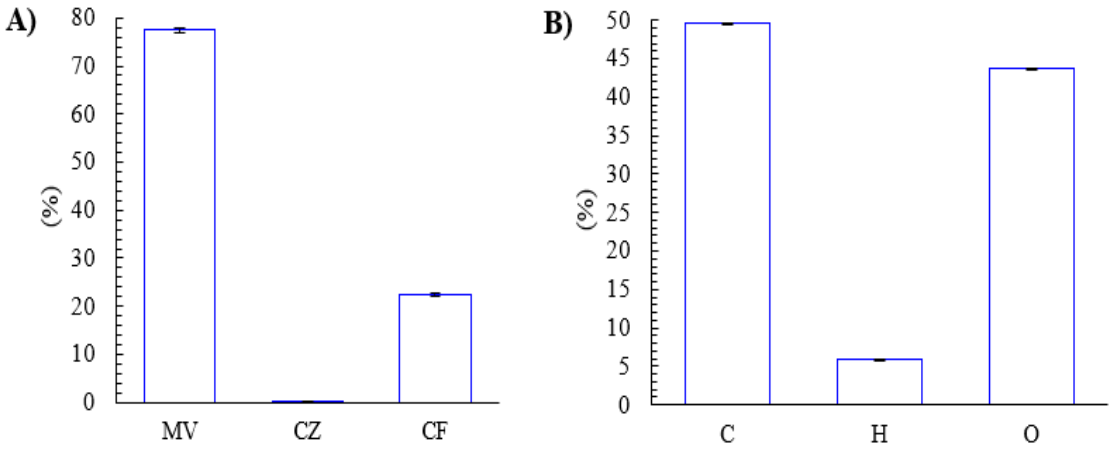


Figura 2 – A) Teor de Materiais Voláteis (MV), Cinzas (CZ) e Carbono Fixo (CF); e B) Teores de Carbono (C), Hidrogênio (H) e Oxigênio (O).

Os resultados de MV indicam que o material apresenta elevada reatividade térmica, com facilidade de ignição e rápida liberação de calor. Por outro lado, o CF sustenta o calor,

aumentando o rendimento energético. Já o baixo teor de CZ é um indicativo de eficiência na conversão térmica e de viabilidade operacional quanto à manutenção, uma vez que reduz os riscos de corrosão e a formação de escórias em equipamentos como grelhas, fornos e caldeiras, (Silveira et al., 2021). Neste estudo, não foi avaliada a composição química das cinzas, no entanto, Brand et al. (2021) relatam que proporções maiores de óxido de sódio, componente presente nas cinzas, favorecem a formação de escórias. De acordo com Ferreira et al. (2024), quanto menor o teor de cinzas e maior o de carbono fixo, melhor o desempenho energético da biomassa, pois isso indica um maior poder calorífico.

Valores aproximados para a composição elementar do angelim-pedra foram obtidos por Soteli et al. (2024) ao avaliarem resíduos madeireiros em municípios do Mato Grosso. Essa característica química é favorável à geração de energia térmica, visto em estudo realizado por Ferreira et al. (2024). O fato de a biomassa apresentar teores de C e H em proporção inversa ao de O estabelece uma correlação positiva com o aumento do poder calorífico.

3.3. Poder calorífico superior, inferior e líquido, densidade energética

Os valores de poder calorífico estimados e densidade energética de angelim-pedra estão apresentados no Tabela 1.

Tabela 1 – Valores de Poder Calorífico Superior (PCS), Inferior (PCI), Liquído (PCL) e Densidade Energética (DE)

PCS (MJ/kg)	PCI (MJ/kg)	PCL (MJ/kg)	DE (MJ/m³)
20,02 ± 0,05	18,66 ± 0,05	14,33 ± 0,04	12.230,60 ± 31,88

O poder calorífico superior mostrou-se elevado, valor este também encontrado por Soteli et al. (2025) em estudos com resíduos madeireiros de 17 espécies florestais, incluindo *Hymenolobium* sp. Nesse estudo, as espécies foram divididas por grupos, sendo que o grupo que apresentou correlação positiva com o poder calorífico superior foi justamente o da espécie estudada neste trabalho.

A diferença entre o PCS e o PCI está relacionada à perda pelo vapor de água formado durante a combustão, que também pode ser influenciada pelo teor de H, o qual foi de 5,91 ± 0,01%. Essa variação é ainda maior quando se observa o PCL, por conta do teor de umidade. Segundo Pereira et al. (2020), essas variáveis são inversamente proporcionais.

De acordo com as análises, a DE demonstra alta capacidade energética por m³ para a espécie Angelim-pedra. Essa elevada capacidade é devida à densidade básica do material analisado e ao seu poder calorífico. Moutinho et al. (2016), em estudo com a espécie *Bixa arborea*, puderam observar que a espécie de baixa densidade produz carvão de baixa densidade energética. No entanto, matérias-primas de baixa densidade pode ser compactadas, aumentando sua densidade e, consequentemente a densidade energética.

4. Conclusões

Os resíduos de Angelim-pedra apresentam elevado potencial energético, o que foi comprovado por suas propriedades físicas (densidades básica e a granel, e teor de umidade), químicas (análises elementar e imediata) e energéticas (poder calorífico e densidade energética). Os resultados permitiram concluir que o alto poder calorífico, a baixa produção de cinzas e a densidade energética indicam potencial para utilização energética.

5. Agradecimentos

À Universidade Federal de Rondônia - UNIR, à Madeireira Madeflona, pelo fornecimento dos materiais, Forest Ark e a Fundação de Amparo ao Desenvolvimento das Ações Científicas e Tecnológicas e à Pesquisa - FAPERO.

6. Referências bibliográficas

American Standard Test Methods. (2019). *ASTM E871-82: Standard Test Method for Moisture Analysis of Particulate Wood Fuels*. ASTM. https://store.astm.org/e0871-82r19.html

American Standard Test Methods. (2021). *ASTM D1762-84: Standard Test Method for Chemical Analysis of Wood Charcoal*. ASTM. https://store.astm.org/d1762-84r21.html

American Standard Test Methods. (2022). *ASTM D2395-17: Standard Test Methods for Density and Specific Gravity (Relative Density) of Wood and Wood-Based Materials*. ASTM. https://webstore.ansi.org/standards/astm/astmd2395172022

Andrade, K. D. C. D., Santos, A. P. F. D., Emmert, F., Santos, J. D., Lima, A. J. N., & Higuchi, N. Volumetric yield coefficient: the key to regulating virtual credits for Amazon wood. Acta Amazonica, 53(1), 1-8, 2023. https://doi.org/10.1590/1809-4392202101602

Brand, M. A. (2010). *Energia de Biomassa Florestal* (1. ed.). Interciência.

Brand, M. A., Henne, R. A., Schein, V. A. S., & Pereira, E. R. (2021). Mapeamento dos problemas associados à geração e tratamento das cinzas na combustão da biomassa florestal em caldeira. *Ciência Florestal*, *31*(3), 1167-1192. https://doi.org/10.5902/1980509835819

Brasil. Resolução nº 497 de 19 de agosto de 2020. Brasília, 2020. Disponível em: https://conama.mma.gov.br/index.php?option=com_sisconama&task=arquivo.download&id=796

Cirilo, N. R. M., Cupertino, G. F. M., de Medeiros, N. C. G., dos Santos, V. B., dos Santos Silvares, P. H., Nunes, S. M. V., ... & de Medeiros Neto, P. N. (2023). Lenha ou carvão vegetal? Avaliando o potencial energético da espécie Prosopis juliflora para indústria de cerâmica vermelha. Em *OPEN SCIENCE RESEARCH XI* (pp. 1204-1218). Editora Científica Digital. https://dx.doi.org/10.37885/230312564

Dionizio, A. F., do Vale, A. T., de Oliveira Moreira, A. C., Galvão, L. G. O., Chaves, B. S. A., & de Almeida Costa, M. (2019). Agregação de valor a resíduos agroindustriais para fins energéticos. *Revista de Ciências Agrárias*, 42(2), 528-538. https://doi.org/10.19084/rca.15129

Ferreira, G., Brito, T. M., Da Silva, J. G. M., Minini, D., Dias Júnior, A. F., Arantes, M. D. C., & Batista, D. C. (2023). Wood waste pellets as an alternative for energy generation in the Amazon Region. *BioEnergy Research*, 16(1), 472-483. https://doi.org/10.1007/s12155-022-10446-w

Ferreira, S. D. O. P. M., Ferreira, J. A. M., & Braz, R. L. (2024). Caracterização energética de biomassas agrícolas e florestais no estado de Pernambuco. *Ciência Florestal*, 34(3), e73324. https://doi.org/10.5902/1980509873324

Kizha, A. R., & Han, H. S. (2017). Moisture content in forest residues: An insight on sampling methods and procedures. *Current Forestry Reports*, 3(3), 202-212. https://doi.org/10.1007/s40725-017-0060-5

Lima, M. D. R., Barros Junior, U. O., Assis, M. R., Protásio, T. P., & Trugilho, P. F. (2020). Variabilidade das densidades básica e energética e estoque de carbono na madeira no fuste de clones de Eucalyptus. *Scientia Forestalis*, 48(128), e3302. https://doi.org/10.18671/scifor.v48n128.04

Moutinho, V. H. P., Rocha, J. J. M. D., Amaral, E. P. D., Santana, L. G. D. M., & Águiar, O. J. R. D. (2016). Propriedades químicas e energéticas de madeiras amazônicas do segundo ciclo de corte. *Florestas e Ambiente*, 23, 443-449. https://doi.org/10.1590/2179-8087.131715

Parikh, J., Channiwala, S. A., & Ghosal, G. K. (2005). A correlation for calculating HHV from proximate analysis of solid fuels. *Fuel*, 84(5), 487-494. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2004.10.010

Parikh, J., Channiwala, S. A., & Ghosal, G. K. (2007). A correlation for calculating elemental composition from proximate analysis of biomass materials. *Fuel*, 86(12-13), 1710-1719. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2006.12.029

Pereira, A. A., Lima, M. D. R., Patrício, E. P. S., Numazawa, S., Goulart, S. L., & Protásio, T. P. (2020). Agrupamento de resíduos madeireiros do manejo florestal sustentável visando à geração de bioenergia. *Scientia Forestalis*, 48(127), e3157. https://doi.org/10.18671/scifor.v48n127.01

Silveira, J. H., Dorneles, R. H. T., Sebben, V. H. A., Gasparin, F. P., & da Silva Ries, L. A. (2021). Caracterização da biomassa residual da colheita de Eucalyptus saligna para processos de conversão térmica. *Matéria (Rio de Janeiro)*, 26(4). https://dx.doi.org/10.37885/211006428

Soteli, R. P., de Oliveira Rodrigues, L. D., Pereira, B. L. C., de Paula Protásio, T., de Cássia Oliveira Carneiro, A., & Oliveira, A. C. (2024). Management and classification of waste from the primary processing of Brazilian Amazon tropical wood for energy-generation purposes: RP Soteli et al. *Environment, Development and Sustainability*, 26(6), 14065-14094. https://doi.org/10.1007/s10668-023-03179-z

Soteli, R. P., Mascarenhas, A. R. P., de Paula Protásio, T., Carvalho, A. M. M. L., da Rocha, K. J., Pereira, B. L. C., & Oliveira, A. C. (2025). Valorization and grouping of wood waste from sawmills in Amazonia for bioenergy. *Environmental Science and Pollution Research*, 32(31), 18745-18762. https://doi.org/10.1007/s11356-025-36781-x

Technical Association of the Pulp and Paper Industry. (1993). *TAPPI T 211 om-93: Ash in wood, pulp, paper and paperboard: combustion at 525 °C*. TAPPI.

Yan, J., Oyedeji, O., Leal, J. H., Donohoe, B. S., Semelsberger, T. A., Li, C., ... & Tanjore, D. (2020). Characterizing variability in lignocellulosic biomass: a review. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 8(22), 8059-8085. https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.9b06263

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Potencial energético e comportamento de pirólise de resíduos de acácia-negra e porongo

Isadora da Silva Mendes[1]; Leonardo Pereira Rupolo[1]; Pedro Henrique Biasi Frigo[1]; Talita Baldin[1]; Cristiane Pedrazzi[1]; Carine Setter[1]

1 Departamento de Ciências Florestais, Universidade Federal de Santa Maria – UFSM, Avenida Roraima 1000, Santa Maria 97105-900, RS, Brasil.

Resumo: O objetivo do estudo foi avaliar as características químicas, energéticas e o comportamento térmico de resíduos de acácia-negra e porongo, visando o seu aproveitamento para produção de biocombustíveis. Foram determinadas a composição química estrutural, imediata, além do poder calorífico superior estimado. O comportamento térmico foi analisado por termogravimetria sob atmosfera inerte, nas taxas de aquecimento de 5, 10, 15 e 20 °C min^{-1}. A acácia-negra apresentou maiores teores de materiais voláteis (82,83%) e holocelulose (77,78%), resultando em maiores taxas máximas de perda de massa. Já o porongo apresentou maiores teores de lignina (34,72%) e carbono fixo (23,13%), associados a temperaturas de pico inferiores e a menores taxas de desvolatilização. O aumento da taxa de aquecimento descolocou os picos de degradação para temperaturas mais elevadas. Conclui-se que ambas as biomassas apresentam potencial para conversão termoquímica, com a acácia mais favorável à produção de gases e vapores condensáveis e o porongo à obtenção de materiais carbonáceos.

Palavras-chave: Recursos Energéticos; TGA; Biomassa Lignocelulósica.

Energy potential and pyrolysis behavior of black wattle and bottle gourd residues

Abstract: The objective of this study was to evaluate the chemical and energy characteristics and thermal behavior of black wattle and bottle gourd residues, with a view to their use in biofuel production. Structural and proximate chemical compositions, as well as the estimated higher heating value, were determined. Thermal behavior was analyzed by thermogravimetry under an inert atmosphere at heating rates of 5, 10, 15, and 20 °C min^{-1}. Black wattle showed higher volatile matter (82.83%) and holocellulose (77.78%) contents, resulting in higher maximum mass-loss rates. Bottle gourd, in turn, showed higher lignin (34.72%) and fixed carbon (23.13%) contents, which were associated with lower peak temperatures and lower devolatilization rates. Increasing the heating rate shifted the degradation peaks to higher temperatures. It was concluded that both biomasses have potential for thermochemical conversion, with black wattle being more suitable for the production of gases and condensable vapors, and bottle gourd for obtaining carbonaceous materials.

Keywords: Energy Resources; TGA; Lignocellulosic Biomass.

1. Introdução

A crescente preocupação com as mudanças climáticas, a segurança energética e a transição para uma economia circular têm impulsionado o desenvolvimento de tecnologias voltadas à valorização de resíduos lignocelulósicos. Nesse cenário, a substituição parcial dos

combustíveis fósseis por fontes renováveis constitui uma estratégia para diversificar a matriz energética e reduzir os impactos ambientais associados à produção e ao consumo de energia. A biomassa lignocelulósica destaca-se entre as fontes renováveis por sua disponibilidade e possibilidade de conversão em energia, combustíveis e produtos de maior valor agregado. Considerada o recurso renovável mais abundante do planeta, a biomassa lignocelulósica possui produção anual estimada em 181,5 bilhões de toneladas, das quais apenas 8,2 bilhões são aproveitadas pela indústria (Paul & Dutta, 2018; Singh et al., 2022).

O Rio Grande do Sul, possui expressiva atividade agrícola, florestal e agroindustrial, responsável pela geração de diferentes resíduos lignocelulósicos. Entre as espécies florestais cultivadas no estado, destaca-se a acácia-negra (*Acacia mearnsii*), utilizada principalmente para a produção de tanino, madeira e energia. Seu processamento gera resíduos provenientes da colheita e do descascamento dos troncos, cuja valorização energética pode contribuir para o aproveitamento integral da matéria-prima. O estado também se destaca pela produção e processamento artesanal do porongo (*Lagenaria siceraria*), empregado principalmente na fabricação de cuias. Durante esse processamento, até 80% do volume inicial dos frutos pode ser transformado em resíduos (Nejeliski & Duarte, 2024). O descarte inadequado desses materiais representa perda de recursos e pode provocar impactos sanitários e ambientais, reforçando a necessidade de alternativas para sua valorização.

Entre as rotas de valorização, destaca-se a pirólise, processo que consiste na degradação da biomassa em atmosfera inerte, formando três frações principais: produto sólido, líquido e gasoso. A distribuição e as características desses produtos dependem tanto das condições operacionais, como temperatura, taxa de aquecimento e tempo de residência, quanto das propriedades da matéria-prima (Müsellim et al., 2018). Por exemplo, biomassas com elevado teor de materiais voláteis tendem a apresentar maior formação de compostos gasosos e vapores condensáveis, enquanto maiores teores de carbono fixo podem indicar maior tendência à formação de produtos sólidos. Além disso, as proporções de holocelulose, lignina, extrativos e minerais influenciam a estabilidade térmica e o perfil de degradação de cada biomassa.

Dessa forma, a caracterização química detalhada das biomassas é essencial para avaliar sua adequação à produção de biocombustíveis. A análise termogravimétrica (TGA) complementa essa caracterização ao permitir investigar o comportamento térmico da biomassa durante os processos de combustão e pirólise. Os dados termogravimétricos permitem acompanhar a variação da massa e a taxa de degradação em função do tempo e da

temperatura, sob atmosfera controlada (Müsellim et al., 2018). O conhecimento da composição química da biomassa e do seu comportamento térmico pode contribuir para a seleção das matérias-primas e para a definição de condições mais adequadas de pirólise. Diante disso, o objetivo do estudo foi caracterizar as propriedades químicas e energéticas, bem como o comportamento de degradação térmica de resíduos de acácia-negra e porongo provenientes do Rio Grande do Sul, visando avaliar seu potencial como matérias-primas para a produção de biocombustíveis.

2. Material e métodos

2.1 Preparo das biomassas

Os resíduos de acácia e porongo foram coletados, moídos em moinho tipo *Wiley* e classificados em peneiras de 40/60 *mesh*. Em seguida, as amostras foram secas em estufa a 103 °C até a massa constante e armazenadas para as análises posteriores.

2.2 Caracterização dos resíduos lignocelulósicos

A caracterização química imediata das biomassas foi realizada conforme a norma ASTM D1762-84 (ASTM, 2013), no qual foram quantificados os teores de umidade, materiais voláteis, cinzas e carbono fixo. A composição química estrutural foi avaliada a partir dos teores de extrativos totais, lignina insolúvel e holocelulose. Os extrativos totais foram determinados segundo a norma TAPPI 204 cm-97 (TAPPI, 2007), substituindo-se a mistura etanol/benzeno por etanol/tolueno. O teor de lignina insolúvel foi obtido pelo método de Klason modificado, conforme Gomide e Demuner, (1986). A fração de holocelulose foi calculada por diferença, considerando-se os teores de extrativos totais e lignina insolúvel. O poder calorífico superior (PCS) foi estimado a partir dos resultados da análise química imediata, utilizando-se a equação proposta por Parikh et al. (2005):

$$PCS\left(MJ\,kg^{-1}\right) = 0{,}3536 \times CF + 0{,}1559 \times MV - 0{,}0078 \times Cinzas \quad (1)$$

Em que CF corresponde ao teor de carbono fixo e MV ao teor de materiais voláteis, ambos expressos em porcentagem.

2.3 Termogravimetria

O estudo do comportamento térmico das biomassas foi realizado por termogravimetria (TGA), em um analisador Marca Shimadzu, Modelo TGA-50. Antes dos ensaios, as amostras foram classificadas em peneira de 200 *mesh*. Aproximadamente 4 mg de material foi inserido em cadinho de alumina e submetido ao aquecimento sob atmosfera inerte de nitrogênio gasoso, com pureza de 99,999% e fluxo de gás de 30 mL/min. Inicialmente, as amostras foram aquecidas da temperatura ambiente até 100 °C, à taxa de 50 °C min^{-1}, permanecendo nessa temperatura por 30 min para remoção da umidade. Em seguida, foram aquecidas até 900 °C, a fim de avaliar a degradação térmica do material lignocelulósico em função da perda de massa. As taxas de aquecimento utilizadas foram: 5, 10, 15 e 20 °C min^{-1}. Os dados de perda de massa (TG) e perda diferencial de massa (DTG) foram registrados pelo *software* do equipamento, com base nas variáveis de tempo e temperatura.

3. Resultados e discussão

3.1 Propriedades químicas e energéticas dos materiais lignocelulósicos

Os resultados das análises imediata, química estrutural, bem como os valores estimados do PCS, são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 – Composição química e energética da acácia-negra e do porongo

Propriedade	Acácia	Porongo
Química Imediata		
Teor de umidade (%)	7,76 (0,3462)	7,29 (0,3947)
Cinzas (%)	0,23 (1,2378)	4,38 (1,0052)
Carbono Fixo (%)	16,36 (1,0460)	23,13 (0,1959)
Materiais voláteis (%)	82,83 (1,4387)	72,50 (0,8166)
Química Estrutural		
Extrativos (%)	2,35 (0,1338)	5,63 (0,0757)
Holocelulose (%)	77,78 (0,8326)	54,45 (0,1966)
Lignina insolúvel (%)	13,66 (0,1643)	34,72 (0,8963)
PCS (MJ kg^{-1})[a]	18,79 (0,2121)	19,44 (0,1679)

[a] Valores estimados a partir da análise imediata pela equação de Parikh et al. (2005). Valores entre parênteses correspondem ao desvio padrão.

Ambas as biomassas apresentaram umidade inferior a 10%, condição favorável para o aproveitamento energético. A baixa umidade reduz a energia necessária à evaporação da água durante a conversão térmica e evita a diluição excessiva do bio-óleo. Teores de umidade entre 5,9 e 8,2% foram considerados adequados para a conversão por pirólise sem necessidade de secagem adicional (Mohammad et al., 2025).

O teor de cinzas da acácia-negra foi de 0,23%, aproximadamente 19 vezes inferior ao do porongo. As cinzas correspondem à fração mineral não combustível e, quando presentes em maiores proporções, podem reduzir o poder calorífico, favorecer a formação de depósitos e causar problemas operacionais nos equipamentos (Ahmed et al., 2020; Müsellim et al., 2018). Dessa forma, o baixo teor de cinzas da acácia constitui uma característica favorável para sua conversão termoquímica.

Os teores de materiais voláteis variaram de 72,50%, para o porongo, a 82,83%, para a acácia. A maior fração de voláteis da acácia indica maior reatividade, bem como maior liberação de gases e vapores condensáveis durante o aquecimento, podendo favorecer a produção de bio-óleo e gases combustíveis. Em contraste, o porongo apresentou maior teor de carbono fixo (23,13%), sugerindo maior tendência à formação de produtos sólidos. Os resultados da composição estrutural ajudam a explicar as diferenças observadas na composição química imediata. A acácia-negra apresentou maior teor de holocelulose e menor teor de lignina (Tabela 1). Biomassas com maior proporção de celulose e hemiceluloses tendem a apresentar degradação mais rápida e maior liberação de materiais voláteis (Ballice et al., 2020), o que explica a maior fração volátil da acácia.

Por outro lado, o porongo se destacou pelo elevado teor de lignina, polímero que se decompõe lentamente em uma ampla faixa de temperatura e contribui para a formação de estruturas carbonáceas. Assim, o maior teor de lignina do porongo está relacionado ao seu maior teor de carbono fixo e ao potencial de formação de carvão. A lignina possui alto teor de carbono e ligações químicas que resistem a altas temperaturas, contribuindo positivamente para o poder calorífico do material e para a produção de carvão (Farrokh et al., 2019; Vieira et al., 2023).

O porongo também apresentou maior teor de extrativos (5,63%), em relação à acácia (2,35%). A influência dos extrativos no aproveitamento energético depende de sua composição química. Frações ricas em compostos apolares e carbono podem contribuir para o aumento do poder calorífico, enquanto extrativos mais oxigenados apresentam menor contribuição energética (Vieira et al., 2023). O PCS estimado foi ligeiramente superior para o

porongo o que pode estar associado ao maior teor de carbono fixo e à maior proporção de lignina.

3.2 Comportamento térmico das biomassas lignocelulósicas

Os perfis de perda de massa (TG) e derivada da perda de massa (DTG) dos resíduos de acácia-negra e porongo são apresentados na Figura 1.

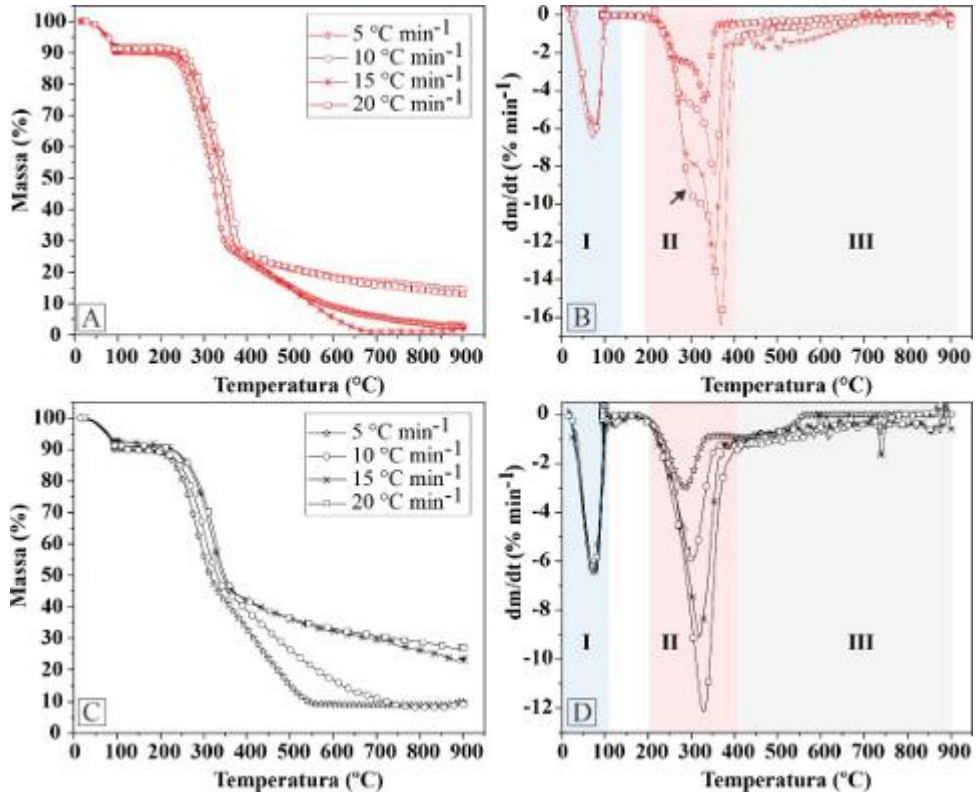


Figura 1 – Curvas TG e DTG dos resíduos de acácia-negra e porongo nas taxas de aquecimento de 5, 10, 15 e 20 °C min^{-1}; (A) TG da acácia-negra; (B) DTG da acácia-negra; (C) TG do porongo; (D) DTG do porongo.

De modo geral, as curvas TG e DTG evidenciaram três estágios característicos da pirólise de biomassas lignocelulósicas. No estágio I, observado até aproximadamente 100 °C, ocorreu pequena redução da massa, associada principalmente à remoção da água adsorvida, além da possível volatilização de compostos orgânicos de baixa massa molecular. No estágio II, compreendido predominantemente entre 200 e 400 °C, observa-se a maior perda de massa de ambas as biomassas. Nessa faixa ocorre a sobreposição das reações de degradação das hemiceluloses e celulose, além da degradação parcial da lignina e de outros compostos orgânicos (Gupta et al., 2022). As hemiceluloses, degradam-se principalmente entre 200 e

315 °C, enquanto a celulose apresenta degradação mais intensa entre 315 e 400 °C. A lignina, por sua estrutura aromática complexa e pela diversidade de ligações químicas, apresenta degradação mais lenta e distribuída em ampla faixa de temperatura, podendo se estender de 160 a 900 °C (Liu et al., 2021; Setter e Oliveira, 2022).

Nas curvas DTG da acácia-negra (Fig. 1B), observa-se ainda um ombro antes do pico principal, em todas as taxas de aquecimento. Esse evento pode estar associado à degradação inicial das hemiceluloses, seguida pelo pico predominante da celulose (Ballice et al., 2020). O estágio III ocorreu após aproximadamente 400 °C e foi caracterizado pela perda de massa lenta e contínua. Essa etapa está relacionada principalmente à degradação residual da lignina e dos carboidratos que não foram completamente degradados, bem como às reações secundárias de condensação e reorganização das estruturas carbonáceas.

O aumento da taxa de aquecimento deslocou as curvas TG e os picos de DTG para temperaturas mais elevadas e aumentou as taxas máximas de perda de massa. Em taxas mais altas, a superfície das partículas aquece mais rapidamente do que seu interior, produzindo gradientes térmicos e limitações de transferência de calor e massa. Como consequência, são necessárias temperaturas mais elevadas para que a amostra alcance o mesmo grau de conversão. Ballice et al. (2020) observaram comportamento semelhante e relacionaram esse deslocamento ao atraso térmico entre a superfície e o interior das partículas. Esse resultado também foi observado anteriormente na pirólise da casca de café, em que o aumento da taxa de aquecimento deslocou as curvas de perda de massa e seus máximos para temperaturas superiores (Setter et al., 2020). Os parâmetros de degradação térmica das biomassas são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 – Parâmetros de degradação térmica dos resíduos de acácia-negra e porongo em diferentes taxas de aquecimento

Biomassa	**Taxa de aquecimento (°C min^{-1})**	**$T_{MÁX}$ (% min^{-1})**	**T_P (°C)**	**T_i (°C)**
Acácia-negra	5	-4,5843	331,95	241,79
	10	-8,4405	354,01	252,12
	15	-13,6862	353,94	242,82
	20	-16,4161	369,08	249,89
Porongo	5	-2,9971	284,74	231,65
	10	-5,9022	302,51	248,06
	15	-9,0889	319,87	252,85

	20	-12,1485	329,09	267,21

$T_{MÁX}$ é a taxa máxima de perda de massa; T_P é a temperatura do pico de degradação e; T_i é a temperatura inicial de degradação.

Para a acácia-negra, a T_i de degradação variou entre 241,79 e 252,12 °C, com pequenas variações entre as taxas avaliadas. Para o porongo, o início da degradação térmica aumentou de 231,65 para 267,21 °C, com a elevação da taxa de aquecimento de 5 para 20 °C min^{-1}. Diferenças mais evidentes foram observadas nas temperaturas dos picos principais e nas taxas máximas de perda de massa. Para a acácia, a temperatura de pico aumentou de 331,95 para 369,08 °C entre as taxas de 5 e 20 °C min^{-1}. Para o porongo, os valores variaram de 284,74 a 329,09 °C. Assim, em todas as condições avaliadas, o porongo atingiu a taxa máxima de degradação térmica em temperaturas inferiores às da acácia. Além disso, apresentou menores taxas máximas de perda de massa em todas as taxas de aquecimento. Esse comportamento está associado às diferenças na composição química das biomassas lignocelulósicas, conforme discutido anteriormente (Seção 3.1).

Os picos mais intensos e estreitos da acácia são coerentes com seu elevado teor de holocelulose (77,78%) e menor teor de lignina (13,66%). Biomassas com maiores teores de celulose e hemiceluloses tendem a apresentar desvolatilização mais rápida e intensa. Protásio et al. (2021) observaram que maiores teores de holocelulose e menores proporções de lignina aumentaram a taxa máxima de degradação térmica. Também foi relatada correlação positiva entre o teor de celulose e a taxa máxima de perda de massa (Liu et al., 2021). Em contraste, as curvas DTG do porongo apresentaram picos menos intensos, o que está associado ao seu maior teor de lignina (34,72%). Conforme explicado anteriormente, a lignina inicia sua degradação em temperaturas relativamente baixas (~160 °C), mas sua degradação pode se prolongar até aproximadamente 900 °C, acompanhada por reações de condensação e formação de estruturas carbonáceas aromáticas. Além disso, as menores temperaturas de degradação observadas para o porongo podem estar relacionadas aos seus maiores teores de extrativos e cinzas. Extrativos de baixa massa molecular e menor estabilidade térmica podem volatilizar em temperaturas menores, enquanto alguns elementos minerais, como K, Ca, Na Mg e Fe, presentes nas cinzas podem catalisar as reações de despolimerização e antecipar o início da degradação térmica (Protásio et al., 2021).

4. Conclusões

Os resíduos de acácia-negra e porongo apresentaram características favoráveis ao aproveitamento energético, porém com comportamentos distintos. A acácia destacou-se pelos maiores teores de holocelulose, materiais voláteis e baixo teor de cinzas, apresentando maior intensidade de desvolatilização, temperaturas de pico mais elevadas e maiores taxas máximas de perda de massa. Essas características indicam maior potencial para a formação de gases e vapores condensáveis. O porongo, por sua vez, apresentou maiores teores de lignina e carbono fixo, sugerindo maior tendência à formação de materiais carbonáceos. Sua taxa máxima de perda de massa ocorreu em temperaturas inferiores e com menor intensidade, comportamento associado ao maior teor de lignina. Os dados desse estudo podem contribuir para compreender o comportamento dessas biomassas em processos de pirólise e direcionar as condições operacionais conforme o produto de interesse.

5. Agradecimentos

Os autores agradecem às instituições brasileiras CAPES (Agência Federal de Apoio ao Ensino Superior), CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) e à FAPERGS (Fundação de Amparo à Pesquisa do Rio Grande do Sul) pelo apoio a essa pesquisa (Termo de Outorga 25/2551-0000827-1 – Edital FAPERGS 10/2024 – Auxílio recém-doutor ou recém-contratado – ARD/ARC).

6. Referências bibliográficas

Ahmed, A., Abu Bakar, M. S., Hamdani, R., Park, Y.-K., Lam, S. S., Sukri, R. S., Hussain, M., Majeed, K., Phusunti, N., Jamil, F., & Aslam, M. (2020). Valorization of underutilized waste biomass from invasive species to produce biochar for energy and other value-added applications. *Environmental Research*, *186*, 109596. https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.109596

ASTM. (2013). *Standard Test Method for Chemical Analysis of Wood Charcoal D1762-84*. ASTM International. https://doi.org/10.1520/D1762-84R21

Ballice, L., Sert, M., Sağlam, M., & Yüksel, M. (2020). Determination of Pyrolysis Kinetics of Cellulose and Lignin Fractions Isolated from Selected Turkish Biomasses. *Arabian Journal for Science and Engineering*, *45*(9), 7429–7444. https://doi.org/10.1007/s13369-020-04594-4

de Paula Protásio, T., da Costa, J. S., Scatolino, M. V., Lima, M. D. R., de Assis, M. R., da Silva, M. G., Bufalino, L., Dias Junior, A. F., & Trugilho, P. F. (2021). Revealing the influence of chemical compounds on the pyrolysis of lignocellulosic wastes from the Amazonian production chains. *International Journal of Environmental Science and Technology*, *19*(5), 4491–4508. https://doi.org/10.1007/s13762-021-03416-w

Farrokh, N. T., Suopajärvi, H., Sulasalmi, P., & Fabritius, T. (2019). A thermogravimetric analysis of lignin char combustion. *Energy Procedia*, *158*, 1241–1248.

Gomide, J. L., & Demuner, B. J. (1986). Determinação do teor de lignina em material lenhoso: Método Klason modificado. *O papel*, *47*(8), 36–38.

Gupta, T., Kumar, M., Upadhyay, S. N., Mishra, P. K., & Jaiswal, A. K. (2022). Effect of hot water extraction on pyrolysis of tender coconut fruit biomass: Kinetic and thermodynamic parameters. *Biomass Conversion and Biorefinery*, *13*(13), 11703–11725. https://doi.org/10.1007/s13399-021-02265-4

Liu, Y., Wu, S., Zhang, H., & Xiao, R. (2021). Fast pyrolysis of holocellulose for the preparation of long-chain ether fuel precursors: Effect of holocellulose types. *Bioresource Technology*, *338*, 125519. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.125519

Mohammad, O., Khan, M., Unyay, H., Ślężak, R., Szufa, S., & Onwudili, J. A. (2025). Assessments of sustainable chemicals and bioenergy potentials of selected lignocellulosic biomass feedstocks in Poland via physicochemical characterisation and pyrolysis. *Biomass and Bioenergy*, *203*, 108302. https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2025.108302

Müsellim, E., Tahir, M. H., Ahmad, M. S., & Ceylan, S. (2018). Thermokinetic and TG/DSC-FTIR study of pea waste biomass pyrolysis. *Applied Thermal Engineering*, *137*, 54–61.

Nejeliski, D. M., & Duarte, L. C. (2024). Caracterização dos resíduos de porongo (Lagenaria siceraria) para o aproveitamento no Design de Produto. Em *Design em Pesquisa* (V. 6, p. 9–24). Marcavisual. http://www.ufrgs.br/iicd/publicacoes/livros

Parikh, J., Channiwala, S. A., & Ghosal, G. K. (2005). A correlation for calculating HHV from proximate analysis of solid fuels. *Fuel*, *84*(5), 487–494. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2004.10.010

Paul, S., & Dutta, A. (2018). Challenges and opportunities of lignocellulosic biomass for anaerobic digestion. *Resources, Conservation and Recycling*, *130*, 164–174. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.12.005

Setter, C., & Oliveira, T. J. P. (2022). Evaluation of the physical-mechanical and energy properties of coffee husk briquettes with kraft lignin during slow pyrolysis. *Renewable Energy*, *189*, 1007–1019. https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.03.077

Setter, C., Silva, F. T. M., Assis, M. R., Ataíde, C. H., Trugilho, P. F., & Oliveira, T. J. P. (2020). Slow pyrolysis of coffee husk briquettes: Characterization of the solid and liquid fractions. *Fuel*, *261*, 116420. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.116420

Singh, B., Korstad, J., Guldhe, A., & Kothari, R. (2022). Editorial: Emerging Feedstocks & Clean Technologies for Lignocellulosic Biofuel. *Frontiers in Energy Research*, *10*. https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fenrg.2022.917081

TAPPI. (2007). *204 cm-97. Solvent Extractive of Wood and Pulp*. TAPPI Press: Atlanta, GA, USA.

Vieira, T. A. S., Trugilho, P. F., Carabineiro, S. A. C., Zanuncio, A. J. V., Carvalho, A. G., & Branco-Vieira, M. (2023). Impact of Chemical Composition on Eucalyptus Wood Clones for Sustainable Energy Production. *Forests*, *14*(11), 2240. https://doi.org/10.3390/f14112240

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Produção de açúcares pirolíticos a partir de biomassa lignocelulósica

Patrick Gomes da Silva Coelho[1]; Geraldo Ferreira David[1]; Fernando José Borges Gomes[1]; Roberto Carlos Costa Lelis[1]; Karen Valverde Pontes Vater[2]; Sergio Antonio Fernandes[3]

[1] Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro
[2] Universidade Federal da Bahia
[3] Universidade Federal de Viçosa

Resumo:

A valorização de resíduos lignocelulósicos por rotas termoquímicas constitui uma alternativa promissora para a produção de bioenergia, biocombustíveis e compostos químicos de maior valor agregado. Neste trabalho, foram avaliados seis lotes de resíduos lignocelulósicos, constituídos por misturas heterogêneas de resíduos de madeira provenientes de podas urbanas, pallets, móveis e embalagens de madeira, além de outros materiais lignocelulósicos gerados por atividades industriais, comerciais e de serviços. Os seis lotes foram submetidos à pirólise a 500 °C, sob atmosfera inerte de nitrogênio, para a produção de bio-óleo. Os bio-óleos obtidos foram caracterizados por cromatografia gasosa acoplada à espectrometria de massas (CG-MS), permitindo a identificação de diferentes classes de compostos, com destaque para os anidroaçúcares. A composição relativa desses carboidratos variou entre 9,48 e 27,98%, evidenciando diferenças na composição química das matérias-primas avaliadas. Entre os compostos identificados, destacou-se a levoglucosana, principal anidroaçúcar proveniente da decomposição térmica da celulose, cuja maior área relativa observada foi de 22,77%. Nessa amostra, a levoglucosana representou aproximadamente 92,6% da área relativa atribuída aos anidroaçúcares. Os resultados demonstram que a heterogeneidade e a natureza dos resíduos influenciam a composição química do bio-óleo e a distribuição dos produtos derivados dos carboidratos. A presença significativa de levoglucosana evidencia o potencial de valorização dos bio-óleos como fonte de intermediários renováveis para processos químicos e biotecnológicos, incluindo sua possível aplicação em rotas de produção de etanol de segunda geração, contribuindo para o aproveitamento integrado da biomassa no contexto de biorrefinarias.

Palavras-chave: Levoglucosana; Biorrefinaria; Conversão termoquímica.

Production of pyrolytic sugars from lignocellulosic biomass seeking

Abstract: The valorization of lignocellulosic residues through thermochemical conversion routes represents a promising alternative for the production of bioenergy, biofuels, and higher-value-added chemicals. In this study, six batches of lignocellulosic residues were evaluated, consisting of heterogeneous mixtures of wood residues from urban pruning, pallets, furniture, and wooden packaging, as well as other lignocellulosic materials generated by industrial, commercial, and service activities. The six batches were subjected to pyrolysis at 500 °C under an inert nitrogen atmosphere for bio-oil production. The resulting bio-oils were characterized by gas chromatography coupled with mass spectrometry (GC–MS), enabling the identification of different classes of compounds, with particular emphasis on anhydrosugars. The relative proportion of carbohydrates ranged from 9.48 to 27.98%, revealing differences among the evaluated feedstocks. Among these compounds, levoglucosan, the main anhydrosugar derived from the thermal decomposition of cellulose, reached a maximum relative peak area of 22.77%. In this sample, levoglucosan accounted for approximately 92.6% of the relative area attributed to anhydrosugars. The results demonstrate that the nature and heterogeneity of the lignocellulosic residues influence the chemical composition of the bio-oil and the distribution of carbohydrate-derived products. The significant presence of levoglucosan highlights the potential of bio-oils as a source of renewable intermediates for chemical and biotechnological processes, including their potential application in second-generation ethanol production routes, contributing to the integrated valorization of biomass in biorefinery systems.

Keywords: Levoglucosan; Biorefinery; Thermochemical conversion.

1. Introdução

A crescente demanda energética mundial e a necessidade de reduzir a dependência de combustíveis fósseis têm impulsionado a busca por fontes renováveis de energia. Nesse contexto, a biomassa destaca-se por sua disponibilidade e potencial de conversão em biocombustíveis e produtos de valor agregado. Particularmente, os resíduos lignocelulósicos dos setores agrícola, florestal e agroindustrial representam matérias-primas promissoras para o desenvolvimento de rotas sustentáveis de aproveitamento energético (Iqbal; Kyazze; Keshavarz, 2013). A utilização desses recursos também está associada aos princípios da economia circular e da bioeconomia, ao promover a reinserção de resíduos em novas cadeias produtivas (Álvarez et al., 2024).

Entre as tecnologias termoquímicas disponíveis, a pirólise rápida destaca-se como uma alternativa para a conversão de resíduos lignocelulósicos. O processo promove a decomposição térmica da matéria orgânica em condições de ausência ou baixa disponibilidade de oxigênio, originando produtos nas fases sólida, líquida e gasosa (Bridgwater, 2012; Zadeh et al., 2020). A fase liquida, o bio-óleo, apresenta composição química complexa, resultante da decomposição térmica dos constituintes estruturais da biomassa. Entre seus componentes encontram-se fenóis, cetonas, aldeídos, álcoois, ácidos orgânicos e diferentes produtos derivados dos carboidratos (Lachos-Perez et al., 2023). Embora possa ser empregado para fins energéticos, suas propriedades físico-químicas podem limitar a utilização direta como combustível, tornando relevantes estratégias alternativas de aproveitamento de seus constituintes (Zadeh et al., 2020). Nesse sentido, a recuperação e conversão de moléculas específicas presentes no bio-óleo representam uma possibilidade de integração entre a produção de bioenergia e a obtenção de produtos de maior valor agregado.

Durante a pirólise da fração de carboidratos, especialmente da celulose, são formados diferentes compostos, entre os quais se destacam os anidroaçúcares, formados a partir de reações de desidratação e rearranjo das unidades de glicose durante a decomposição térmica. Sob condições adequadas de pirólise, a formação desses compostos pode ser favorecida, destacando-se a levoglucosana como um dos principais produtos derivados da celulose (David et al., 2017).

A levoglucosana (1,6-anidro-β-D-glicopiranose) destaca-se como um dos principais produtos da decomposição térmica da celulose e apresenta interesse tanto energético quanto químico. Trata-se de uma molécula plataforma com potencial de utilização na obtenção de

diferentes produtos, incluindo ácido cítrico, lipídios, 5-hidroximetilfurfural, solventes e etanol (David et al., 2021).

Esses açúcares são de interesse para a produção de etanol de segunda geração, uma vez que os açúcares pirolíticos recuperados do bio-óleo podem ser submetidos a etapas de separação, hidrólise e fermentação. Bio-óleos contendo levoglucosana têm sido apontados como potenciais intermediários para a produção de bioetanol, ampliando as possibilidades de integração entre processos termoquímicos e fermentativos (David et al., 2018).

Nesse contexto, a pirólise rápida destaca-se não apenas como uma tecnologia para a conversão de resíduos lignocelulósicos em produtos energéticos, mas também como uma rota integrada ao conceito de biorrefinaria, possibilitando o aproveitamento das diferentes frações da biomassa para a obtenção de biocombustíveis e compostos químicos de maior valor agregado. A utilização de resíduos lignocelulósicos como matéria-prima neste estudo justifica-se pela necessidade de desenvolver alternativas para a valorização de materiais residuais de origem heterogênea e, principalmente, pelo seu potencial como fonte de carboidratos estruturais. Durante a pirólise, a fração de carboidratos, especialmente a celulose, pode ser convertida em anidroaçúcares, entre os quais se destaca a levoglucosana, composto de interesse como intermediário em processos químicos e biotecnológicos. Dessa forma, a conversão termoquímica desses resíduos representa uma estratégia para agregar valor a materiais residuais e, simultaneamente, obter produtos com potencial de aplicação em rotas de produção de biocombustíveis. Contudo, este trabalho teve como objetivo avaliar o potencial de diferentes resíduos lignocelulósicos como matérias-primas para a produção de bio-óleo por pirólise rápida e caracterizar a composição química, com ênfase nos anidroaçúcares, visando avaliar seu potencial em rotas de produção de etanol de segunda geração.

2. Material e métodos

2.1 Coleta e preparação das matérias-primas

Foram coletados seis lotes de resíduos lignocelulósicos provenientes de uma empresa especializada no processamento e beneficiamento de resíduos de madeira, localizada no estado do Rio de Janeiro, com capacidade instalada de processamento de aproximadamente 12 mil toneladas por mês. Os lotes foram coletados entre os meses de fevereiro a abril de 2025, constituídos por misturas heterogêneas de materiais lignocelulósicos, incluindo resíduos de madeira provenientes de podas urbanas, pallets, móveis e embalagens de madeira, além de outros resíduos gerados por atividades industriais, comerciais e de serviços.

Após a coleta, os resíduos foram encaminhados ao Laboratório de Biorrefinaria Lignocelulósica da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (UFRRJ). Inicialmente, os materiais foram secos ao ar até atingirem a umidade de equilíbrio. O teor de umidade foi determinado pelo método gravimétrico, mediante pesagem das amostras antes e após secagem em estufa a 105 ± 2 °C até massa constante, sendo obtido um teor de umidade de equilíbrio de aproximadamente 11%.

Em seguida, os resíduos foram moídos e classificados de modo a obter partículas com dimensões entre 1 e 2 mm. As amostras foram posteriormente homogeneizadas e armazenadas até sua utilização nos experimentos de pirólise e nas análises de caracterização química.

2.2 Pirólise dos resíduos lignocelulósicos

Antes dos ensaios de pirólise, as amostras foram submetidas à secagem em estufa com circulação forçada de ar a 105 °C até massa constante. Os experimentos de pirólise foram realizados em um reator de leito fixo, operando em batelada, à temperatura de 500 °C, sob atmosfera inerte de nitrogênio, empregado como gás de arraste, com vazão de 15 mL min^{-1}. Em cada ensaio foram processados 30 g de biomassa seca.

Os vapores gerados durante a decomposição térmica foram conduzidos ao sistema de condensação para obtenção do bio-óleo, enquanto o material sólido remanescente foi recuperado ao final do processo como bio-carvão. Os rendimentos dos produtos da pirólise foram determinados por gravimetria: a) bio-óleo; b) bio-carvão e c) gases não condensáveis, determinados por diferença em relação à massa inicial da biomassa processada. Os experimentos foram realizados em duplicata, para cada amostra.

2.3 Análise da composição química por cromatografia gasosa acoplada à espectrometria de massas (CG-MS)

A composição química dos bio-óleos foi determinada por cromatografia gasosa acoplada à espectrometria de massas (CG-MS), utilizando um cromatógrafo gasoso GC-2010 Plus acoplado a um espectrômetro de massas GCMS-QP2010 Ultra (Shimadzu Corp., Kyoto, Japão).

As amostras de bio-óleo foram preparadas por diluição em acetona na concentração de 10 mg mL^{-1}. A acetona foi selecionada devido à sua capacidade de solubilização, elevada volatilidade e compatibilidade com análises por CG-MS. As análises foram realizadas usando uma coluna capilar Rtx-5MS (Restek Corp., Bellefonte, PA, EUA), com dimensões de 30 m × 0,25 mm de diâmetro interno × 0,25

µm de espessura de filme. A temperatura do injetor foi mantida em 290 °C, enquanto a interface entre o cromatógrafo e o espectrômetro de massas foi mantida a 290 °C.

A programação de temperatura do forno iniciou em 40 °C, permanecendo nessa temperatura por 1 min. Em seguida, a temperatura foi programada para 280 °C à taxa de 6 °C min^{-1}, permanecendo em 280 °C por 15 min.

O hélio foi utilizado como gás de arraste, com vazão de 1 mL min^{-1}. As injeções foram realizadas no modo split, utilizando razão de divisão (split ratio) de 5:1.

A identificação dos compostos foi realizada por comparação dos espectros de massas obtidos com as bibliotecas espectrais NIST (2005, 2008, 2011 e 2014) e Wiley 7/Wiley 10, considerando a similaridade espectral entre os compostos analisados e os registros das bibliotecas.

3. Resultados e discussão

A pirólise dos diferentes lotes de resíduos lignocelulósicos resultou na obtenção de bio-óleos com composição química diversificada. A caracterização por CG-MS permitiu identificar e comparar as principais classes de compostos presentes nos bio-óleos, possibilitando avaliar a influência das diferentes matérias-primas sobre a distribuição dos produtos formados.

A caracterização por CG-MS evidenciou diferenças na distribuição das classes químicas entre os bio-óleos obtidos (Figura 1). Fenóis, cetonas, anidroaçúcares e compostos aromáticos constituíram as principais classes identificadas, enquanto carbonílicos/ácidos, ésteres e álcoois/polióis apresentaram menor concentração relativa. A elevada presença de compostos fenólicos, particularmente na Amostra 4, está associada à conversão termoquímica da fração de lignina presente na amostra, enquanto cetonas e outros compostos oxigenados resultam das diferentes reações de decomposição dos constituintes lignocelulósicos. Destaca-se a presença expressiva de anidroaçúcares em todas as amostras, variando de 9,48 a 27,98% da área relativa, evidenciando a conversão da fração de carboidratos em açúcares pirolíticos. A ocorrência desses compostos justifica sua avaliação mais detalhada, especialmente da levoglucosana, devido ao seu potencial como intermediário em rotas de produção de biocombustíveis, incluindo o bioetanol de segunda geração.

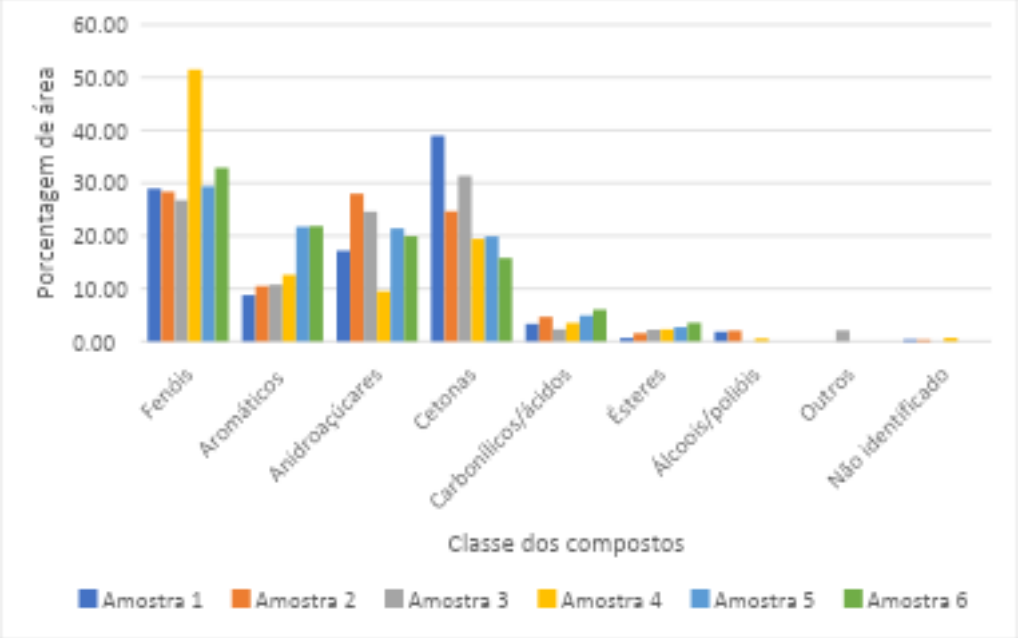


Figura 1. Distribuição das principais classes químicas identificadas por CG-MS nos bio-óleos obtidos por pirólise rápida das diferentes amostras de resíduos lignocelulósicos.

A formação de anidroaçúcares apresentou variação expressiva entre os bio-óleos, com áreas relativas entre 9,48 e 27,98%, demonstrando diferenças na conversão térmica da fração de carboidratos entre as matérias-primas avaliadas (Figura 2). A Amostra 2 apresentou a maior participação dessa classe de compostos orgânicos formados (27,98%), seguida pelas Amostras 3 (24,58%) e 5 (21,41%), enquanto a Amostra 4 apresentou o menor valor (9,48%). Essa variabilidade pode estar associada, principalmente, às diferenças na composição dos resíduos, incluindo o conteúdo e a natureza da fração de carboidratos, que podem favorecer rotas competitivas de fragmentação e desidratação durante a pirólise.

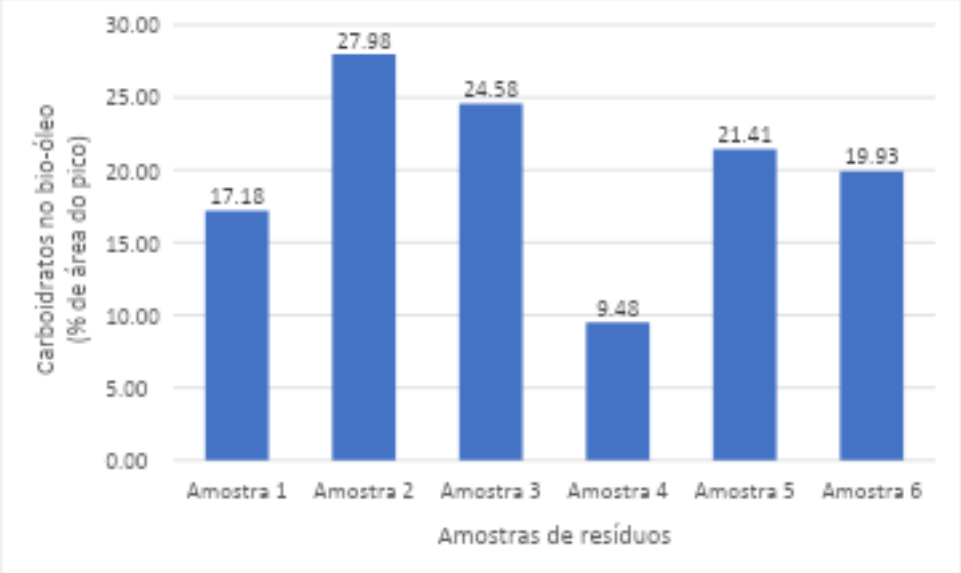


Figura 2. Distribuição relativa de anidroaçúcares nos bio-óleos obtidos por pirólise rápida das diferentes amostras de resíduos.

Na Figura 3, apresenta a formação de levoglucosana durante a pirolise rápida. Este carboidrato é produto característico da despolimerização térmica da celulose, a maior área relativa foi observada na Amostra 3 (22,77%), seguida pelas Amostras 5 (17,25%) e 6 (15,56%). Na Amostra 3, a levoglucosana representou aproximadamente 92,6% da área relativa atribuída aos anidroaçúcares, evidenciando sua predominância entre os compostos dessa classe identificados no bio-óleo. Por outro lado, a Amostra 2 apresentou a maior proporção global de anidroaçúcares, porém menor contribuição de levoglucosana, demonstrando que o aumento dessa classe química não está necessariamente associado a uma maior presença desse composto específico. Entre os materiais avaliados, a Amostra 3 destacou-se pelo maior conteúdo relativo de levoglucosana, indicando maior potencial para sua recuperação e posterior valorização química.



Figura 3. Área relativa de levoglucosana identificada por CG-MS nos bio-óleos obtidos por pirólise rápida das diferentes amostras de resíduos.

Os lotes de resíduos lignocelulósicos apresentaram natureza heterogênea e não foi realizada a caracterização química dos lotes das matérias-primas quanto aos teores de celulose, hemiceluloses, lignina, extrativos e componentes inorgânicos, o que limita o estabelecimento de relações diretas entre a composição inicial dos resíduos e a formação dos compostos identificados nos bio-óleos. Além disso, a preparação das amostras por diluição em acetona e a caracterização por CG-MS restringem a análise aos compostos solubilizados e passíveis de detecção nas condições cromatográficas empregadas. Dessa forma, as áreas relativas obtidas devem ser interpretadas como uma estimativa da distribuição dos compostos detectados, e não como uma quantificação absoluta da composição dos bio-óleos.

4. Conclusões

A pirólise rápida mostrou-se uma rota promissora para a valorização dos resíduos lignocelulósicos, produzindo bio-óleos com composição química diversificada e presença significativa de anidroaçúcares. A levoglucosana destacou-se entre os compostos derivados dos carboidratos, alcançando 22,77% de área relativa, evidenciando o potencial desses bio-óleos como fonte de açúcares pirolíticos. Os resultados evidenciam a possibilidade de integração da pirólise rápida a rotas de valorização bioenergética, com potencial aplicação desses compostos como matéria-prima na produção de bioetanol de segunda geração.

5. Agradecimentos

Os autores agradecem à Fundação Carlos Chagas Filho de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro (FAPERJ) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia InovaLigno (INCT InovaLigno) e à Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (UFRRJ).

6. Referências bibliográficas

Álvarez, C.; Duque, A.; Sánchez-Monedero, A.; González, E. J.; González-Miquel, M.; Cañadas, R. Exploring recent advances in lignocellulosic biomass waste delignification through the combined use of eutectic solvents and intensification techniques. Processes, v. 12, n. 11, 2514, 2024. DOI: 10.3390/pr12112514

Bridgwater, A. V. (2012). Review of fast pyrolysis of biomass and product upgrading. *Biomass and Bioenergy, 38*, 68–94. https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2011.01.048

David, G. F., Justo, O. R., Perez, V. H., & Garcia-Perez, M. (2018). Thermochemical conversion of sugarcane bagasse by fast pyrolysis: High yield of levoglucosan production. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, *133*, 246–253. https://doi.org/10.1016/j.jaap.2018.03.004

David, G. F., Pereira, S. de P. S., Fernandes, S. A., Cubides-Roman, D. C., Siqueira, R. K., Perez, V. H., & Lacerda, V., Jr. (2021). Fast pyrolysis as a tool for obtaining levoglucosan after pretreatment of biomass with niobium catalysts. *Waste Management*, *126*, 274–282. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2021.03.016

David, G. F., Perez, V. H., Rodriguez Justo, O., & Garcia-Perez, M. (2017). Effect of acid additives on sugarcane bagasse pyrolysis: Production of high yields of sugars. *Bioresource Technology, 223*, 74–83. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.10.051

Inayat, A.; Ahmed, A.; Tariq, R.; Waris, A.; Jamil, F.; Ahmed, S. F.; Ghenai, C.; Park, Y.-K. Techno-economical evaluation of bio-oil production via biomass fast pyrolysis process: A review. Frontiers in Energy Research, v. 9, 770355, 2022. DOI: 10.3389/fenrg.2021.770355

Iqbal, H. M. N., Kyazze, G., & Keshavarz, T. (2013). Advances in the valorization of lignocellulosic materials by biotechnology: An overview. *BioResources, 8*(2), 3157–3176. BioResources

Joshi, N. C.; Sinha, S.; Bhatnagar, P.; Nath, Y.; Negi, B.; Kumar, V.; Gururani, P. A concise review on waste biomass valorization through thermochemical conversion. Current Research in Microbial Sciences, v. 6, p. 100237, 2024. DOI: 10.1016/j.crmicr.2024.100237.

Lachos-Perez, D.; Martins-Vieira, J. C.; Missau, J.; Anshu, K.; Siakpebru, O. K.; Thengane, S. K.; Morais, A. R. C.; Tanabe, E. H.; Bertuol, D. A. Review on biomass pyrolysis with a focus on bio-oil upgrading techniques. Analytica, v. 4, n. 2, p. 182–205, 2023. DOI: 10.3390/analytica4020015

Pardo Cuervo, O. H.; Rosas, C. A.; Romanelli, G. P. Valorization of residual lignocellulosic biomass in South America: a review. Environmental Science and Pollution Research, 2024, 31, 44575–44607.

Woźniak, A.; Kuligowski, K.; Świerczek, L.; Cenian, A. Review of lignocellulosic biomass pretreatment using physical, thermal and chemical methods for higher yields in bioethanol production. Sustainability, v. 17, n. 1, 287, 2025. DOI: 10.3390/su17010287

Zadeh, Z. E., Abdulkhani, A., Aboelazayem, O., & Saha, B. (2020). Recent insights into lignocellulosic biomass pyrolysis: A critical review on pretreatment, characterization, and products upgrading. *Processes*, *8*(7), 799. https://doi.org/10.3390/pr8070799

Produção de biocarvão com resíduos de *Tectona grandis* L. f. em diferentes temperaturas de pirólise

Resumo: O alto volume de resíduos gerado pelo processamento industrial da *Tectona grandis* demanda estratégias de valorização. Assim, este estudo teve como objetivo avaliar o efeito da temperatura final de pirólise (450 °C, 550 °C e 650 °C) sobre o rendimento e algumas propriedades do biocarvão de teca. A pirólise foi conduzida em um forno mufla com um sistema adaptado para a coleta de gases. Foram determinados o rendimento gravimétrico e os teores de cinzas, materiais voláteis, carbono fixo e análise de pH do biocarvão. Os resultados demonstraram uma relação inversa entre a temperatura e o rendimento de biocarvão, que decresceu de 33,99% a 450 °C para 29,07% a 650 °C. O aumento da temperatura promoveu aumento do carbono fixo de 71,78% para 80,15% e redução nos materiais voláteis de 22,96% para 11,39%. Todos os biocarvões apresentaram natureza alcalina (pH variando entre 8,98 e 9,65). Conclui-se que a temperatura de pirólise é um parâmetro determinante para a produção de biocarvão de teca, temperaturas mais baixas maximizam o rendimento, enquanto temperaturas mais altas produzem um biocarvão com maior teor de carbono.

Palavras-chave: Rendimento gravimétrico; Teca; Carbono fixo.

Biochar production from *Tectona grandis* L. f. residues at different pyrolysis temperatures

Abstract: The high volume of residues generated by the industrial processing of *Tectona grandis* requires effective valorization strategies. Therefore, this study aimed to evaluate the effect of final pyrolysis temperature (450 °C, 550 °C, and 650 °C) on the yield and selected properties of teak biochar. Pyrolysis was carried out in a muffle furnace equipped with an adapted system for pyrolysis vapor condensation. Gravimetric yield, ash content, volatile matter, fixed carbon, and biochar pH were determined. The results demonstrated an inverse relationship between temperature and biochar yield, which decreased from 33.99% at 450 °C to 29.07% at 650 °C. Increasing temperature promoted an increase in fixed carbon from 71.78% to 80.15% and a reduction in volatile matter from 22.96% to 11.39%. All biochars exhibited alkaline characteristics, with pH values ranging from 8.98 to 9.65. It is concluded that pyrolysis temperature is a determining parameter for teak biochar production: lower temperatures maximize yield, whereas higher temperatures produce biochar with higher carbon content.

Keywords: Gravimetric yield; Teak; Fixed carbon.

1. Introdução

A produção de biocarvão, ou *biochar*, é bastante versátil quanto à matéria-prima, o que possibilita utilizar uma grande diversidade de resíduos orgânicos. As principais fontes incluem dejetos animais e lodos, além de resíduos dos setores agrícolas e florestal, como palhas, cascas, serragem e cavacos de madeira (Lorenz e Lal, 2014), indicando assim, o potencial para utilização de resíduos gerados no processo da madeira de teca.

Além da biomassa, o sistema de produção, principalmente a temperatura de pirólise, pode influenciar na produção do biocarvão., que ocorre na faixa de temperatura entre 300°C e 900°C, sendo que a temperatura influencia diretamente suas propriedades físicas e químicas (Lehmann e Joseph, 2015). Quando gerado em temperaturas mais baixas, o biocarvão preserva uma estrutura química similar à da biomassa utilizada. Por outro lado, sob altas temperaturas, suas propriedades se tornam distintas da matéria-prima, principalmente quanto ao carbono (Rafiq et al., 2016).

O biocarvão destaca-se como condicionador de solo, devido sua elevada área superficial e porosidade, favorecendo a retenção de nutrientes e água, melhorando a fertilidade e a produtividade (Lehmann e Joseph, 2015). Além disso, atua como uma estratégia de mitigação das mudanças climáticas, já que estabiliza o carbono da biomassa por longos períodos (Woolf et al., 2010). Outra vantagem é o potencial uso em processos de remediação ambiental, adsorvendo contaminantes e metais pesados, o que amplia sua relevância para políticas de sustentabilidade (Furtado et al., 2024).

Esses múltiplos benefícios associados à sua produção a partir de resíduos tornam o biocarvão uma alternativa promissora para a gestão ambiental para as indústrias florestais. O principal produto do processamento da teca é o cerne comercializado na forma de blocos, com um rendimento médio de madeira serrada de apenas 47,9% (Queiroz, 2018), resultando em mais da metade do volume das toras ser convertida em resíduos como costaneiras, serragem e aparas – normalmente convertida em cavacos.

Essa elevada geração de resíduos representa um desafio para o setor, que busca por soluções que promovam o aproveitamento de resíduos, visando proteger a qualidade ambiental e a saúde pública sob o princípio do poluidor-pagador. Associado a essa questão, a valorização de subprodutos por meio de novas tecnologias torna-se uma estratégia fundamental para gerar benefícios econômicos e ambientais (Lehmann e Joseph, 2015). Assim, a produção de biocarvão a partir dos resíduos da teca se apresenta como uma alternativa estratégica e promissora, oferecendo uma solução econômica e ambiental para o setor.

Diante do exposto, objetivou-se com esse estudo avaliar a produção de biocarvão produzido a partir de cavacos oriundos de resíduos do processamento de toras de teca, em diferentes temperaturas finais de pirólise (450 °C, 550 °C e 650 °C), com foco no rendimento e caracterização do biocarvão (carbono fixo, cinzas e materiais voláteis e pH).

2. Material e métodos

A biomassa selecionada para este estudo consistiu em resíduos de *Tectona grandis* L.f., na forma de cavacos oriundas do processamento de toras de teca de plantios florestais, que foi fornecida pela empresa TRC. Para adequar e uniformizar a umidade dos cavacos antes da pirólise, todo material foi submetido à secagem em estufa a 100 ±3 ºC durante 24 horas e posteriormente armazenados em saco plástico.

As pirólises foram realizadas forno tipo mufla equipada com um container metálico, para acondicionamento da biomassa seca. Junto ao container, foi conectado um sistema de condensação e coleta de líquidos, permitindo a captura e o armazenamento dos subprodutos líquidos resultantes do processo de pirólise, como o líquido pirolenhoso.

A produção de biocarvão da biomassa residual de teca foi realizada em três diferentes temperaturas finais de pirólise: 450°C, 550°C e 650°C, sendo realizadas 4 repetições para cada temperatura, totalizando 12 pirólises. O aquecimento foi realizado de forma gradativa programada, até a temperatura final estabelecida, a qual foi mantida por 90 minutos, totalizando 120 minutos.

Para determinar o rendimento do biocarvão, a biomassa seca foi pesada previamente ao processo de pirólise. Após o processo de pirólise e resfriamento natural, o biocarvão foi retirado do container metálico e novamente pesado. O rendimento foi calculado pela relação entre a massas de biocarvão e a massa seca de biomassa.

Os líquidos coletados através do sistema de condensação foram pesados após a pirólise. Assim, a massa dos líquidos condensados, foi utilizada para obter o rendimento percentual dos líquidos. O rendimento dos gases não condensáveis foi determinado por diferença, considerando a soma dos rendimentos de biocarvão e líquidos.

O biocarvão foi caracterizado quanto aos teores de materiais voláteis, cinzas e carbono fixo e determinação do pH.

Para a análise química imediata, as amostras das diferentes temperaturas de pirólise foram moídas e posteriormente classificadas em peneira de malha 60 mesh. O teor de materiais

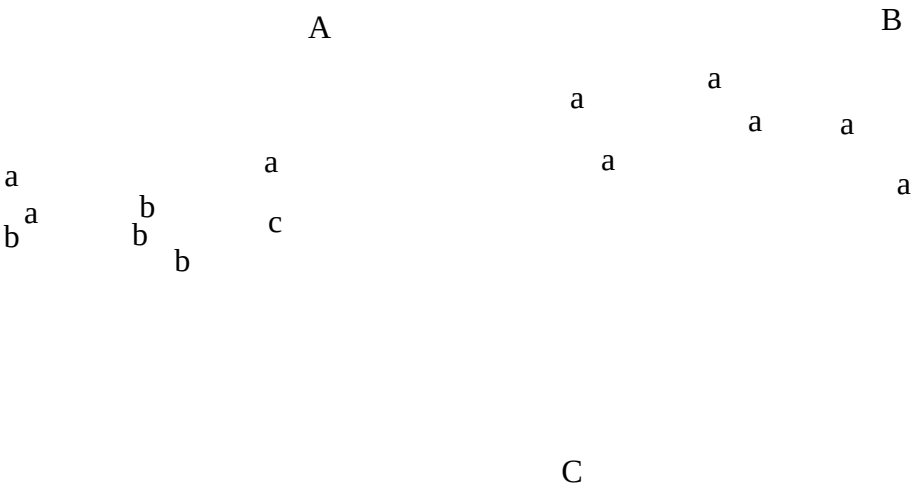
voláteis foi determinado em conformidade com a norma DIN EN 14775 (2010) e o teor de cinzas conforme norma DIN EN 15148 (2010). O teor de carbono fixo foi calculado de maneira indireta, somando os teores de materiais voláteis e cinzas e subtraindo este valor de 100%.

Para a análise do pH do biocarvão, as amostras foram moídas e peneiradas em uma malha de 2 mm. Posteriormente foi realizada uma suspensão preparada com 1 g de amostra e 20 mL de água deionizada. A mistura foi agitada manualmente a cada 10 minutos, durante 1 hora, e posteriormente, a suspensão permaneceu em repouso por 30 minutos antes da leitura do pH, efetuada com auxílio de um pHmetro digital calibrado previamente.

O experimento foi instalado seguindo um delineamento inteiramente casualizado (DIC), considerando 3 tratamentos (temperaturas de pirólise) e 4 repetições (pirólises). A normalidade dos erros e a homogeneidade das variâncias foram testadas usando os testes de Shapiro-Wilk e Bartlett, respectivamente. Em seguida, os dados foram submetidos à análise de variância (ANOVA) para comparar os tratamentos e para as diferenças significativas, o teste de Tukey foi aplicado, à 5% de significância. Todas as análises estatísticas foram realizadas no programa RStudio 2025.05.1 Build 513, R versão 4.5.1.

3. Resultados e discussão

Observa-se redução do rendimento de biocarvão com o aumento da temperatura final de pirólise reduzindo de 33,99% à 450 °C para 29,07% na temperatura de 650 °C. Em contrapartida, o rendimento de gases não condensáveis aumentou conforme aumento da temperatura de pirólise, alcançando em 650 °C, o valor médio igual a 34,29%, enquanto os rendimentos de líquidos condensados mantiveram valores relativamente constantes entre 36 - 42%, com maior valor em 550ºC (Figura 1).



Médias seguidas da mesma letra não diferem entre si, a 5% de significância, pelo teste Tukey

Figura 1 - Rendimentos da produção de biocarvão, líquido pirolenhoso e gases não condensáveis, com resíduos de teca, em diferentes temperaturas de pirólise.

a
b
b
b
c

Esse padrão de redução do sólido e aumento dos líquidos e gases ocorre pois, em temperaturas mais elevadas há maior degradação térmica da biomassa e de seus constituintes, resultando em maior liberação de voláteis, e em conformidade com outros estudos (Lehmann e Joseph, 2015; Kloss et al., 2012). Resultados semelhantes foram reportados por Rafiq et al. (2016), que observaram redução no rendimento de biocarvão de madeira com o aumento da temperatura de pirólise, obtendo rendimento de biocarvão igual a 66% à 300°C, diminuindo significativamente para 37% a 400°C e para 29,2% a 500°C.

Lima (2015) ao produzir carvão ativo com resíduos de teca encontrou rendimentos variando entre 30 e 35% para pirolise com temperatura acima de 500°C, valores próximos ao encontrado neste estudo (Figura 1C). Avaliando a produção de biocarvão com serragem de teca, Sahu et al. (2025) obtiveram rendimentos de 32,1% a 450°C, 29,8% a 550°C e 26,5% a 650°C, valores ligeiramente inferiores, mas seguindo a mesma tendência de redução encontrada neste estudo (Figura 1C). A diferença de rendimento possivelmente é devido a diferenças no teor de umidade inicial ou na taxa de aquecimento.

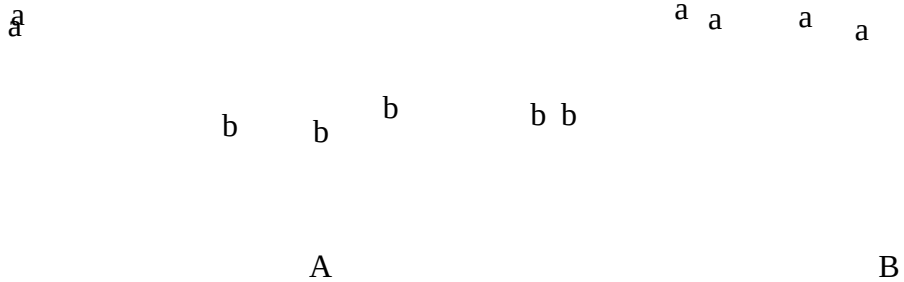
O rendimento de líquido pirolenhoso não apresentou diferenças estatísticas entre as temperaturas, apesar do maior valor em 550ºC (Figura 1B). A produção máxima de líquidos em torno de 500-550°C é característica da pirólise de madeiras, correspondendo à zona de máxima decomposição dos componentes macromoleculares e liberação de compostos condensáveis

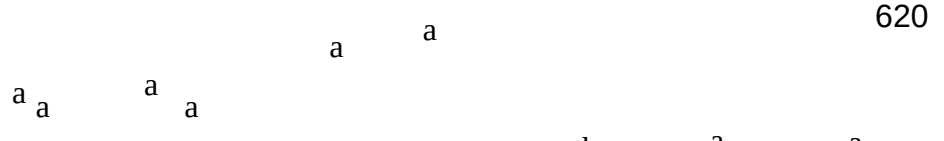
(Bridgwater, 2012). A redução à 650°C sugere a ocorrência de craqueamento secundário dos vapores, convertendo compostos condensáveis em gases permanentes (Yaman, 2004)

O rendimento de gases não condensáveis foi significativamente maior a 650°C (34,29%) em comparação com as temperaturas mais baixas (~27%). Este aumento é consistente com a maior quebra térmica das macromoléculas e reforma dos voláteis, levando à maior produção de CO, CO_2, CH_4 e H_2 em altas temperaturas (Wang et al., 2018), e formação de gases permanentes em temperaturas mais altas, conforme descrito por Silva (2018). Gaur e Reed (1998) em seu modelo de pirólise de biomassas, indicam que acima de 600°C, as reações de quebra de moléculas grandes (como os alcatrões liberados na pirólise inicial) em moléculas menores e mais simples (gases leves) e reestruturação de moléculas de hidrocarbonetos (como metano e outros gases) para produzir principalmente hidrogênio (H_2) e monóxido de carbono (CO) se tornam dominantes, explicando o maior rendimento gasoso.

A análise imediata mostrou redução significativa do teor de materiais voláteis com o aumento da temperatura de 22,96% em 450 °C para 11,59% em 650°C (Figura 2A). De forma inversa, observou-se aumento significativo do carbono fixo (Figura 2B) e aumento não significativo do teor de cinzas (Figura 2C).

Esse padrão de diminuição de voláteis e aumento do carbono fixo com aumento da temperatura é consistente, pois pirólise em temperaturas mais elevadas, remove as frações voláteis (compostos oxigenados, lignina menos estável, fração hemicelulósica), deixando uma matriz mais aromática e carbonosa (maior carbonificação), o que aumenta o teor de carbono fixo e a estabilidade química do biocarvão (Lehmann e Joseph, 2015). Rafiq et al. (2016) observaram comportamento análogo em biocarvão de palha de milho, com redução de voláteis e aumento do teor de carbono com aumento da temperatura, indicando maior aromaticidade e estabilidade do carbono a partir de 500 °C.





Médias seguidas da mesma letra não diferem entre si, a 5% de significância, pelo teste Tukey

Figura 2 – Valores médios do teor de materiais voláteis, carbono fixo, cinzas; e pH do biocarvão, produzido com resíduos de teca, em diferentes temperaturas de pirólise

Valores superiores a 80% de carbono fixo a 650°C são consistentes com os reportados por Lima (2015) para madeira de teca e por Antal e Gronli (2003) para madeiras em geral, que destacam a temperatura como o fator mais crítico para a fixação do carbono. Assim, uma vez que não houve variação nas maiores temperaturas avaliadas (Figura 2B), pode-se adotar a temperatura de 550 ° C para maiores teores de carbono fixo.

O teor de materiais voláteis diminuiu com o aumento da temperatura, de 22,96% a 450°C para 13,45% a 550°C (Figura 2A). Este declínio é resultado da destilação e ruptura de ligações químicas nos componentes voláteis da madeira. Enders et al. (2012), em uma ampla revisão, estabeleceram uma correlação negativa forte entre temperatura de pirólise e teor de voláteis, sendo valores inferiores a 15% comuns acima de 600°C para biomassas lignocelulósicas.

O teor de cinzas não teve aumento significativo ($p < 0,05$), variando de 6,26% a 8,46% (Figura 2C). Este resultado era esperado, pois os componentes orgânicos são volatilizados, concentrando os elementos inorgânicos minerais no biocarvão residual. Vassilev et al. (2013), em uma análise detalhada de cinzas de biomassas, relatam que a teca possui um teor moderado de cinzas, e que a concentração relativa aumenta linearmente com a severidade do tratamento térmico.

O teor de cinzas da madeira de teca é baixo, mantendo-se na faixa de 1 a 2% na ausência de contaminação por materiais externos (Rosamah et al., 2020). A contaminação de resíduos de biomassa com materiais como solo e areia é a principal causa para a observação de teores de cinzas anormalmente altos, devido à incorporação de sílica e outros minerais à matéria-prima (Vassilev et al., 2013), além do fato dos resíduos terem grande maior proporção de casca.

O pH do biocarvão de resíduos de teca foi alcalino em todas as temperaturas, com valores entre 8,98 e 9,65, observando-se um aumento no pH com a temperatura até 550°C, seguido de uma ligeira redução a 650°C (Figura 2D). A alcalinidade do biocarvão é atribuída à concentração de carbonatos e óxidos metálicos formados durante a pirólise (Nóbrega, 2011). Resultados semelhantes foram reportados por Martins (2018) em biocarvões produzidos a partir de diferentes biomassas.

Os biocarvões de teca produzidos a 550°C e 650°C, exibindo elevado teor de carbono fixo (>79%), baixo conteúdo volátil (<14%) e pH alcalino, apresentam atributos adequados para aplicação como condicionador de solos ácidos e para sequestro carbonáceo de longa duração, conforme proposto por Woolf et al. (2010) e Lehmann et al. (2006). Sua alcalinidade pronunciada e percentual de cinzas sugerem potencial para substituição parcial de corretivos de acidez e mesmo fornecimento de nutrientes.

4. Conclusões

Conclui-se que a temperatura de pirólise é um parâmetro determinante nos rendimentos e nas características do biocarvão produzido com resíduos de *Tectona grandis*.

O incremento térmico promoveu um decréscimo no rendimento em sólido, e em contrapartida promoveu elevação dos teores de carbono fixo e redução dos materiais voláteis. O biocarvão de todos os tratamentos se manteve alcalino.

5. Referências bibliográficas

Antal, M. J.; & Grønli, M. (2003). The art, science, and technology of charcoal production. Industrial & Engineering Chemistry Research, 42(8). p. 1619–1640. https://doi.org/10.1021/ie0207919

Bridgwater, A. V. (2012). Review of fast pyrolysis of biomass and product upgrading. Biomass and Bioenergy, 38, p. 68-94. https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2011.01.048

Deutsches Institut Für Normung. (2010). DIN EN 14775: Solid biofuels - Determination of ash content.

Deutsches Institut Für Normung. (2010). DIN EN 15148: Solid biofuels - Determination of the content of volatile matter.

Enders, A.; Hanley K.; Whitman, T.; Joseph, S. & Lehmann, J. (2012). Characterization of biochars to evaluate recalcitrance and agronomic performance. Bioresource Technology, 114, p. 644–653. http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2012.03.022

Furtado, L. A.; Coutinho, A. P.; Antonino, A. C. D.; Santos Neto, S. M. & Silva, J. B. (2024). Uso de biocarvão na remediação de solos contaminados por metais pesados: uma revisão. Revista Brasileira de Geografia Física 17 (1), p. 38-58.

Gaur, S.; & Reed, T. B. (1998). An Atlas of Thermal Data for Biomass and Other Fuels. Golden: National Renewable Energy Laboratory.

Kloss, S.; Zehetner, F.; Dellantonio, A.; Hamid, R.; Ottner, F.; Liedtke, V.; Schwanninger, M.; Gerzabek, M.H. & Soja, G. (2012). Characterization of slow pyrolysis biochars: effects of feedstocks and pyrolysis temperature on biochar properties. Journal of Environmental Quality, 41(4), p. 990-1000. https://doi.org/10.2134/jeq2011.0070

Lehmann, J.; & Joseph, S. (2015). Biochar for environmental management: science, technology and implementation. Routledge.

Lehmann, J.; Gaunt, J.; & Rondon, M. (2006). Bio-char sequestration in terrestrial ecosystems – a review. Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change, 11, p. 403–427. https://doi.org/10.1007/s11027-005-9006-5

Lima, R. V. (2015). Carvão ativado de resíduos de *Tectona grandis*. (Dissertação de Mestrado). Universidade Federal de Lavras, Lavras.

Lorenz, K.; & Lal, R. (2014). Biochar application to soil for climate change mitigation by soil organic carbon sequestration. Journal of plant nutrition and soil science, 177(5), p. 651-670. https://doi.org/10.1002/jpln.201400058

Martins, C. C. (2018). Biochar, composto orgânico e potássio nas características químicas e lixiviação de nutrientes em Espodossolo e no cultivo de mucuna preta e moringa. (Tese de Doutorado). Universidade Estadual do Norte Fluminense.

Nóbrega, Í. P. C. (2011). Efeitos do biochar nas propriedades físicas e químicas do solo: Sequestro de carbono no solo. (Dissertação de Mestrado em Engenharia Agronómica). Universidade Técnica de Lisboa.

Queiroz, M. C. A. (2018). Eficiência agronômica de fertilizantes nitrogenados formulados a partir de biocarvão e fonte mineral (Dissertação de Mestrado). Instituto Agronômico de Campinas.

Rafiq, M. K.; Bachmann, R. T.; Rafiq, M. T.; Shang, Z.; Joseph, S. & Long, R. (2016). Influence of pyrolysis temperature on physico-chemical properties of corn stover (*Zea mays* L.) biochar and feasibility for carbon capture and energy balance. PLoS one, 11(6), e0156894. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0156894

Rosamah, E.; Ferlivanti, F.; Kuspradini, H.; Dungani, R. & Aditiawati, P. (2020). Chemical content in two Teak woods (*Tectona grandis* Linn. F.) that has been used for 2 and 60 years. J. Biol. Sci. Technol. Manag, 2(1), 15-19. https://doi.org/10.5614/3bio.2020.2.1.3

R Core Team (2025). _R: A Language and Environment for Statistical Computing_. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <https://www.R-project.org/>.

Silva, L. G. (2018). Atividade microbiana do solo, promoção de crescimento e controle da murcha de *fusarium* em tomateiro influenciados por finos de carvão. 2018. (Dissertação de Mestrado). Universidade Federal de Lavras.

Vassilev, S. V.; Baxter, D.; Andersen, L. K. & Vassileva, C. G. (2010). An overview of the chemical composition of biomass. Fuel, 89(5), p. 913–933. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2009.10.022

Wang, G.; Li, Q.; Dzakpasu, M.; Gao, X.; Yumen, C. & Wang, X.C. (2018). Impacts of different biochar types on hydrogen production promotion during fermentative co-digestion of food wastes and dewatered sewage sludge. Waste management, 80, p. 73-80. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.08.042

Woolf, D.; Amonette, J. E.; Street-Perrot, F. A.; Lehmann, J. & Joseph, S. (2010). Sustainable biochar to mitigate global climate change. Nature communications, 1(56), 2010. https://doi.org/10.1038/ncomms1053

Yaman, S. (2004). Pyrolysis of biomass to produce fuels and chemical feedstocks. Energy Conversion and Management, 45(5), p. 651-671.

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Produção de biochar a partir de resíduos de *Cocos nucifera* L.

Paula Gabriella Surdi[1]; Evanderson Luis Capelete Evangelista[1]; Dandara Paula da Silva Guimarães[1]; Davi Pimenta Fialho[1]; Samuel Fernandes de Souza[1]; Isabella Sampaio[1]; Paulo Henrique Teodoro de Oliveira[2]; Angélica de Cássia Oliveira Carneiro[1]

[1] Universidade Federal de Viçosa
[2] Empresa Agricultura Bioativa

Resumo: O sequestro de carbono no solo por meio da aplicação de biochar tem se consolidado como estratégia promissora de mitigação climática, pois sua estrutura aromática recalcitrante confere elevada resistência à degradação biológica e permite o armazenamento de carbono por décadas a séculos. Essa estabilidade está relacionada às condições de pirólise, sobretudo temperatura e tempo de residência, que determinam o grau de carbonização e as razões atômicas H/C e O/C, indicadores da certificação de créditos de carbono. Assim, resíduos de *Cocos nucifera* L. apresentam elevado potencial para produção de biochar, contribuindo para sua valorização e para a bioeconomia circular. Este estudo avaliou o efeito de três temperaturas (400-600 °C) e três tempos de residência (30-90 min) sobre as propriedades de biochars obtidos em forno mufla a partir de casca de coco verde. O aumento da temperatura reduziu os teores de voláteis e as razões H/C e O/C, e elevou os teores de carbono fixo, carbono elementar e cinzas, com efeito do tempo mais pronunciado a 400 °C. Todos os biochars atenderam aos critérios de estabilidade da IBI e do EBC, com destaque para 600 °C/30 min, condição de maior carbonização e potencial de armazenamento de carbono no solo a longo prazo.
Palavras-chave: Bioeconomia circular; Pirólise; Sequestro de carbono.

Biochar production from *Cocos nucifera* L. residues

Abstract*:* Soil carbon sequestration through biochar application has become a promising strategy for climate change mitigation, since its recalcitrant aromatic structure confers high resistance to biological degradation and enables carbon storage over decades to centuries. This stability is closely related to pyrolysis conditions, particularly temperature and residence time, which determine the degree of carbonization and the H/C and O/C atomic ratios, indicators widely used in carbon credit certification. Accordingly, Cocos nucifera L. residues show high potential for biochar production, contributing to their valorization and to the circular bioeconomy. This study evaluated the effect of three pyrolysis temperatures (400-600 °C) and three residence times (30-90 min) on the properties of biochars produced in a muffle furnace from green coconut husk residues. Increasing temperature significantly reduced volatile matter content and the H/C and O/C atomic ratios, while increasing fixed carbon, elemental carbon, and ash contents, with the effect of residence time being more pronounced at 400 °C. All biochars met the stability criteria established by the International Biochar Initiative (IBI) and the European Biochar Certificate (EBC), with the 600 °C/30 min condition standing out, yielding the biochar with the highest degree of carbonization and the greatest potential for long-term carbon storage in soil.
Keywords: Circular bioeconomy; Pyrolysis; Carbon sequestration.

1. Introdução

A valorização de resíduos agroindustriais por meio de processos termoquímicos tem se consolidado como uma estratégia para promover o uso sustentável da biomassa, reduzir impactos ambientais e fomentar a bioeconomia circular (Lehmann & Joseph, 2024). Entre esses resíduos, a casca de coco verde (*Cocos nucifera* L.) destaca-se pelo elevado volume gerado e por sua composição lignocelulósica, que a torna uma matéria-prima promissora para a produção de bioprodutos de maior valor agregado (Ajien et al., 2023).

A pirólise é uma tecnologia capaz de converter biomassas lignocelulósicas em biochar, um material carbonáceo com elevada estabilidade química e potencial de aplicação no condicionamento de solos, sequestro de carbono, adsorção de contaminantes e armazenamento de carbono de longa duração (Lehmann & Joseph, 2024; Chiaramonti et al., 2024). As propriedades do biochar são fortemente influenciadas pelas condições de pirólise, especialmente pela temperatura final, que afeta o rendimento, o teor de carbono fixo, o teor de materiais voláteis, a composição elementar, a porosidade e a estabilidade do material (Kumar et al., 2020; Vilas-Boas et al., 2024). Embora o tempo de residência também influencie essas características, seu efeito depende da biomassa utilizada e das condições operacionais adotadas (Rajput et al., 2024).

Apesar do crescente interesse na produção de biochar a partir de resíduos lignocelulósicos, ainda são escassos estudos sobre a influência da temperatura e tempo de pirólise nas propriedades do biochar obtido da casca de coco verde, especialmente visando fornecer informações para futuras aplicações. Dessa forma, o objetivo deste trabalho foi produzir biochar a partir de resíduos da casca de coco verde (*Cocos nucifera* L.), avaliando o efeito de três temperaturas e três tempos de pirólise.

2. Material e métodos

A biomassa residual do fruto de *C. nucifera* L. foi coletada na cidade de Viçosa-MG e transportada para o Laboratório de Painéis e Energia da Madeira (LAPEM) da Universidade Federal de Viçosa (UFV). Os resíduos, com umidade de aproximadamente 847%, em base seca, foram seccionados ao meio, dispostos em estufas a 103±2 ºC, até atingirem massa constante e, posteriormente, submetidos à redução granulométrica em um triturador. Os resíduos de coco verde triturados foram peneirados para a remoção da fração fina (<0,8 mm). O material retido foi acondicionado em sacos plásticos vedados e posteriormente utilizado no processo de pirólise.

2.1 Pirólise dos resíduos

As pirólises foram conduzidas em um forno elétrico do tipo mufla. Em cada ensaio, utilizaram-se 1,25 kg de biomassa residual de coco verde, acondicionados em um contêiner metálico com volume aproximado de 0,011 m³, posteriormente inserido na mufla. Foram avaliados três tempos de residência (30, 60 e 90 minutos) e três temperaturas finais de pirólise (400, 500 e 600 °C).

Após a pirólise, o contêiner metálico foi retirado da mufla e resfriado em ambiente aberto com o auxílio de uma manta de algodão umedecida. Após a estabilização da temperatura, o biochar foi removido do contêiner e submetido às análises de caracterização.

2.2 Propriedades do biochar

Os teores de materiais voláteis, carbono fixo e cinzas foram determinados de acordo com a norma ASTM D1762-84 (ASTM, 2021).

Os teores de carbono, nitrogênio e hidrogênio foram determinados conforme a norma ISO 16948 (ISO, 2015), em um analisador elementar TruSpec Micro da marca LECO, utilizando amostras com granulometria entre 40 e 60 mesh. Para o teor de enxofre foi utilizado o módulo TruSpec S da mesma marca, seguindo a norma ISO 16994 (ISO, 2016). O teor de oxigênio foi obtido por diferença, subtraindo-se de 100 a soma dos teores de carbono, nitrogênio, hidrogênio, enxofre e cinzas, conforme ISO 16993 (ISO, 2016).

As relações molares entre hidrogênio e carbono (H/C) descrita na metodologia da Puro Standard: Biochar Methodology – Version 4.1 (Puro.earth, 2023) foram calculadas conforme Equação 1.

$$\frac{H}{C_{org}}(molar)\frac{mh(\%)}{mc(\%)}x\frac{MC(gmaol^{-1})}{MH(gmol^{-1})}=\frac{mh(\%)}{mc(\%)}x\frac{12}{1}(1)$$

O cálculo da razão atômica O/C foi realizado conforme descrito na European Biochar Certificate (Carbon Standards International, 2022).

2.3 Delineamento experimental

O experimento foi conduzido em delineamento inteiramente casualizado, em esquema fatorial 3 × 3 (três temperaturas e três tempos de pirólise), totalizando nove tratamentos, com três repetições. Os dados foram submetidos aos testes de normalidade de Shapiro–Wilk e de homogeneidade de variâncias de Bartlett. Após a verificação do atendimento às

pressuposições, realizou-se a análise de variância (ANOVA) e, quando constatado efeito significativo, as médias foram comparadas pelo teste de Tukey, a 5% de significância, utilizando-se o software RStudio.

3. Resultados e discussão

Os resultados obtidos para os teores de materiais voláteis e carbono fixo (Tabelas 1 e 2, respectivamente) indicaram efeito significativo da interação entre os fatores temperatura e tempo de residência da pirólise.

Tabela 1. Materiais voláteis (%) dos biochars produzidos em diferentes tempos e temperaturas de pirólise

Tempo (minutos)	Temperatura de pirólise (°C)		
	400	500	600
30	32,78 aA	17,02 bA	9,35 cA
60	24,87 aB	14,10 bA	9,16 cA
90	24,35 aB	15,00 bA	8,24 cA

Médias seguidas pela mesma letra não diferem significativamente entre si, pelo teste de Tukey, a 5% de significância. Letras minúsculas indicam comparação entre temperaturas e letras maiúsculas entre tempos.

O teor de materiais voláteis reduziu significativamente com o aumento da temperatura de pirólise, passando de 32,78% a 400 °C para 9,35% a 600 °C, no tempo de residência de 30 minutos. Esse comportamento é atribuído à intensificação da degradação térmica dos principais constituintes da biomassa, como hemiceluloses, celulose e parte da lignina, promovendo a liberação de gases condensáveis e não condensáveis (CO_2, CO, H_2O e hidrocarbonetos). Como consequência, ocorre redução dos teores de hidrogênio e oxigênio, resultando na diminuição do conteúdo de materiais voláteis no biochar (Oginni & Singh, 2020). Embora o tempo de residência também tenha influenciado essa variável, seu efeito foi mais pronunciado a 400 °C. Nas temperaturas de 500 °C e 600 °C não foram observadas diferenças significativas entre os tempos de residência, indicando que a maior parte da degradação térmica ocorreu nos primeiros 30 minutos de pirólise.

Tabela 2. Carbono fixo (%) dos biochars produzidos em diferentes tempos e temperaturas de pirólise

Tempo (minutos)	Temperatura de pirólise (°C)		
	400	500	600
30	59,99 cB	73,23 bA	80,52 aA
60	66,33 cA	75,87 bA	80,21 aA
90	67,19 cA	75,39 bA	81,27 aA

Médias seguidas pela mesma letra não diferem significativamente entre si, pelo teste de Tukey, a 5% de significância. Letras minúsculas indicam comparação entre temperaturas e letras maiúsculas entre tempos.

Em contrapartida, o teor de carbono fixo aumentou com a elevação da temperatura de pirólise, sendo esse efeito mais pronunciado entre 400 °C e 500 °C. Enquanto a 400 °C os valores variaram de 59,99% a 67,19%, a 500 °C permaneceram próximos de 75% e, a 600 °C, atingiram aproximadamente 80%. Esse aumento decorre da degradação da fração orgânica volátil da biomassa, principalmente das hemiceluloses e da celulose, permanecendo predominantemente o carbono estrutural associado à lignina, componente de maior estabilidade térmica. Assim, a redução dos materiais voláteis promove o aumento proporcional do teor de carbono fixo, estabelecendo uma relação inversa entre essas duas variáveis (Weber & Quicker, 2018). O tempo de residência influenciou significativamente o teor de carbono fixo apenas a 400 °C, sugerindo que, nessa temperatura, a degradação térmica ocorre de forma mais lenta, uma vez que a decomposição das hemiceluloses e da celulose ainda está em andamento nessa faixa térmica (Suman & Gautam, 2017). Em 500 °C e 600 °C, os valores permaneceram estáveis, indicando que a maior parte dos compostos voláteis já havia sido removida nos primeiros 30 minutos.

A análise de variância indicou ausência de interação significativa entre temperatura e tempo de residência para o teor de cinzas (Tabela 3). Entretanto, ambos os fatores apresentaram efeitos significativos quando avaliados individualmente, razão pela qual a discussão foi realizada com base nos efeitos principais.

Tabela 3. Teor de cinzas (%) dos biochars produzidos em diferentes tempos e temperaturas de pirólise

Tempo (minutos)	**Temperatura de pirólise (°C)**			**Média**
	400	**500**	**600**	
30	-	-	-	9,04 B
60	-	-	-	9,83 A
90	-	-	-	9,52 A
Média	8,17 b	9,80 a	10,42 a	

Médias seguidas pela mesma letra não diferem significativamente entre si, pelo teste de Tukey, a 5% de significância. Letras minúsculas indicam comparação entre temperaturas e letras maiúsculas entre tempos.

Observou-se aumento significativo do teor de cinzas entre 400 °C e 500 °C, sem diferenças estatísticas entre 500 °C e 600 °C. Esse comportamento decorre da maior degradação da fração orgânica da biomassa até aproximadamente 500 °C, concentrando os constituintes minerais presentes no biochar. Acima dessa temperatura, a taxa de degradação diminui devido à

maior estabilidade térmica da lignina (Wang et al., 2018). Em relação ao tempo de residência, os biochars produzidos aos 60 e 90 minutos apresentaram teores de cinzas estatisticamente semelhantes e superiores aos obtidos aos 30 minutos, indicando que a principal concentração da fração mineral ocorreu na etapa inicial da pirólise.

Os valores médios da composição química elementar dos biochars produzidos sob as diferentes condições de pirólise são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4. Composição química elementar dos biochars produzidos em função dos tratamentos

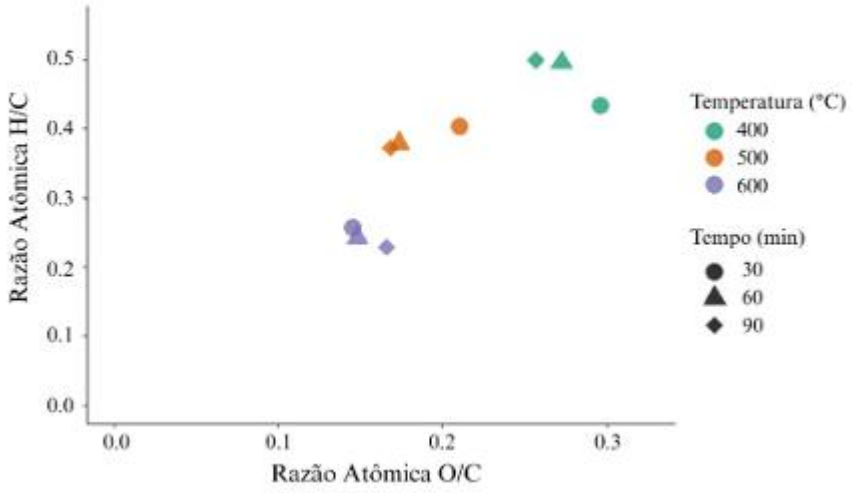
Variáveis		**Elementos (%)**					
Temperatura (°C)	**Tempo (min)**	**C**	**H**	**N**	**S**	**O**	**Cinzas**
400	**30**	64,20	2,34	0,91	0,01	25,32	7,22
	60	64,38	2,68	0,72	0,05	23,36	8,81
	90	65,63	2,76	0,69	0,01	22,45	8,46
500	**30**	68,05	2,31	0,79	0,05	19,06	9,74
	60	70,62	2,25	0,69	0,08	16,32	10,04
	90	71,41	2,23	0,66	0,07	16,01	9,62
600	**30**	73,42	1,59	0,57	0,05	14,23	10,14
	60	72,92	1,48	0,55	0,05	14,36	10,64
	90	71,61	1,38	0,62	0,08	15,82	10,49

O teor de carbono aumentou progressivamente com a elevação da temperatura de pirólise, atingindo o maior valor (73,42%) na condição de 600 °C durante 30 minutos. Em contrapartida, os teores de hidrogênio e oxigênio diminuíram com o aumento da temperatura e do tempo de residência, comportamento associado à eliminação de grupos funcionais oxigenados e hidrogenados durante a carbonização e ao aumento do grau de aromatização da estrutura do biochar (Zhao et al., 2018).

O aumento da temperatura intensifica as reações de degradação térmica da biomassa, promovendo a remoção de compostos ricos em hidrogênio e oxigênio e favorecendo a aromatização e a reorganização estrutural do carbono residual. Essas transformações aumentam a estabilidade química e a recalcitrância do biochar (Cárdenas-Aguiar et al., 2024; Situ et al., 2022).

O diagrama de Van Krevelen contendo as razões atômicas H/C e O/C dos biochars produzidos em diferentes temperaturas e tempos de residência é apresentado na Figura 1.

Figura 1. Diagrama de Van Krevelen dos biochars de resíduo de casca de coco produzidos em diferentes tempos e temperaturas de pirólise, comparando as razões molares H/C com as razões molares O/C



O diagrama evidencia a redução das razões atômicas H/C e O/C com o aumento da temperatura de pirólise, indicando maior grau de carbonização e estabilidade dos biochars. O aumento do tempo de residência também contribuiu para a redução dessas razões, principalmente nas temperaturas de 400 °C e 500 °C, nas quais os valores obtidos aos 30 minutos foram superiores aos observados aos 60 e 90 minutos. Esse comportamento está relacionado à remoção progressiva de grupos funcionais contendo hidrogênio e oxigênio e à formação de estruturas aromáticas condensadas (Domingues et al., 2017; Lataf et al., 2022).

Todos os biochars produzidos atenderam aos critérios de estabilidade para estocagem de carbono estabelecidos pela *International Biochar Initiative* (IBI, 2015) e pelo *European Biochar Certificate* (Carbon Standards International, 2022), que consideram razões atômicas H/C inferiores a 0,7 e O/C inferiores a 0,4 como indicativas de elevada estabilidade. Esses parâmetros são amplamente reconhecidos e empregados em metodologias internacionais de certificação de remoção de carbono, como as da Verra (2022) e da Puro.earth (2022), reforçando o potencial dos biochars obtidos para aplicações relacionadas ao sequestro de carbono.

De acordo com o modelo proposto por Budai et al. (2013), biochars com razão atômica H/C inferior a 0,7 apresentam potencial para reter aproximadamente 50% do carbono por um período superior a 100 anos. Já materiais com H/C inferior a 0,4, como os biochars produzidos a 500 °C e 600 °C, independentemente do tempo de residência, apresentam potencial de retenção superior a 70% no mesmo período, caracterizando-se como materiais altamente estáveis e com elevado potencial para o sequestro de carbono.

4. Conclusões

O aumento da temperatura de pirólise reduziu os teores de materiais voláteis e as razões atômicas H/C e O/C, ao mesmo tempo em que promoveu o aumento dos teores de carbono fixo e de carbono elementar, resultando em biochars com maior grau de carbonização e estabilidade química.

A condição de pirólise de 600 °C por 30 minutos proporcionou a obtenção de um biochar com elevado teor de carbono fixo, baixas razões atômicas H/C e O/C e composição compatível com os critérios internacionais de estabilidade estabelecidos pela International Biochar Initiative (IBI) e pelo European Biochar Certificate (EBC). Esses resultados indicam elevado potencial do material para aplicações relacionadas ao sequestro e ao armazenamento de carbono em longo prazo.

5. Agradecimentos

Este trabalho foi viabilizado, em parte, pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) - Processos APQ-05311-24 e APQ-04599-25, pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) - Processo n° 444395/2024-5, pelos Laboratórios de Propriedades da Madeira (LPM) e Painéis e Energia da Madeira (LAPEM) da Universidade Federal de Viçosa (UFV), pela Embrapii - Unidade Fibras Florestais e pela Empresa Agricultura Bioativa.

6. Referências bibliográficas

Ajien, A., Idris, J., Md Sofwan, N., Husen, R., & Seli, H. (2023). Coconut shell and husk biochar: A review of production and activation technology, economic, financial aspect and application. Waste Management & Research, 41(1), 37–51. https://doi.org/10.1177/0734242X221127167

ASTM International. (2021). *ASTM D1762–84(2021): Standard test method for chemical analysis of wood charcoal*. ASTM International. https://doi.org/10.1520/D1762-84R21

Budai, A., Zimmerman, A. R., Cowie, A. L., Webber, J. B. W., Singh, B. P., Glaser, B., Masiello, C. A., Andersson, D., Shields, F., Lehmann, J., O'Toole, A., & Joseph, S. (2013). *Biochar carbon stability test method: An assessment of methods to determine biochar carbon stability*. International Biochar Initiative.

Carbon Standards International. (2022). *European Biochar Certificate: Guidelines for a sustainable production of biochar*. Carbon Standards International. https://www.european-biochar.org

Cárdenas-Aguiar, E., Méndez, A., Gascó, G., Lado, M., & Paz-González, A. (2024). The effects of feedstock, pyrolysis temperature, and residence time on the properties and uses of biochar from broom and gorse wastes. *Applied Sciences, 14*(10), 4283. https://doi.org/10.3390/app14104283

Chiaramonti, D., Lehmann, J., Berruti, F., Giudicianni, P., Sanei, H., & Mašek, O. (2024). Biochar is a long-lived form of carbon removal, making evidence-based CDR projects possible. Biochar, 6(1), Article 81. https://doi.org/10.1007/s42773-024-00366-7

Domingues, R. R., Trugilho, P. F., Silva, C. A., Melo, I. C. N. A., Melo, L. C. A., Magriotis, Z. M., & Sanchez-Monedero, M. A. (2017). Properties of biochar derived from wood and high-nutrient biomasses with the aim of agronomic and environmental benefits. *PLoS ONE, 12*(5), e0176884. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0176884

International Biochar Initiative. (2015). *Standardized product definition and product testing guidelines for biochar that is used in soil* (Version 2.1). https://www.biochar-international.org/wp-content/uploads/2018/04/IBI_Biochar_Standards_V2.1_Final.pdf

International Organization for Standardization. (2015). *ISO 16948:2015. Solid biofuels - Determination of total content of carbon, hydrogen and nitrogen*. ISO.

International Organization for Standardization. (2016). *ISO 16993:2016. Solid biofuels —Conversion of analytical results from one basis to another*. ISO.

International Organization for Standardization. (2016). *ISO 16994:2016. Solid biofuels - Determination of total content of sulfur and chlorine*. ISO.

Lataf, A., et al. (2022). The effect of pyrolysis temperature and feedstock on biochar agronomic properties. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 168*, 105728. https://doi.org/10.1016/j.jaap.2022.105728

Kumar, A., Saini, K., & Bhaskar, T. (2020). Hydrochar and biochar: Production, physicochemical properties and techno-economic analysis. Bioresource Technology, 310, Article 123442. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.123442

Lehmann, J., & Joseph, S. (Eds.). (2024). Biochar for environmental management: Science, technology and implementation (3rd ed.). Routledge.

Oginni, O., & Singh, K. (2020). Influence of high carbonization temperatures on microstructural and physicochemical characteristics of herbaceous biomass-derived biochars.

Journal of Environmental Chemical Engineering, 8(5), 104169. https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.104169

Puro.earth. (2023). *Puro Standard: Biochar methodology* (Version 4.1). Puro.earth. https://puro.earth/methodologies/biochar/

Rajput, V. D., Minkina, T., Mandzhieva, S., Sushkova, S., Burachevskaya, M., Nazarenko, O., & Soldatov, M. (2024). Biochar production methods and their transformative potential for environmental remediation. Discover Applied Sciences, 6(8), Article 408. https://doi.org/10.1007/s44352-024-00073-5

Situ, G., Zhao, Y., Zhang, L., Yang, X., Chen, D., Li, S., Wu, Q., Xu, Q., Chen, J., & Qin, H. (2022). Linking the chemical nature of soil organic carbon and biological binding agent in aggregates to soil aggregate stability following biochar amendment in a rice paddy. *Science of the Total Environment, 847*, 157460. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.157460

Suman, S., & Gautam, S. (2017). Pyrolysis of coconut husk biomass: Analysis of its biochar properties. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects, 39*(8), 761–767. https://doi.org/10.1080/15567036.2016.1264152

Verra. (2022). *VM0044: Methodology for biochar utilization in soil and non-soil applications* (Version 1.0). Verra. https://verra.org/methodologies/vm0044-biochar-utilization-in-soil-and-non-soil-applications/

Vilas-Boas, A. C. M., Carneiro, A. C. O., Trugilho, P. F., Protásio, T. P., Castro, A. F. N. M., & Moulin, J. C. (2024). Valorisation of residual biomass by pyrolysis: Influence of process conditions on products. Sustainable Energy & Fuels, 8(2), 379–396. https://doi.org/10.1039/D3SE01275K

Wang, K., Peng, N., Lu, G., & Dang, Z. (2020). Effects of pyrolysis temperature and holding time on physicochemical properties of swine-manure-derived biochar. *Waste and Biomass Valorization, 11*(2), 613–624. https://doi.org/10.1007/s12649-018-0435-2

Weber, K., & Quicker, P. (2018). Properties of biochar. *Fuel, 217*, 240–261. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2017.12.054

Zhao, B., O'Connor, D., Zhang, J., Peng, T., Shen, Z., Tsang, D. C. W., & Hou, D. (2018). Effect of pyrolysis temperature, heating rate, and residence time on rapeseed stem derived biochar. *Journal of Cleaner Production, 174*, 977–987. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.11.013

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Produção de carvão vegetal de baixo carbono a partir de resíduos de manejo florestal em sistema fornos-fornalha na Amazônia

Samara Teixeira da Silva[1]; Elvis Vieira dos Santos[2] Michael Douglas Roque Lima[3]; Paulo Fernando Trugilho[4]; Angélica de Cássia Oliveira Carneiro[5]; Thiago de Paula Protásio[6]

[1] Universidade Federal Rural da Amazônia; [2,4,6] Universidade Federal de Lavras; [3] Universidade Estadual da Região Tocantina do Maranhão; [5] Universidade Federal de Viçosa;

Resumo: A produção de carvão vegetal a partir de resíduos de Planos de Manejo Florestal Sustentável (PMFS) representa uma alternativa para o aproveitamento sustentável da biomassa amazônica, porém sua aplicação em sistemas modernos de carbonização ainda é pouco estudada. Este trabalho avaliou o desempenho produtivo e climático da produção de carvão vegetal em sistema fornos-fornalha na Amazônia utilizando a abordagem de Mensuração, Relato e Verificação (MRV). Foram realizados seis ciclos de carbonização em escala real, com monitoramento térmico durante a carbonização e o resfriamento. Os rendimentos gravimétricos variaram de 27,45 a 35,83%, enquanto a aplicação do MRV indicou redução de aproximadamente 63% no fator de emissão de CH_4 entre os ciclos de menor e maior rendimento. No cenário com combustão dos gases pirolenhosos, estimou-se mitigação de 240,85 t CO_2e ano^{-1}. Os resultados demonstram a viabilidade da produção de carvão vegetal de baixo carbono a partir de resíduos de PMFS em sistema fornos-fornalha e representam a primeira avaliação científica dessa tecnologia em condições reais de operação na Amazônia.

Palavras-chave: Carbonização; Bioenergia; Mudanças Climáticas.

Low-Carbon Charcoal Production from Sustainable Forest Management Residues in a Kiln–Furnace System in the Amazon

Abstract: The production of charcoal from residues generated by Sustainable Forest Management Plans (SFMPs) represents an opportunity to promote the sustainable use of Amazon forest biomass; however, its application in modern carbonization systems remains poorly explored. This study evaluated the productive and climate performance of charcoal production in a kiln–furnace system in the Amazon using the Measurement, Reporting and Verification (MRV) approach. Six full-scale carbonization cycles were conducted under continuous thermal monitoring throughout the carbonization and cooling stages. Gravimetric yields ranged from 27.45% to 35.83%, while the MRV approach indicated an approximately 63% reduction in the CH_4 emission factor between the lowest- and highest-yield cycles. Under the scenario including combustion of pyrolysis gases, the estimated mitigation reached 240.85 t CO_2e year^{-1}. These findings demonstrate the technical feasibility of low-carbon charcoal production from SFMP residues in a kiln–furnace system and represent the first scientific evaluation of this technology under real operating conditions in the Amazon.

Keywords: Carbonization; Bioenergy; Climate Change.

210. Introdução

A produção de carvão vegetal ocupa posição estratégica na bioenergia brasileira e no setor siderúrgico, onde atua como combustível e agente termorredutor. Na Amazônia, resíduos

provenientes de Planos de Manejo Florestal Sustentável (PMFS), como galhos, sapopemas e restos de troncos, constituem uma fonte relevante de biomassa para essa finalidade, ampliando o aproveitamento dos recursos florestais já explorados e agregando valor a materiais tradicionalmente subutilizados (Numazawa et al., 2017; Lima et al., 2020; Lima et al., 2023). Entretanto, a elevada heterogeneidade das espécies amazônicas e de suas propriedades tecnológicas impõe desafios ao controle da carbonização e à obtenção de carvão vegetal com rendimento e qualidade consistentes (Lima et al., 2020; Lima et al., 2022; Barros et al., 2023).

Além da variabilidade da matéria-prima, a tecnologia de carbonização exerce influência direta sobre a eficiência produtiva e o desempenho ambiental do processo. Sistemas tradicionais apresentam baixo controle térmico e elevadas perdas de carbono na forma de gases. O sistema fornos-fornalha foi desenvolvido para aumentar o rendimento gravimétrico, melhorar o controle da carbonização e promover a combustão dos gases pirolenhosos gerados durante o processo, reduzindo emissões atmosféricas e ampliando a eficiência da produção de carvão vegetal (Oliveira et al., 2013; Oliveira et al., 2017; Schettini et al., 2022; Silva et al., 2024).

Apesar dos avanços demonstrados para essa tecnologia, os estudos disponíveis foram conduzidos predominantemente com madeira de *Eucalyptus*, permanecendo limitada sua avaliação com resíduos heterogêneos provenientes de PMFS em condições reais da Amazônia. Nesse contexto, o monitoramento térmico das carbonizações e a avaliação do rendimento tornam-se essenciais, pois variações na condução do processo podem alterar simultaneamente a conversão da biomassa em carvão e a magnitude das emissões associadas à produção.

A quantificação desse desempenho ambiental pode ser realizada por meio da abordagem de Mensuração, Relato e Verificação (MRV), que permite integrar parâmetros operacionais da carbonização a metodologias padronizadas de estimativa das emissões de gases de efeito estufa (GEE) (UNFCCC, 2006; UNFCCC, 2012; Silva et al., 2024). Assim, este estudo teve como objetivo avaliar o desempenho produtivo e climático da carbonização de resíduos provenientes de PMFS em sistema fornos-fornalha na Amazônia, considerando o controle térmico dos seis ciclos, o rendimento gravimétrico e a quantificação das emissões e do potencial de mitigação de GEE sob abordagem MRV.

2. Material e métodos

2.1 Área experimental e sistema fornos-fornalha

O estudo foi conduzido em uma Unidade de Produção de Carvão Vegetal (UPC), localizada em Paragominas, Pará, Amazônia brasileira, onde foi implantada uma unidade

demonstrativa do sistema fornos-fornalha. O sistema é constituído por fornos circulares de alvenaria interligados a uma fornalha central por dutos destinados à condução e combustão dos gases gerados durante a carbonização (Figura 1), conforme as especificações técnicas do sistema desenvolvido no âmbito do Projeto Siderurgia Sustentável.



Figura 1 – Sistema de carbonização fornos-fornalha construído no estado do Pará para carbonização de resíduos lenhosos de PMFS.

2.2 Delineamento e monitoramento das carbonizações

Foram utilizados resíduos lenhosos provenientes de PMFS, compostos por 18 espécies amazônicas previamente segregadas em duas classes de densidade básica: alta densidade (≥0,700 g cm^{-3}) e baixa densidade (≤0,500 g cm^{-3}). Foram realizados seis ciclos de carbonização em escala real (Figura 2), sendo três por classe de densidade.

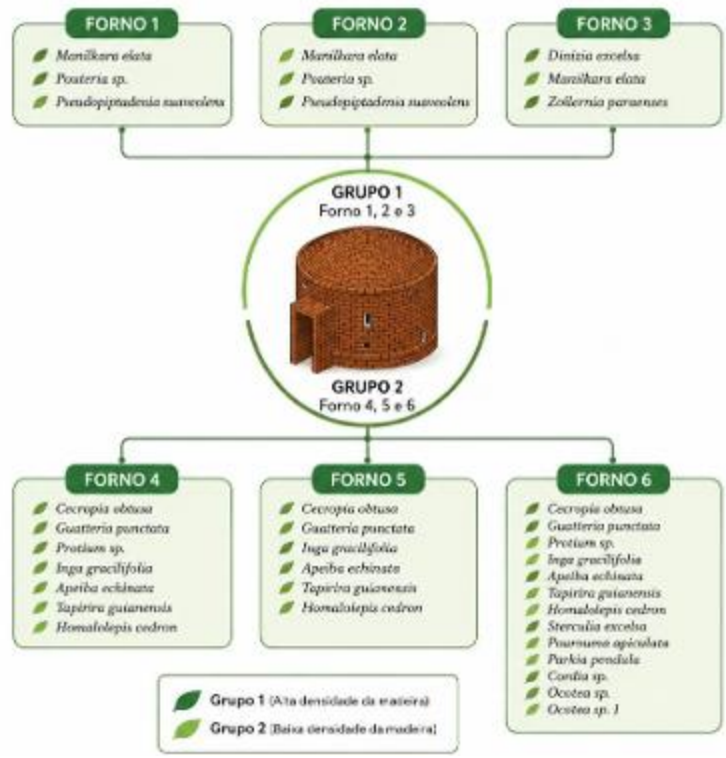


Figura 2: Distribuição das espécies utilizadas por forno

Para o monitoramento da temperatura durante a carbonização e resfriamento, foram utilizados termopares (Figura 3) produzidos sob medida para esta pesquisa, capaz de suportar temperaturas de até 1200 °C. O equipamento empregado foi um termopar mineral tipo "N", fornecido pela marca Consistec. Os termopares foram instalados nos fornos e conectados a um fieldlogger da marca Novus. A disposição dos termopares foi padronizada, com a instalação de quatro sensores em cada lado do forno. Assim, foram utilizados oito termopares por forno. Além disso, foi empregada uma câmera termográfica (Figura 3) da marca UNI-T, modelo UTi730E, com emissividade ajustada para 0,92. Complementarmente, utilizou-se um pirômetro infravermelho portátil (Figura 3), para a medição pontual, realizada de duas em duas horas, da temperatura dos fornos, por meio dos cilindros metálicos. Para representação do comportamento térmico de cada ciclo, as temperaturas registradas pelos oito termopares foram consolidadas pela média das leituras obtidas.

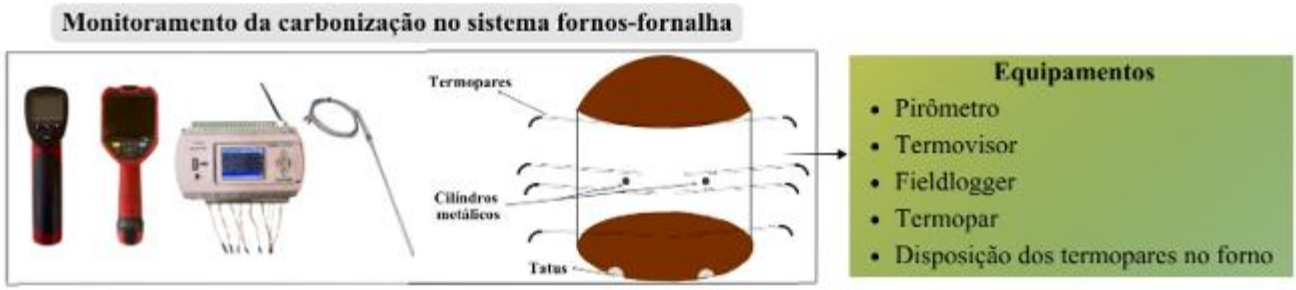


Figura 3 – Equipamentos utilizados para monitoramento da carbonização e resfriamento

2.3 Aplicação da abordagem MRV

A quantificação das emissões foi realizada segundo abordagem de Mensuração, Relato e Verificação (MRV), com base nas metodologias AM0041 (UNFCCC, 2006) e ACM0021 (UNFCCC, 2012), do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo. As emissões de CH_4 foram estimadas em função do rendimento gravimétrico da carbonização, enquanto as emissões de CO_2 foram estimadas em função do teor de umidade da madeira.

O fator de emissão de metano foi estimado pela Equação 1:

$$EFCH\,4 = (217{,}12 - (534{,}76 * GY))/1000 \quad (1)$$

Em que: $EFCH_4$ = fator de emissão para carbonização, em $MgCH_4$ $MgCarvão^{-1}$; GY = rendimento gravimétrico, em $MgCarvão/Mgmadeira^{-1}$ base seca (%).

Equação 2, Emissão de CH_4 (ECH_4):

$$ECH\,4 = EFCH\,4 * Ptotal * (1 - Q) \quad (2)$$

Em que: ECH_4: Emissão de CH_4 (em Mg CH_4/ano); EFCH4: Fator de emissão de CH_4 (em Mg CH_4/Mg carvão); P*total*: Produção total de carvão (em Mg/ano^{-1}); Q: Porcentagem de queima de gases.

Emissões de CO_2

Equação 3, Fator de Emissão de CO_2 (EF_{CO2}):

$$EFC\,02 = 114{,}165574 - (0{,}025565 * M) + (0{,}027518 * M^2) \quad (3)$$

Em que: EF_{CO2} = fator de emissão de CO_2 para carbonização, em kg CO_2 $/MgMadeira^{-1}$; M = centro de classe do teor de umidade da madeira carbonizada em base seca %.

Equação 4, Emissão de CO_2 (ECO_2):

$$ECO\,2cc = \left[\frac{EFCO\,2 * W}{1000}\right] * (1 + 0{,}8993) \quad (4)$$

Em que: ECO_2cq: Emissão de CO_2 por carbonização com queima de gases (em Mg CO_2/ano); $EFCO_2$: Fator de emissão de CO_2 (em kg CO_2/Mg madeira); W: Quantidade total de madeira carbonizada (em Mg/ano); 0,8993: variação na quantidade de CO2 emitida entre a carbonização sem e com queima de gases.

E, para realizar a comparação entre as produções com e sem o queimador de gases, calculamos a emissão de CO_2 sem a queima de gases (ECO_2sq), de acordo com a Equação 5:

$$ECO\,2\,sq = (EFCO\,2 * W)/1000 \quad (5)$$

Em que: ECO_2cq: Emissão de CO_2 por carbonização sem queima de gases (em Mg CO_2/ano); $EFCO_2$: Fator de emissão de CO_2 (em kg CO_2/Mg madeira); W: Quantidade total de madeira carbonizada (em Mg/ano).

Para a avaliação do efeito da combustão dos gases pirolenhosos, foram considerados dois cenários: linha de base, sem queima dos gases (Q = 0%), e cenário com utilização da fornalha, adotando-se eficiência de destruição de CH_4 de 50% (Q = 50%). Esse percentual foi adotado como parâmetro de referência para a estimativa do cenário de mitigação.

Equação 6, cálculo das Emissões Totais de CO_2e:

$$ECO2e = \sum(Ei * GWPi)$$ (6)

Em que: Ei: Emissão de cada gás (CH_4 e CO_2); GWPi: Potencial de Aquecimento Global (GWP) de cada gás (25 para CH_4 e 1 para CO_2).

3. Resultados e discussão

3.1 Controle térmico das carbonizações e rendimento em carvão vegetal

Os seis ciclos apresentaram diferenças na condução térmica, no tempo de permanência nas fases e no rendimento gravimétrico em carvão vegetal. Nos fornos de maior densidade, o Forno 1 permaneceu apenas 12 h na fase de secagem, atingiu aproximadamente 510 °C e apresentou o menor rendimento gravimétrico em base seca do grupo (27,45%), como apresentado na Tabela 1. Em contraste, o Forno 3 permaneceu cerca de 26 h na secagem, apresentou perfil térmico mais estável e alcançou o maior rendimento do grupo 1 (33,19%). O Forno 2 apresentou comportamento intermediário, com rendimento de 31,30% e pico térmico de aproximadamente 530 °C. Nos fornos abastecidos com resíduos de menor densidade, os rendimentos foram 30,18%, 28,73% e 35,83% para os Fornos 4, 5 e 6, respectivamente.

Tabela 1 – Rendimentos da carbonização. Onde: Rendimento gravimétrico base úmida – RGC (%Ubu); Rendimento gravimétrico base seca – RGC (%Ubs); Rendimento gravimétrico atiços – RGA (% Ubu); Rendimento gravimétrico de finos – RGF (% Ubu).

Forno	RGC (%bu)	RGC (%bs)	RGA (%bu)	RGF (%bu)
1	22,22	27,45	4,11	1,14
2	22,02	31,30	0,71	0,39
3	28,02	33,19	0,66	0,71
4	22,62	30,18	1,43	1,60
5	21,53	28,73	2,14	0,83
6	27,21	35,83	1,38	0,37

Os rendimentos gravimétricos em base seca variaram entre 27,45 e 35,83%, valores compatíveis com aqueles reportados para sistemas fornos-fornalha utilizando madeira de

Eucalyptus, cujos rendimentos normalmente variam entre 30 e 35% (Oliveira et al., 2013; Oliveira et al., 2017; Schettini et al., 2022). Esses resultados demonstram que resíduos provenientes de PMFS podem alcançar desempenho produtivo semelhante ao observado para matérias-primas tradicionalmente utilizadas na produção de carvão vegetal.

O Forno 6 apresentou o maior rendimento gravimétrico na base seca entre todos os ciclos, mantendo temperaturas predominantemente inferiores a 450 °C, inclusive durante grande parte da fase IV. Esses resultados evidenciam que o desempenho da carbonização não foi determinado pela classe de densidade da biomassa, mas pelas condições de condução térmica de cada ciclo. Os ciclos variaram entre 97 e 116 h, com média aproximada de 101 h. A variabilidade observada reforça a importância do monitoramento térmico tanto durante a carbonização quanto no resfriamento para o controle operacional do sistema.

3.2 Rendimento gravimétrico e desempenho climático sob abordagem MRV

Para evidenciar a influência do rendimento gravimétrico sobre as emissões estimadas pelo modelo MRV, foram selecionados para comparação os Fornos 1 e 6, por representarem, respectivamente, os extremos de menor (27,45%) e maior (35,83%) rendimento gravimétrico em base seca entre os seis ciclos avaliados. O Forno 1 apresentou fator de emissão de 0,07030 t CH_4 t^{-1} de carvão, enquanto o Forno 6 apresentou fator de 0,02550 t CH_4 t^{-1} de carvão, correspondendo a uma redução de aproximadamente 63% no fator de emissão estimado.

Tabela 2 – Cluster 1: Rendimento gravimétrico, comparação entre os fornos 1 e 6

Parâmetros	**Unidade**	**Projeto (fornos-fornalha)**	
		Forno 1	**Forno 6**
Produção total de carvão	t/ano	62,239	63,759
Rendimento gravimétrico, base seca	%	27,45	35,83
Fator de emissão de CH_4 ($EFCH_4$)	t CH_4/t carvão	0,07030	0,02550
Emissões de CH_4	t CH_4/ano	2,188	0,813
Redução da emissão de CH_4	t CH_4/ano	1,375	
Emissões (CH_4 → CO_2e)	t CO_2e/ano	111,845	69,553
Emissões por tonelada de carvão	t CO_2e/t	1,797	1,091

Redução absoluta de emissões	t CO_2e/ano	−42,293*
Redução específica (por tonelada de carvão)	t CO_2e/t	-0,706*

* Redução calculada considerando o forno 1 como referência comparativa.

A diferença de 0,706 t CO_2e t^{-1} de carvão entre os cenários demonstra que pequenas melhorias no rendimento gravimétrico podem produzir reduções expressivas nas emissões estimadas pelo modelo MRV. Embora essa relação decorra do modelo empírico adotado pelas metodologias AM0041 e ACM0021, os resultados evidenciam a importância do controle operacional da carbonização para a mitigação das emissões associadas à produção de carvão vegetal (Silva et al., 2024). Em termos de intensidade de emissão, os valores diminuíram de 1,797 t CO_2e t^{-1} de carvão no Forno 1 para 1,091 t CO_2e t^{-1} no Forno 6, resultando em diferença específica de 0,706 t CO_2e t^{-1} de carvão. No cenário anualizado, as emissões foram de 111,845 e 69,553 t CO_2e ano^{-1}, respectivamente, correspondendo a uma diferença absoluta de 42,293 t CO_2e ano^{-1}.

3.3 Mitigação das emissões pela combustão dos gases

Considerando o rendimento gravimétrico médio de 31,11% e produção anual estimada de 391,59 t de carvão, o cenário com eficiência de destruição de CH_4 de 50% apresentou emissões de 9,63 t CH_4 ano^{-1} e 568,57 t CO_2e ano^{-1}. Na linha de base, sem combustão dos gases (Q = 0%), as emissões atingiram 19,27 t CH_4 ano^{-1} e 809,42 t CO_2e ano^{-1}.

Tabela 3 – Cluster 2: Queima dos gases (queimador)

Parâmetros	**Unidade**	**Projeto (Q = 50%)**	**Baseline (Q = 0%)**
Produção total de carvão	t/ano	391,59	391,59
Rendimento gravimétrico médio	%	31,11	31,11
Fator de emissão de CH_4 ($EFCH_4$)	t CH_4/t carvão	0,05073	0,05073
Eficiência de queima de gases (Q)	%	50	0
Metano não destruído (1 − Q)	%	50	100

Emissões de CH_4	t CH_4/ano	9,63	19,27
Emissões de CO_2	t CH_2/ano	327,73	327,73
Emissões CO_2e	t CO_2e/ano	568,57	809,42
Redução total de emissões	t CO_2e/ano	-240,85	
Emissões por tonelada de carvão	t CO_2e/t	1,452	2,067
Redução específica	t CO_2e/t	−0,615	

A combustão dos gases resultou, portanto, em redução estimada de 240,85 t CO_2e ano^{-1}, equivalente a 0,615 t CO_2e por tonelada de carvão produzido. As intensidades de emissão foram reduzidas de 2,067 para 1,452 t CO_2e t^{-1} de carvão, sem alteração do rendimento gravimétrico no cenário comparativo. Esse resultado confirma o potencial do sistema fornos-fornalha para reduzir emissões de metano por meio da destruição parcial dos gases pirolenhosos, conforme descrito por Oliveira et al. (2013), Schettini et al. (2022) e Silva et al. (2024).

4. Conclusões

O sistema fornos-fornalha permitiu a produção de carvão vegetal a partir de resíduos de PMFS em condições reais da Amazônia, com rendimentos gravimétricos entre 27,45 e 35,83%. A abordagem MRV evidenciou menor intensidade de emissão nos ciclos de maior rendimento e estimou redução de 240,85 t CO_2e ano^{-1} com a combustão parcial dos gases. Esses resultados indicam a importância do controle da carbonização e a queima dos gases são determinantes para o desempenho produtivo e climático do sistema.

5. Agradecimentos

Os autores agradecem ao CNPq (Processos nº 406053/2022-7 e nº 350017/2023-9), à FAPEMIG (APQ-05431-24) e à FAPESPA, pelo financiamento do projeto “Manejo de florestas nativas de importância econômica para a Amazônia” (Programa PDPG CAPES/FAPESPA, Termo de Outorga nº 078/2023). Agradecem ainda ao Grupo Keilla, à Embrapa Amazônia Oriental, à UFLA, à UFRA e à UEMASUL pelo apoio à execução desta pesquisa.

6. Referências bibliográficas

BARROS, D. de S. *et al.* Does the Segregation of Wood Waste from Amazonia Improve the Quality of Charcoal Produced in Brick Kilns?. Bioenergy Research, [*s. l.*], vol. 16, nº 3, p. 1604–1617, 2023. https://doi.org/10.1007/s12155-022-10551-w

LIMA, M. D. R. *et al.* Charcoal of logging wastes from sustainable forest management for industrial and domestic uses in the Brazilian Amazonia. Biomass and Bioenergy, [*s. l.*], vol. 142, p. 105804, 2020.https://doi.org/ 10.1016/J.BIOMBIOE.2020.105804

LIMA, M. D. R. *et al.* Classifying waste wood from Amazonian species by near-infrared spectroscopy (NIRS) to improve charcoal production. Renewable Energy, [*s. l.*], vol. 193, p. 584–594, 2022. https://doi.org/ 10.1016/J.RENENE.2022.05.048

LIMA, M. D. R. *et al.* Segregating Amazonia logging wastes from sustainable forest management improves carbonization in brick kilns. Renewable Energy, [*s. l.*], vol. 211, p. 772–788, 2023.https://doi.org/ 10.1016/J.RENENE.2023.04.126

OLIVEIRA, A. C. *et al.* Análise de risco econômico de dois sistemas produtivos de carvão vegetal. Floresta e Ambiente, [*s. l.*], vol. 24, 2017. https://doi.org/ 10.1590/2179-8087.026516

OLIVEIRA, A. C. et al. Otimização da produção do carvão vegetal por meio do controle de temperaturas de carbonização. Revista Árvore, [s. l.], vol. 37, no 3, p. 557–566, 2013.

SCHETTINI, B. L. S. *et al.*Furnace-kiln system: How does the use of new technologies in charcoal production affect the carbon balance?. Industrial CropsandProducts, [*s. l.*], vol. 187, p. 115330, 2022.https://doi.org/ 10.1016/J.INDCROP.2022.115330

SILVA, L. F. da*et al.*Kiln-Furnace System: Validation of a Technology for Producing Charcoal with Less Environmental Impact in Brazil. Forests, [*s. l.*], vol. 15, nº 4, 2024. https://doi.org/ 10.3390/f15040645

UNFCCC. Mitigation of Methane Emissions in the Wood Carbonization Activity for Charcoal Production (AM0041). [S. l.]: [s. d.], 2006.

UNFCCC. Reduction of emissions from charcoal production by improved kiln design and/or abatement of methane (ACM0021). [S. l.]: [s. d.], 2012.

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Produção e Caracterização Energética do Carvão Vegetal de resíduos de Castanha-do-Pará, Teca e Ipeúba

Karina do Socorro Moura Sousa[1]; Risley Maria Rodrigues Barbosa[1]; José Adley Leal da Cunha[1]; Luana Maia Azevedo[1;] Aristeu Teixeira da Silva Junior[2]; Ariene Oliveira Barros[3]; Paulo Cezar Gomes Pereira[1], Denes de Souza Barros[1]

[1] Universidade federal Rural da Amazônia, *Campus* Paragominas
[2] Departamento de Polícia Técnico Científica do Estado do Amazonas
[3] Engenheira Florestal

Resumo: O objetivo deste trabalho foi avaliar e comparar o potencial energético do carvão vegetal a partir de análises físicas e químicas de resíduos oriundos de exploração florestal de três biomassas: *Bertholletia excelsa* Humn. & Bonpl. (Castanha-do-Pará), *Tectona grandis* L.F. (teca) e *Eperua falcata* Aubl. (ipeúba), com cinco repetições por espécie. A *B. excelsa* apresentou a maior umidade (30,99%) e a *T. grandis* a menor (9,89%). O rendimento gravimétrico variou de 32,38% (*B. excelsa*) a 39,10% (*T. grandis*). A densidade do carvão variou de 0,2860 a 0,8480 g/cm³, com a *B. excelsa* apresentando a maior densidade. Houve correlação direta e positiva entre o teor de carbono fixo e o poder calorífico superior. Na composição química imediata, observou-se efeito significativo sobre o teor de voláteis, cinzas e carbono fixo entre as espécies. A *B. excelsa* apresentou a maior densidade energética do carvão, embora a teca tenha apresentado maior poder calorífico, evidenciando que a densidade energética foi mais influenciada pela densidade do que pelo poder calorífico. Conclui-se que as biomassas avaliadas apresentam potencial para uso como fonte renovável de energia.

Palavras-chave: carvão vegetal; biomassa; energia renovável.

Production and Energetic Characterization of Charcoal from Brazil Nut, Teak, and Ipeúba Residues

Abstract: The objective of this work was to evaluate and compare the energy potential of charcoal based on physical and chemical analyses of residues from forest exploitation of three biomasses: Brazil-nut husk (*Bertholletia excelsa* Humn. & Bonpl.), teak (*Tectona grandis* L.F.) and ipeúba (*Eperua falcata* Aubl.), with five replicates per species. *B. excelsa* presented the highest moisture content (30.99%) and *T. grandis* the lowest (9.89%). Charcoal yield ranged from 32.38% (*B. excelsa*) to 39.10% (*T. grandis*). Charcoal density ranged from 0.2860 to 0.8480 g/cm³, with *B. excelsa* showing the highest density. A direct, positive relationship was found between fixed carbon content and higher calorific value. Regarding immediate chemical composition, significant differences were observed for volatile matter, ash and fixed carbon among species. *B. excelsa* presented the highest energy density, although teak had a higher calorific value, showing that energy density was more influenced by density than by calorific value. It is concluded that the biomasses evaluated present potential for use as a renewable energy source.

Keywords: charcoal; biomass; renewable energy.

1. Introdução

O Brasil mantém a liderança mundial na produção de carvão vegetal, com 6,6 milhões de toneladas produzidas em 2024, das quais aproximadamente 97% foram destinadas ao mercado interno. Desse total, cerca de 6,5 milhões de toneladas tiveram origem em florestas plantadas, evidenciando a importância da silvicultura para o suprimento energético da indústria nacional. O setor siderúrgico permanece como o principal consumidor desse insumo, reforçando o papel estratégico do carvão vegetal produzido a partir de fontes renováveis na cadeia produtiva do ferro-gusa e do aço (IBÁ, 2025).

O Balanço Energético Nacional apontou que 47,4% da energia produzida no país é proveniente de fontes renováveis, das quais mais de 30% correspondem à biomassa (EPE, 2023), o que aproxima o país da meta do Objetivo de Desenvolvimento Sustentável (ODS) 07: energia acessível e limpa.

No Brasil, as florestas plantadas respondem pela maior parte da produção de carvão vegetal. Apesar disso, os resíduos de florestas nativas continuam relevantes para o mercado interno, representando uma alternativa energética renovável capaz de reduzir a dependência de combustíveis fósseis, contribuindo para a -diminuição da emissão de gases de efeito estufa (SCREMIN, 2012).

O ouriço da *Bertholletia excelsa* Humn. & Bonpl. (Castanha-do-Pará) é gerado em grande quantidade após o beneficiamento do fruto, sendo o resíduo tradicionalmente aproveitado de forma artesanal ou como combustível para fornalhas (BRANDÃO, 2021). A *Tectona grandis* (teca), espécie exótica de alto valor econômico e densidade básica variando entre 0,44 – 0,82 g/cm³, tem seus resíduos resultantes da colheita de povoamentos implantados ainda pouco valorizados, apesar do seu potencial energético (NOCETTI et al., 2011). A espécie nativa amazônica *Eperua falcata* Aubl (ipeúba), é amplamente utilizada na construção civil. Os resíduos gerados nas serrarias apresentam potencial ainda pouco explorado para fins energéticos (COWAN, 1975).

Diante do exposto, este trabalho teve como objetivo avaliar e comparar o potencial energético do carvão vegetal a partir de análises físicas e químicas dos resíduos de três biomassas florestais: o ouriço da Castanha-do-Pará, resíduo da colheita de teca e resíduo do desdobramento de ipeúba.

2. Material e métodos

O trabalho foi conduzido no Laboratório de Ciências Florestais da Universidade Federal Rural da Amazônia (UFRA), Campus de Paragominas, município situado no nordeste do estado do Pará (Pinto et al., 2009).

Foram coletados resíduos de três espécies florestais, conforme figura 1: galhos de teca (A) considerando a partir da primeira bifurcação depois do fuste, ouriços de castanha-do-Pará (B) e resíduos de serraria de ipeúba (C) proveniente de uma serraria do município de Paragominas/PA. Após a seleção e corte, as amostras foram levadas ao Laboratório de

Anatomia da Madeira da UFRA, sendo confeccionadas cinco amostras (repetições) para cada espécie. As análises seguiram as etapas conforme a figura 2.

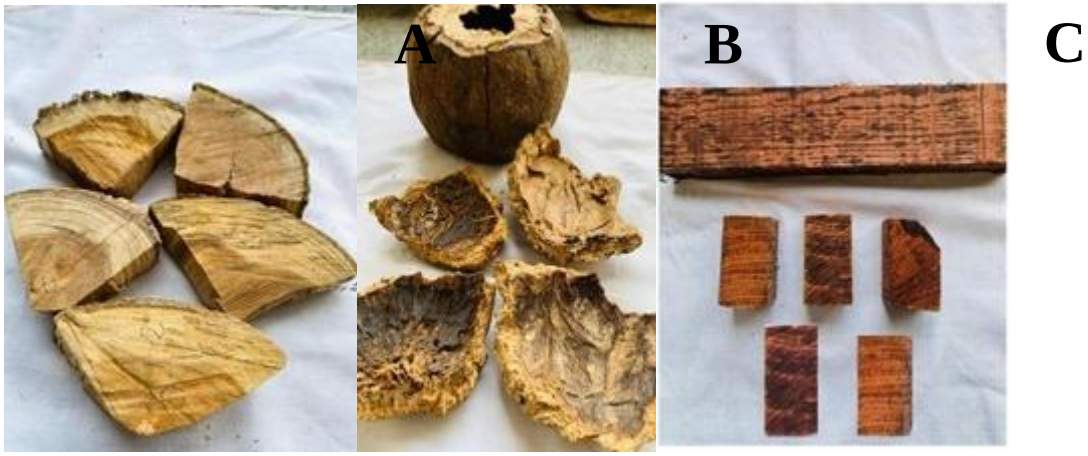


Figura 4 - Imagens dos corpos de prova selecionados para o estudo de resíduos de *Tectona grandis* (A), *Bertholletia excelsa* (B) e *Eperua falcata* (C).
Fonte: Autores (2024).

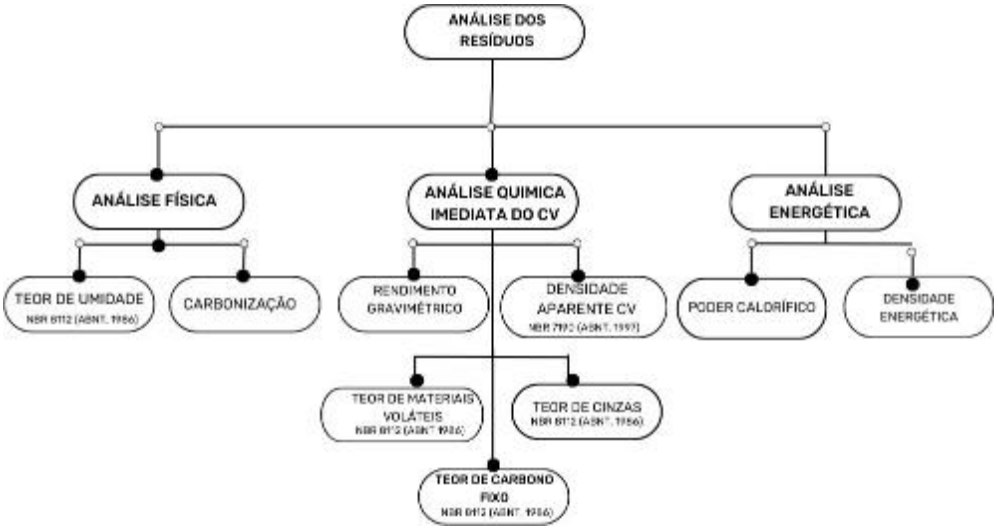


Figura 5 - Fluxograma das etapas de realização das análises.
Fonte: Autores (2024).

Inicialmente, determinou-se a massa inicial das amostras em balança analítica de precisão (0,0001 g), seguida de secagem em estufa de circulação forçada a 103 ± 2 °C até massa constante, calculando-se a umidade conforme a NBR 8112 (ABNT, 1986):

$$TU\ (\%) = [(MU - MS) / MS] \times 100 \qquad \text{Eq. (1)}$$

Onde – TU = teor de umidade (%); UM: massa úmida (g); MS: massa seca (g).

As amostras foram então carbonizadas em mufla, com controle manual de temperatura do ambiente até 450 °C, por um período total de 4 h 30 min. A densidade do carvão foi determinada pelo método de imersão em balança hidrostática, com amostras saturadas em água e

posteriormente secas em estufa (103 ± 2 °C) até massa constante, conforme a NBR 7190 (ABNT, 1997):

$$DCV = MS / VS \quad \text{Eq. (2)}$$

Onde – DCV: densidade relativa aparente do carvão vegetal (g/cm³); MS: massa seca (g); VS: volume saturado (cm³).

O rendimento gravimétrico do carvão foi calculado por:

$$RGc\ (\%) = (Mcarvão / Mbiomassa) \times 100 \quad \text{Eq. (3)}$$

Onde – Mcarvão: massa do carvão produzido (kg); Mbiomassa: massa da biomassa enfornada (kg).

Após moagem do carvão (granulometria de 0,150 a 0,210 mm), realizou-se a análise química imediata: teor de materiais voláteis (TMV), teor de cinzas (TCi) e o teor de carbono fixo (TCF), respectivamente equações 4, 5 e 6, de acordo com a NBR 8112 (ABNT, 1986):

$$TMV\ (\%) = [(Mc.s. – Mc.cal.) / Mc.s.] \times 100 \quad \text{Eq. (4)}$$

$$TCi\ (\%) = (Mci / Mc.s.) \times 100 \quad \text{Eq. (5)}$$

$$TCF\ (\%) = 100 – (TMV + TCi) \quad \text{Eq. (6)}$$

Onde – TMV: Teor de materiais voláteis (%); M (c.s.) = Massa das partículas de carvão seco em estufa a 103º ± 2 ºC (g); M (c.cal.) = Massa das partículas de carvão calcinado a 950 ºC durante 6 minutos (g); Tci = Teor de cinzas (%); M = Massa do material incinerado (cinzas) a 750 ºC durante 6 horas (g); M = Massa das partículas de carvão seco em estufa à 103º ± 2ºC (g).

A densidade energética (DE) foi calculada pela Equação 7:

$$DE = DRA \times PCS \quad \text{Eq. (7)}$$

Onde: DE = densidade energética (GJ/m³); DRA = densidade relativa aparente do carvão (kg/m³); PCS = poder calorífico superior (GJ/m³).

Os dados foram avaliados em delineamento inteiramente casualizado, com três tratamentos (espécies) e cinco repetições, submetidos à Análise de Variância (ANOVA) e ao teste de Tukey (5% de probabilidade) no software AgroEstat. A associação entre carbono fixo e poder calorífico superior foi testada por correlação de Pearson ($p \leq 0,05$) utilizando Microsoft Office Excel.

3. Resultados e discussão

As três biomassas apresentaram variações significativas em composição química, umidade, densidade e demais propriedades, com todas exibindo características adequadas ao uso como fonte energética.

A umidade variou entre 9,89% (*T. grandis*) e 30,99% (*B. excelsa*), não havendo diferença significativa entre *T. grandis* e *E. falcata* (Tabela 1).

Tabela 1 - Comparação de médias de teor de umidade (%) de resíduos *Bertholletia excelsa*, *Tectona grandis*, *Eperua falcata*, pelo teste 't' de Tukey (5% de significância)

Resíduos	Espécie	Umidade (%)
Galhos	*Tectona grandis*	9,89 a
Serraria	*Eperua falcata*	14,32 a
Ouriço	*Bertholletia excelsa*	30,99 b

Médias seguidas de letras distintas diferem entre si pelo teste de Tukey (5%).

O teor de umidade da espécie *E. falcata* no presente trabalho apresentou um potencial inferior ao valor encontrado por Maia e Ehm (2012) e Silva et al. (2013), enquanto o de *T. grandis* se aproximou do observado por Lopes et al. (2014) e Braz et al. (2015) para madeira ao ar livre. Para *B. excelsa*, os valores de Carmona et al. (2017) e Menezes (2023) foram inferiores aos do presente estudo. Segundo Valente (1986), a umidade da madeira mais adequada à carbonização deve ser inferior a 20–30% (base seca). Dessa forma, os resíduos de *Tectona grandis* e *Eperua falcata* atendem à faixa de umidade recomendada, enquanto o ouriço de *Bertholletia excelsa* apresentou teor de umidade de 30,99%, valor ligeiramente superior ao limite recomendado, indicando a necessidade de uma secagem adicional para otimizar a eficiência da carbonização. Não houve diferença significativa entre *T. grandis* e *B. excelsa*. O resíduo de *E. falcata* apresentou o maior rendimento e estatisticamente diferente das demais biomassas (Tabela 2).

Tabela 2 - Comparação de médias de rendimento gravimétrico (RG%) de resíduos de *Bertholletia excelsa, Tectona grandis, Eperua falcata*.

Resíduo	Espécie	RG (%)
Galhos	*Tectona grandis*	34,18 b
Serraria	*Eperua falcata*	39,10 a
Ouriço	*Bertholletia excelsa*	32,28 b

Médias seguidas de letras distintas diferem entre si pelo teste de Tukey (5%). RG: rendimento gravimétrico.

Os valores de RG aferidos para *B. excelsa* estão próximos aos descritos de Carmona et al. (2017) e superiores aos de Silva et al. (2007) e Teleken et al. (2022). Silva et al., (2007), ao realizarem um trabalho acerca do carvão de resíduos de indústria madeireira de três espécies florestais, indicaram percentuais de rendimento gravimétrico com médias que variavam entre 25,37% e 29,55%, valores esses, inferiores aos percentuais encontrados no presente trabalho.

Conforme salientado por Vale, Dias e Santana (2010), tanto a qualidade da madeira quanto o processo de carbonização determinam o rendimento gravimétrico, cujos valores comerciais típicos variam entre 25% e 30%, valores abaixo dos obtidos neste trabalho.

A densidade relativa aparente do carvão vegetal dos resíduos analisados variou de 0,2860 g/cm³ (*T. grandis*) a 0,8480 g/cm³ (*B. excelsa*), com diferença significativa entre todos os tratamentos (Tabela 3).

Tabela 3 - Comparação de médias de densidade relativa aparente do carvão (g/cm³) de resíduos *de Bertholletia excelsa, Tectona grandis, Eperua falcata*.

Resíduo	Espécie	DCV (g/cm³)
Galhos	*Tectona grandis*	0,2860 c
Serraria	*Eperua falcata*	0,6440 b
Ouriço	*Bertholletia excelsa*	0,8480 a

Médias seguidas de letras distintas diferem entre si pelo teste de Tukey (5%). Legenda: DCV (densidade relativa aparente do carvão vegetal).

Os valores encontram-se acima dos relatados por Oliveira e Silva (2016) e Pereira et al. (2016) para outras espécies. Segundo Santos (2008), a densidade aparente do carvão para fins comerciais não deve ser inferior a 0,400 g/cm³, padrão este atendido por *B. excelsa* e *E. falcata*, mas não por *T. grandis*.

As análises da composição química imediata indicaram diferença significativa entre os resíduos das espécies estudadas (Tabela 4).

Tabela 4 - Comparação de médias da composição química imediata do carvão de resíduos de *Bertholletia excelsa, Tectona grandis, Eperua falcata.*

Resíduo	Espécie	TMV (%)	TCi (%)	TCF (%)
Galhos	*Tectona grandis*	27,47 c	2,40 b	70,13 a
Serraria	*Eperua falcata*	32,33 a	0,55 c	67,13 b
Ouriço	*Bertholletia excelsa*	30,61 b	2,94 a	66,45 b

Médias seguidas de letras distintas diferem entre si pelo teste de Tukey (5%). Legenda: TMV (teor de materiais voláteis); TC (teor de cinzas); TCF (teor de carbono fixo).

O carvão para fins industriais deve apresentar teor de cinzas inferior a 5%, carbono fixo maior que 75%, umidade inferior a 5% e voláteis entre 20% e 25% (Assis et al., 2016; Costa et al., 2019; Rosa et al., 2012), todas os resíduos avaliados atenderam a esses parâmetros. Os resultados de *T. grandis* foram próximos aos de Arruda et al. (2010). Segundo Arantes et al. (2013), o carbono fixo está inversamente relacionado ao teor de voláteis, e Santos (2008) destaca que voláteis entre 20% e 25% favorecem a estabilidade da chama no alto-forno, ainda que aumentem o consumo de carvão. Já para uso doméstico, teores elevados de voláteis reduzem a eficiência energética (Frederico, 2009). Considerando o teor de cinzas ideal entre 1% e 2% para fins siderúrgicos (Gomes, 2006), apenas *E. falcata* atendeu integralmente a esse critério.

Os valores médios de poder calorífico superior (PCS) e densidade energética (DE) indicaram diferença significativa entre os resíduos das espécies estudadas Tabela 5.

Tabela 5 - Comparação de médias das propriedades energéticas do carvão de resíduos de *Bertholletia excelsa, Tectona grandis, Eperua falcata.*

Resíduo	Espécie	PCS (kcal.kg^{-1})	DE (kcal.m^{-3})
Galhos	*Tectona grandis*	7059,69 a	2021,08 c
Serraria	*Eperua falcata*	7004,15 a	4517,92 b
Ouriço	*Bertholletia excelsa*	6876,78 b	5827,94 a

Médias seguidas de letras distintas diferem entre si pelo teste de Tukey (5%). Legenda: PCS: poder calorífico superior; DE: densidade energética.

O menor PCS de *B. excelsa* está associado ao seu menor teor de carbono fixo e maior teor de cinzas (Tabela 4). Ainda assim, *B. excelsa* apresentou a maior DE, explicada por sua maior densidade em relação às demais espécies, evidenciando que a DE foi mais influenciada pela densidade do que pelo PCS, corroborando com as encontradas por Barros (2021). Segundo Loureiro et al. (2021), a densidade relativa aparente e o PCS influenciam diretamente a densidade energética, parâmetro essencial para comparar biomassas por reunir, em uma única variável, características químicas, umidade e conteúdo calorífico (Oliveira, 2017). *T. grandis* e *E. falcata* não diferiram entre si quanto ao PCS, ambas superiores por apresentarem maior carbono fixo (Tabela 4), o qual está diretamente associado ao poder calorífico (Oliveira et al., 1982; Brito, 1993).

4. Conclusões

Os resíduos das espécies avaliadas apresentaram teores de umidade compatíveis com o processo de carbonização (com exceção do ouriço de *Bertholletia excelsa*, que apresentou valor ligeiramente superior ao recomendado) e elevado rendimento gravimétrico em carvão vegetal. A análise química imediata demonstrou que os resíduos possuem características adequadas para aplicação energética. Além disso, verificou-se que a densidade aparente do carvão vegetal exerceu maior influência sobre a densidade energética do que o poder calorífico. Dessa forma, as biomassas avaliadas apresentam potencial para utilização como fonte de energia renovável.

5. Referências bibliográficas

Arantes, M. D. C., Trugilho, P. F., Lima, J. T., Vieira, R. S., Melo, I. C. N. A., & Andrade, C. R. (2013). Características do carvão de um clone de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden x *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake. Cerne, 19(3), 423-431.

Arruda, T. P. M., Sousa, A. P. M., & Carlesso, J. (2010). Avaliação das propriedades energéticas do carvão vegetal de resíduos da espécie de teca (Tectona grandis L.). In Anais do 5º Congresso Internacional de Bioenergia. Curitiba, PR.

Assis, M. R., Brancheriau, L., Napoli, A., & Trugilho, P. F. (2016). Factors affecting the mechanics of carbonized wood: literature review. Wood Science and Technology, 50, 519-536.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. (1986). Carvão vegetal: análise imediata (NBR 8112). ABNT.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. (1997). Projeto de estruturas de madeira (NBR 7190). ABNT.

Barros, D. S. (2021). Efeitos da segregação de resíduos lenhosos de planos de manejo florestal da Amazônia nas características do carvão vegetal siderúrgico (Tese de doutorado). Universidade Federal Rural da Amazônia.

Brandão, I. D. (2021). Comercialização da castanha-do-pará na Amazônia é tema de publicação. Embrapa.

Braz, R. L., Duarte, A. P. C., Oliveira, J. T. D. S., Motta, J. P., & Rosado, A. M. (2015). Curva característica de secagem da madeira de Tectona grandis e Acacia mangium ao ar livre. Floresta e Ambiente, 22, 117-123.

Brito, J. O. (1993). Reflexões sobre a qualidade do carvão vegetal para uso siderúrgico. IPEF.

Carmona, I. N., Sampaio, J. S., Andrade, F. W. C., Júnior, C. D. C., Junior, S. M. O. M., Moreira, L. S., & Moutinho, V. H. P. (2017). Potencial energético da biomassa e carvão vegetal de resíduos de castanha-do-pará (Bertholletia excelsa Bonpl.). In Anais do 3º Congresso Brasileiro de Ciência e Tecnologia da Madeira. Florianópolis, SC.

Costa, A. C. P. R., Ramalho, F. M. G., Costa, L. R., Trugilho, P. F., & Hein, P. R. G. (2019). Classification of commercial charcoal for domestic use by near infrared spectroscopy. Biomass and Bioenergy, 127, 105280.

Cowan, R. S. (1975). A monograph of the genus Eperua (Leguminosae: Caesalpinioideae). Smithsonian Contributions to Botany, 28, 1-45.

Empresa de Pesquisa Energética. (2023). Balanço energético nacional 2023: ano base 2022. EPE.

Frederico, P. G. U. (2009). Efeito da região e da madeira de eucalipto nas propriedades do carvão vegetal (Dissertação de mestrado). Universidade Federal de Viçosa.

Gomes, M. T. M. (2006). Potencialidades de inserção do carvão vegetal em bolsas de mercadoria (Dissertação de mestrado). Universidade Federal de Viçosa.

Indústria Brasileira de Árvores. (2025). Relatório anual de 2025: ano base 2024. IBÁ.

Lopes, J. O., Braz, R. L., Silva, J. C., & Ferreira, R. A. (2014). Propriedades físicas da madeira de teca termorretificada. Floresta e Ambiente, 21, 569-577.

Loureiro, B. A., Trugilho, P. F., Hein, P. R. G., Rosado, A. M., & Andrade, C. R. (2021). Rendimento gravimétrico da carbonização e caracterização qualitativa do carvão vegetal em clones de híbridos de Corymbia spp. para uso industrial. Ciência Florestal, 31, 214-232.

Maia, J., & Ehm, P. J. (2012). Caracterização química de quatro espécies leguminosas do gênero Eperua do Alto Rio Negro. In Anais do I Congresso de Iniciação Científica PIBIC/CNPq-PAIC/FAPEAM.

Menezes, A. G. L. (2023). Análise de três biomassas residuais do processamento da castanha do Brasil para fins energéticos (Trabalho de conclusão de curso). Universidade Federal Rural da Amazônia.

Nocetti, M., Rozenberg, P., Chaix, G., & Macchioni, N. (2011). Provenance effect on the ring structure of teak (Tectona grandis L.f.) wood by X-ray microdensitometry. Annals of Forest Science, 68, 1375-1383. https://doi.org/10.1007/s13595-011-0145-4

Oliveira, J. B., Gomes, P. A., & Almeida, M. R. (1982). Propriedades do carvão vegetal. In Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais (Ed.), Carvão vegetal: destilação, propriedades e controle de qualidade (pp. 39-61). CETEC.

Oliveira, L. H. (2017). Aproveitamento de resíduos madeireiros de Pinus sp. com diferentes granulometrias para a produção de briquetes. Revista de Ciências Agrárias, 40(3), 683-691.

Oliveira, L. L. M., & Silva, H. C. (2016). Densidade básica da madeira e caracterização do carvão vegetal proveniente de resíduos moveleiros, no município de Paragominas - PA (Trabalho de conclusão de curso). Universidade Federal Rural da Amazônia.

Pereira, B. L. C., Oliveira, A. C., Carvalho, A. M. M. L., Carneiro, A. C. O., Santos, L. C., & Vital, B. R. (2016). Efeito da carbonização da madeira na estrutura anatômica e densidade do carvão vegetal de Eucalyptus. Ciência Florestal, 26, 545-557.

Pinto, W. H. A., et al. (2009). Diagnóstico socioeconômico e florestal do município de Paragominas (Relatório Técnico). Instituto do Homem e Meio Ambiente da Amazônia (Imazon).

Rosa, R. A., Arantes, M. D. C., Paes, J. B., Andrade, W. S. P., & Moulin, J. C. (2012). Qualidade do carvão vegetal para o consumo doméstico. Journal of Biotechnology and Biodiversity, 3(2), 41-48.

Santos, M. A. S. (2008). Parâmetros de qualidade do carvão vegetal para uso em alto-forno. In Anais do 1º Fórum Nacional sobre Carvão Vegetal. UFMG.

Scremin, A. L. T. (2012). Estudo energético e físico-químico do carvão vegetal de Eucalyptus dunnii Maiden (Dissertação de mestrado). Universidade Estadual do Centro-Oeste.

Silva, A. C. R. (2013). Caracterização química dos resíduos de Eperua: aplicação em formulações adesivas e energia. Anais da 65ª Reunião Anual da SBPC, 1(1), 35.

Silva, M. G., Numazawa, S., Araújo, M. M., Bittencourt, A. M., & Galvão, A. P. M. (2007). Carvão de resíduos de indústria madeireira de três espécies florestais exploradas no município de Paragominas, PA. Acta Amazônica, 37(1), 61-70.

Teleken, J. G., Oliveira, A. F., Parisotto, E. I. B., & Silva, L. F. F. (2022). Produção de carvão vegetal de uso siderúrgico a partir de resíduos da exploração florestal. Open Science Research VIII. https://doi.org/10.37885/221211139

Vale, A. T., Dias, Í. S., & Santana, M. A. E. (2010). Relações entre propriedades químicas, físicas e energéticas da madeira de cinco espécies de cerrado. Ciência Florestal, 20(1), 137-145.

Valente, O. F. (1986). Carbonização da madeira de Eucalyptus. Informe Agropecuário, 12(141), 74-79.

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Produtividade e características energéticas da madeira de clones de *Eucalyptus* spp. em dois sítios aos 36 meses de idade

Carlos Eduardo Barbosa da Silva[1]; Lamara Katley Soares Freiras Vaz[1]; Luana Correia de Souza[1]; Émilly Amábilly Rocha Borges[1]; Guilherme Conceição dos Santos[1]; Gabriel de Almeida Bastos[1]; Macksuel Fernandes da Silva[1]; Carlos Roberto Sette Junior[1]

[1] Universidade Federal de Goiás - UFG

Resumo: Este estudo avaliou o crescimento, a sobrevivência e as características energéticas da madeira de oito clones de *Eucalyptus* spp. aos 36 meses de idade, implantados em dois sítios edafoclimáticos distintos, visando avaliar os materiais genéticos para fins energéticos. O delineamento experimental consistiu em testes clonais dispostos nos sítios 1 e 2, onde foram mensurados o volume de madeira, a taxa de sobrevivência, a densidade básica, os poderes caloríficos superior e inferior, a análise imediata, a biomassa e a produtividade energética. Os resultados evidenciaram uma expressiva influência do local de plantio e da interação genótipo x ambiente. O sítio 2 propiciou maior crescimento volumétrico médio devido aos maiores índices pluviométricos. O clone C5 apresentou a melhor qualidade física do lenho, com maior densidade básica e menor porcentagem de casca. Contudo, em termos de eficiência bioenergética, o clone C3 despontou como o material mais promissor regionalmente, liderando a produtividade energética no sítio 1 e alcançando a vice-liderança no sítio 2. Conclui-se que a triagem precoce orientada pela produtividade por hectare é viável, recomendando-se a continuidade do monitoramento até o final do ciclo de corte comercial.

Palavras-chave: Bioenergia; Biomassa; Densidade Básica.

Productivity and energetic characteristics of wood from *Eucalyptus* spp. clones in two sites at 36 months of age

Abstract: This study evaluated the growth, survival, and energetic characteristics of wood from eight *Eucalyptus* spp. clones at 36 months of age, established across two distinct soil and climate sites, aiming to assess the genetic materials for energy purposes. The experimental design consisted of clonal trials located at sites 1 and 2, where wood volume, survival rate, basic density, higher and lower heating values, proximate analysis, biomass, and energy productivity were measured. The results showed a significant influence of the planting site and the genotype-by-environment interaction. Site 2 provided higher average volumetric growth due to higher rainfall levels. Clone C5 exhibited the best physical wood quality, presenting the highest basic density and lowest bark percentage. However, in terms of bioenergy efficiency, clone C3 emerged as the most promising material regionally, leading energy productivity at site 1 and reaching the second position at site 2. It is concluded that early screening driven by productivity per hectare is viable, and continuing the monitoring until the end of the commercial rotation cycle is recommended.

Keywords: Bioenergy; Biomass; Basic Density.

1. Introdução

A busca por fontes de energia renovável tem impulsionado o setor florestal brasileiro a otimizar a produção de biomassa para fins bioenergéticos. Diante deste cenário o gênero *Eucalyptus* spp. destaca-se como umas das principais alternativas para o suprimento de matéria-prima, devido ao seu rápido crescimento, plasticidade adaptativa e características tecnológicas favoráveis à queima direta e à carbonização (Carneiro *et al.*, 2014). No entanto, a produtividade final e a qualidade da madeira gerada estão intrinsecamente ligadas à escolha do material genético e à sua interação com as condições edafoclimáticas locais.

A região do Cerrado brasileiro, particularmente o estado de Goiás, apresenta grande potencial para a expansão das florestas plantadas voltadas ao abastecimento de polos agroindústrias e siderúrgicos. Contudo, as oscilações no regime pluviométrico e as variações nas propriedades físicas e químicas dos solos regionais exercem forte influência no estabelecimento e no incremento volumétrico dos povoamentos (Da Cunha *et al*., 2021). Nesse contexto, o estudo da interação genótipo x ambiente (G x A) torna-se uma ferramenta indispensável para mitigar riscos silviculturais, permitindo identificar clones que aliem estabilidade produtiva a um elevado rendimento energético por unidades de área (Da Cunha *et al*., 2023).

Para a seleção de materiais genéticos com foco em bioenergia, variáveis biométricas como o volume de madeira e a taxa de sobrevivência devem ser analisadas em conjunto com as propriedades da qualidade da madeira. Propriedades físicas, como densidade básica da madeira, correlacionam-se diretamente com o rendimento gravimétrico e a retenção de carbono fixo durante a combustão (Lopes *et al*., 2023). Adicionalmente, variáveis termoquímicas, como o poder calorífico inferior (PCI), determinam a quantidade líquida de energia liberada por unidades de massa, consolidando a produtividade energética como o critério mais robusto para a triagem e recomendações de clones comerciais (Silva *et al*., 2022).

Diante do exposto, este trabalho teve como objetivo avaliar a produtividade energética, com base nas variáveis de crescimento silvicultural e da qualidade da madeira, de oito clones de *Eucalyptus* spp. implantados em testes clonais nos sítios 1 e 2, aos 36 meses após plantio.

2. Material e métodos

2.1 Localização e Caracterização da área experimental

O estudo foi conduzido em áreas comerciais de uma empresa florestal, localizada nos municípios de Ipameri (17°20'58" S e 47°46'32" W) e Campo Alegre de Goiás (17°08'08" S e 47°44'29" W), estado de Goiás, Brasil. Os experimentos foram instalados em dois sítios

distintos, distantes em linha reta aproximadamente 24 km entre si. O sítio 1 localiza-se em Campo Alegre de Goiás, e o sítio 2 em Ipameri. O macroclima de ambos os sítios é classificado, segundo Köppen, como Aw (tropical com inverno seco e verões chuvosos), apresentando duas estações bem delineadas ao longo do ano.

Os locais apresentaram as seguintes características: (i) **Sítio 1** com precipitação de 1090 mm, 913 mm e 1198 mm no primeiro, segundo e terceiro ano após o plantio, respectivamente (média acumulada de 1067 mm por ano), com solo classificado como Latossolo Vermelho argiloso e (ii) o **Sítio 2** com precipitação de 904 mm, 1489 mm e 1320 mm no primeiro, segundo e terceiro ano após o plantio, respectivamente (média acumulada de 1237 mm por ano), com solo classificado como Cambissolo distrófico franco-argiloso. Os dados de precipitação apresentados para os dois sítios foram obtidos a partir de pluviômetros instalados nas áreas experimentais.

2.2 Delineamento experimental e material genético

O experimento seguiu o delineamento de blocos casualizados (DBC) com três repetições em cada sítio. Avaliaram-se 8 clones comerciais de *Eucalyptus* spp. voltados ao polo bioenergético do Centro-Oeste: cinco híbridos de *E. urophylla* x *E. grandis* e três *E. urophylla*. As parcelas continham um número fixo de plantas (25 árvores) em espaçamento comercial uniforme de 4,0 x 3,0 m (entrelinhas x linha), recebendo tratamentos silviculturais, fitossanitários e de adubação padronizados em ambos os locais.

2.3 Amostragem de madeira e avaliação dendrométricas

Aos 36 meses de idade (3 anos após o plantio), foi realizado inventário florestal completo de todas as parcelas para a determinação das variáveis dendrométricas e cálculo do volume comercial de madeira. Para a caracterização da madeira, foram selecionadas e cortadas 3 árvores de cada clone por sítio, totalizando 48 árvores amostradas (8 clones x 2 sítios x 3 árvores). De cada árvore, foram retirados discos de madeira nas posições comerciais correspondente do tronco: base, 25%, 50%, 75 % e 100% da altura comercial, estabelecida em no diâmetro mínimo de 6 cm).

2.4 Parâmetros de qualidade energética da biomassa

Foram determinados os seguintes parâmetros energéticos da madeira:

a) Densidade básica da madeira foi determinada conforme **NBR 11941:2003**;
b) Porcentagem de casca, foram identificadas as áreas limites da casca com a madeira, com régua de precisão igual a 10 mm. De cada disco foram obtidas quatro medições,

os valores em milímetros foram transformados em porcentagem, considerando-se o diâmetro total do disco de madeira como sendo 100%.

c) Poder calorífico superior, conforme estabelecido na norma **ISO 18125:2017**;
d) Poder calorífico inferior, conforme a teoria do poder calorífico líquido (*Net Calorific Value*) proposta por Koppejan e Van Loo (2012);
e) Teor de cinzas, conforme preconizado pela **ISO 18122: 2022**;
f) Teor de materiais voláteis, assim como estabelecido na **ISO 18123:2023**;
g) Teor de carbono fixo: 100 - (Cinzas + Materiais voláteis).

2.5 Produtividade energética

A determinação da produtividade energética da madeira foi realizada por meio das seguintes equações:

a) Biomassa: Volume x Densidade básica;
b) Produtividade energética: Biomassa x Poder calorífico inferior.

3. Resultados e discussão

3.1 Crescimento das árvores

Os dados médios de volume total de madeira e sobrevivência das árvores dos clones de *Eucalyptus* spp., dos experimentos implantados nos sítios 1 e 2, aos 36 meses de idade, estão apresentados na Tabela 1. Os resultados indicam que os clones plantados no sítio 2 apresentaram, em média, árvores com maiores volumes de madeira.

Este resultado está associado aos atributos do solo e aos maiores níveis de precipitação observados, durante o período de avaliação, na área experimental do sítio 2. Comportamento similar encontrado por Da Cunha *et al.* (2021), em regiões onde a precipitação corrobora com às propriedades físicas do solo favorecendo o desenvolvimento das árvores nesses locais. Após 36 meses da implantação dos experimentos, os clones C4 e C7 se destacaram como os mais produtivos nos sítios 1 e 2, respectivamente. No caso do sítio 2, a alta mortalidade das árvores do clone C7 (Tabela 1) promove menor competição pelos fatores de crescimento (água, luz e nutrientes) entre as árvores, podendo causar maior volume de madeira deste clone, comportamento relatado por Silva *et al.* (2022).

Tabela 1 – Volume médio total e sobrevivência das árvores dos clones de *Eucalyptus* spp., dos experimentos nos sítios 1 e 2, aos 36 meses de idade

Fazenda	Tratamento	Clone	Volume	Ranking	Sobrevivência

	(n°)		(m^3 ha)		
Sítio 1	1	C1	56,29	6	93,3
	2	C2	45,54	8	98,7
	3	C3	96,23	2	100,0
	4	**C4**	**100,37**	**1**	97,3
	5	C5	52,63	7	96,0
	6	C6	67,65	4	98,7
	7	C7	59,09	5	89,3
	8	C8	71,14	3	97,3
Média			68,62		96,3
Sítio 2	1	C1	87,97	4	100,0
	2	C2	67,05	8	96,0
	3	C3	99,29	2	100,0
	4	C4	90,55	3	100,0
	5	C5	81,04	5	98,7
	6	C6	73,00	6	98,7
	7	**C7**	**103,59**	**1**	69,3
	8	C8	72,17	7	98,7
Média			84,33		95,2

Nota: em negrito o clone de *Eucalyptus* spp. com maior volume de madeira;

A taxa de sobrevivência observada foi alta, sendo de 96,3% para as árvores no sítio 1 e de 95,2% para as árvores no sítio 2, indicando uma boa adaptação dos clones testados, de maneira geral, às condições edafoclimáticas dos dois sítios. Apesar disso, a avaliação individual indicou que o clone C7 foi o que apresentou a menor sobrevivência se comparado aos demais clones. Este pode ser um indicativo da baixa adaptabilidade deste clone ao sítio, conforme apontado por Da Cunha *et al*. (2023), desaconselha-se sua recomendação em larga escala sem critério restritivo de manejo.

3.2 Qualidade da madeira

Os dados médios das características energéticas da madeira dos clones de *Eucalyptus* spp., aos 36 meses de idade, são apresentados nas Figuras 1-2 e na Tabela 2. Os baixos valores médios de densidade da madeira considerando todos os clones avaliados (410 $kg.m^{-3}$) indica a necessidade do envelhecimento das árvores para o aproveitamento da madeira como biomassa energética, visando o aumento dos valores deste importante parâmetro de qualidade da madeira, como relatado por Carneiro *et al.* (2014) e Lopes *et al.* (2023).

A

Figura 1 – Média da densidade básica da madeira (A) e média da porcentagem de casca (B) das árvores dos clones de *Eucalyptus* spp. dos experimentos nos sítios 1 e 2, aos 36 meses de idade

O clone C5 apresentou os maiores valores de densidade básica da madeira e a menor porcentagem de casca no tronco, nos dois sítios avaliados. Do ponto de vista energético, clones com madeira mais densa e com menor porcentagem de casca são preferíveis (Silva *et al*., 2022).

Tabela 2 – Poder calorífico superior (PCS) e inferior (PCI) da madeira dos clones de *Eucalyptus* spp., dos experimentos nas fazendas sítio 1 e 2, aos 36 meses de idade

Local	Tratamento (n°)	Clone	PCS (kcal kg)	U (%)	PCI (kcal kg)
Sítio 1	1	C1	4505,1	30,0	2759,1
	2	C2	4504,7	30,0	2758,9
	3	C3	4511,2	30,0	2763,5
	4	C4	4516,4	30,0	2767,1
	5	C5	4509,0	30,0	2761,9
	6	C6	4511,2	30,0	2763,5
	7	C7	4534,4	30,0	2779,7
	8	C8	4514,7	30,0	2765,9
Média			4513,3	30,0	2764,9
Sítio 2	1	C1	4514,0	30,0	2765,4
	2	C2	4507,0	30,0	2760,5
	3	C3	4528,7	30,0	2775,7
	4	C4	4513,7	30,0	2765,2
	5	C5	4504,0	30,0	2758,4
	6	C6	4515,2	30,0	2766,3
	7	C7	4535,8	30,0	2780,6
	8	C8	4516,0	30,0	2766,8
Média			4516,8	30,0	2767,4

Até o presente momento, nenhum clone se destacou em relação ao poder calorífico superior, sendo observados valores médios variando de 4503 a 4535 kcal kg-1 (Tabela 2). Da mesma forma, o poder calorífico inferior, calculado com base em umidade da madeira de 30%, pouco variou, ficando na faixa de 2758 a 2780 kcal kg-1.

Figura 2 – Teor de cinza (A) e de carbono fixo (B) da madeira das árvores dos A s de *Eucalyptus* spp. dos experimentos nos sítios 1 e 2, aos 36 meses de idade

Os resultados indicam que os clones plantados no sítio 2 apresentaram, em média, madeira ligeiramente com maiores teores de cinza e de carbono fixo (Figura 2). Não houve diferença significativa entre os clones, até o momento (36 meses de idade), para os teores de cinzas e de carbono fixo. Baixos teores de cinzas são preferíveis, uma vez que representam a quantidade de biomassa que não participará da combustão (resíduo). Em relação ao carbono fixo, quanto maiores os teores, melhor é a madeira para fins energéticos, uma vez que biocombustíveis com alto índice de carbono fixo apresentam queima mais lenta, proporcionando mais tempo de permanência nos fornos e caldeiras.

3.3 Produtividade energética

A produtividade energética é obtida pelo produto entre a biomassa e o poder calorífico inferior e indica a quantidade de energia que pode ser liberada pela combustão da madeira das árvores por hectare. Esta é uma importante variável para a seleção de clones de *Eucalyptus* spp. para fins energéticos. Os resultados indicam que os clones se comportam de forma diferente em função do local de plantio (Tabela 3). Até o presente momento (36 meses de idade), os clones C3 e C7 apresentaram a maior biomassa de madeira produzida, bem como a maior produtividade energética nos sítios 1 e 2, respectivamente.

Tabela 3 – Biomassa e produtividade energética médias da madeira dos clones de *Eucalyptus* spp., dos experimentos nas fazendas Paineiras e Santa Bárbara, aos 3 anos de idade

Local	Tratamento (n°)	Clone	Biomassa (ton ha^{-1})	Produtividade energética (GJ ha^{-1})	Ranking
Sítio 1	1	C1	21,39	247,89	7
	2	C2	18,25	211,52	8
	3	**C3**	**41,15**	**477,63**	**1**
	4	C4	40,12	466,26	2
	5	C5	22,65	262,72	6
	6	C6	27,93	324,18	4
	7	C7	25,14	293,46	5
	8	C8	29,73	345,37	3
Média			28,30	328,63	
Sítio 2	1	C1	33,20	385,64	5
	2	C2	27,53	319,22	8
	3	C3	42,27	492,75	2
	4	C4	35,45	411,74	3
	5	C5	34,78	402,89	4
	6	C6	29,99	348,38	6
	7	**C7**	**43,01**	**502,34**	**1**
	8	C8	29,94	347,89	7
Média			34,52	401,36	

Nota: em negrito o clone de *Eucalyptus* spp. com maior biomassa e produtividade energética da madeira

Embora o eucalipto seja caracterizado por sua ampla adaptabilidade em diferentes ambientes, o comportamento diferenciado dos clones observados neste estudo, quando submetidos a diferentes condições ambientais (sítios), indica que as variáveis de crescimento e de qualidade da madeira são significativamente influenciadas pelo local de plantio das árvores (Da Cunha *et al*., 2023). Neste sentido, a avaliação da interação dos clones com o ambiente é importante e necessária para selecionar os melhores materiais genéticos por local e obter indicações sobre quais destes devem ser adotados, em larga escala, em cada região. A seleção prévia dos clones de eucalipto com alta produtividade energética e adaptados a diferentes condições ambientais (solo e clima), representa a base para a expansão de plantios comerciais para fins energéticos.

4. Conclusões

O local de plantio exerce influência significativa sobre o desenvolvimento dos materiais genéticos, sendo que as condições edafoclimáticas do sítio 2 propiciaram, em média, maior crescimento volumétrico e maior acumulo de biomassa do que as do sítio 1. O clone C4 destacou-se com o maior volume de madeira produzido no sítio 1, enquanto o clone C7 obteve o maior volume no sítio 2, embora este último tenha apresentado baixa taxa de sobrevivência, o que reduziu a competição intraespecífica e impulsionou o crescimento individual das plantas remanescentes.

A densidade básica média geral obtido aos 36 meses (410 $kg.m^{-3}$) reflete o caráter juvenil do lenho, indicando a necessidade de extensão da idade de rotação do povoamento florestal para otimizar suas propriedades químicos e físicos para fins energéticos. No balanço de produtividade energética por hectare, o clone C3 despontou como o material genético de maior potencial biocombustível regional, até o momento, alcançando a maior produtividade energética no sítio 1 (477,63 $GJ.ha^{-1}$) e posicionando-se na vice-liderança no sítio 2 (492,75 $GJ.ha^{-1}$) sob uma taxa de 100% de sobrevivência.

A continuidade do monitoramento anual das parcelas experimentais é indispensável para validar se as tendencias silviculturais e bioenergéticas observadas aos 36 meses de idade se perpetuarão de forma robusta até a idade de corte.

5. Referências bibliográficas

Carneiro, A. D. C. O., Castro, A. F. N. M., Castro, R. V. O., Santos, R. C. D., Ferreira, L. P., Damásio, R. A. P., & Vital, B. R. (2014). Potential energy of *Eucalyptus* sp. wood according to age and different genetic materials. *Revista Árvore*, *38*, 375-381. https://doi.org/10.1590/S0100-67622014000200019

da Cunha, T. Q. G., Lima, P. A. F., Santos, A. C., Novaes, E., & Sette-Junior, C. R. (2023). Genotype and environment interaction on the wood quality of *Eucalyptus* spp. for energy purposes. *Canadian Journal of Forest Research*, *54*(4), 389-397. https://doi.org/10.1139/cjfr-2023-0153

da Cunha, T. Q. G., Santos, A. C., Novaes, E., Hansted, A. L. S., Yamaji, F. M., & Sette Jr, C. R. (2021). *Eucalyptus* expansion in Brazil: Energy yield in new forest frontiers. *Biomass and Bioenergy*, *144*, 105900. https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2020.105900

International Organization for Standardization (2023). *Solid biofuels — Determination of volatile matter* (ISO Standard No. 18123:2023). https://www.iso.org/standard/83192.html

International Organization for Standardization. (2017). *Solid biofuels — Determination of calorific value* (ISO Standard No. 18125:2017). https://www.iso.org/standard/61517.html

International Organization for Standardization. (2022). *Solid biofuels — Determination of ash content* (ISO Standard No. 18122:2022). https://www.iso.org/standard/83190.html

Koppejan, J., & Van Loo, S. (2012). *The handbook of biomass combustion and co-firing*. Routledge.

Lopes, E. D., Gonçalves, J. F., Marques, A., Martins, N. D. S., Pena, C., & Laia, M. L. D. (2023). Physical and chemical properties of wood from Eucalyptus and Corymbia clones in different planting densities. *Ciência Florestal*, *33*(2), e64965. https://doi.org/10.5902/1980509864965

NBR, A. (2003). 11941: Madeira–Determinação da densidade básica. Rio de Janeiro: *ABNT-Associação Brasileira de Normas Técnicas*. https://www.abntcatalogo.com.br/grd.aspx

Silva, M. F. D., Lima, P. A. F., Novaes, E., Sette Jr, C. R., & Vale, A. T. D. (2022). Wood energy quality of *Eucalyptus* spp. clones established under different soil types in the Brazilian Cerrado. *Canadian Journal of Forest Research*, *52*(5), 743-750. https://doi.org/10.1139/cjfr-2021-0234

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Propriedades energéticas do carvão vegetal de clone comercial visando à aplicação na siderurgia

Fernanda Aparecida Nazário de Carvalho[1]; Merlindo Jacinto Manjate[2]; Gabriela Aguiar Amorim[1]; Kamilla Crysllayne Alves da Silva[1]; Tayná Oliveira Rebonato[2]; Gabriela Fontes Mayrinck Cupertino[3]; Ananias Francisco Dias Júnior[1]; Alina Mariana Balu Balu[4]

[1] Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" (ESALQ), Universidade de São Paulo (USP)
[2] Universidade Federal do Espírito Santo (UFES)
[3] Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA)
[4]Universidad de Córdoba (UCO)

Resumo: O uso intensivo de combustíveis fósseis tem intensificado a necessidade de alternativas energéticas mais sustentáveis, especialmente no setor industrial. Nesse contexto, a transição energética depende do desenvolvimento de materiais capazes de aliar eficiência e menor impacto ambiental. Assim, este estudo teve como objetivo avaliar o potencial energético de carvões vegetais oriundos de clones comerciais para aplicação na siderurgia. Foi analisado o carvão vegetal do clone 144 (CV144), utilizando-se o coque metalúrgico (CM) como referência comparativa. A caracterização dos materiais envolveu a determinação da densidade a granel, poder calorífico superior, densidade energética, reatividade e resistência após reação, parâmetros fundamentais para aplicações em processos termoquímicos. Os resultados indicaram que o CV144 apresentou maior poder calorífico superior (7131,30 kcal kg^{-1}) em comparação ao CM (6452,58 kcal kg^{-1}), evidenciando maior capacidade de geração de energia por unidade de massa. Em contrapartida, a densidade energética do CV144 foi inferior, possivelmente em função de sua menor compactação estrutural. De modo geral, o carvão vegetal demonstrou desempenho energético satisfatório, destacando-se como alternativa viável ao coque metalúrgico. Sua elevada capacidade energética, associada ao potencial de reduzir a dependência de fontes fósseis, reforça sua aplicabilidade na indústria siderúrgica, contribuindo para processos mais sustentáveis.

Palavras-chave: Transição energética; Processos termoquímicos; Eficiência energética.

Energy properties of charcoal from a commercial clone for application in the steel industry

Abstract: The intensive use of fossil fuels has increased the need for more sustainable energy alternatives, particularly in the industrial sector. In this context, the energy transition depends on the development of materials capable of combining efficiency with reduced environmental impact. Thus, this study aimed to evaluate the energy potential of charcoal derived from commercial clones for application in the steel industry. Charcoal from clone 144 (CV144) was analyzed, using metallurgical coke (MC) as a comparative reference. The characterization of the materials included the determination of bulk density, higher heating value, energy density, reactivity, and post-reaction strength, which are key parameters for applications in thermochemical processes. The results showed that CV144 presented a higher higher heating value (7131.30 kcal kg^{-1}) compared to MC (6452.58 kcal kg^{-1}), indicating a greater capacity for energy generation per unit mass. In contrast, the energy density of CV144 was lower (2.03 Gcal m^{-3}), possibly due to its lower structural compactness. Overall, charcoal demonstrated

satisfactory energy performance, standing out as a viable alternative to metallurgical coke. Its high energy capacity, combined with the potential to reduce dependence on fossil fuels, reinforces its applicability in the steel industry, contributing to more sustainable processes.

Keywords: Energy transition; Thermochemical processes; Energy efficiency.

1. Introdução

O aço é um dos materiais mais utilizados pela sociedade, estando presente em setores como construção civil, transporte, geração de energia, indústria automobilística e fabricação de bens de consumo. Em razão dessa ampla aplicação, a indústria siderúrgica exerce papel fundamental no desenvolvimento econômico mundial, sendo responsável pelo fornecimento de matéria-prima para diversos segmentos industriais (Chaves & Oliveira, 2020; Viana et al., 2019). Entretanto, a produção de aço demanda elevado consumo energético e depende, em grande parte, da utilização de combustíveis fósseis, especialmente o coque metalúrgico, empregado como agente termorredutor nos altos-fornos. Além de fornecer energia ao processo, o coque atua na redução dos óxidos de ferro, sendo indispensável na produção de ferro-gusa. Contudo, sua utilização está associada à emissão de grandes quantidades de gases de efeito estufa (GEE), contribuindo significativamente para o aquecimento global e para o agravamento das mudanças climáticas (Li et al., 2014; Mourão, 2011).

O aumento das emissões de GEE tem intensificado eventos climáticos extremos, como ondas de calor, secas prolongadas e tempestades severas. De acordo com o Sexto Relatório de Avaliação do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC AR6), o limite de aquecimento global de 1,5 °C poderá ser ultrapassado entre 2030 e 2040, reforçando a urgência da adoção de estratégias voltadas à descarbonização dos setores industriais (Lee & Romero, 2023). Nesse cenário, a siderurgia se destaca entre as atividades com maior impacto ambiental, sendo responsável por parcela expressiva das emissões industriais de CO_2. Assim, a substituição parcial ou total do coque por fontes renováveis de carbono representa uma alternativa promissora para reduzir a pegada de carbono da produção de aço e atender às metas globais de neutralidade de emissões.

Entre as alternativas disponíveis, o carvão vegetal produzido a partir de florestas plantadas tem despertado crescente interesse por apresentar características favoráveis à aplicação siderúrgica, como elevada reatividade, baixo teor de enxofre e potencial para reduzir as emissões de CO_2 quando comparado aos combustíveis fósseis (Kieush et al., 2023; Surup et al., 2022). No Brasil, as condições edafoclimáticas favoráveis ao cultivo de espécies do gênero

Eucalyptus, aliadas à ampla experiência do país na produção de carvão vegetal, conferem vantagens competitivas para o desenvolvimento de uma siderurgia de menor impacto ambiental. Entretanto, a qualidade do carvão vegetal depende diretamente das características da madeira e do material genético utilizado, tornando a seleção de clones com propriedades adequadas um fator estratégico para aumentar a eficiência energética e metalúrgica do processo (de Oliveira et al., 2023; Pereira et al., 2012).

Diante desse contexto, considerando a necessidade de ampliar o uso de fontes renováveis de energia e contribuir para a descarbonização da indústria siderúrgica, em consonância com o Objetivo de Desenvolvimento Sustentável 7 (ODS 7), o presente trabalho tem como objetivo avaliar a qualidade do carvão vegetal produzido a partir do clone comercial 144 de *Eucalyptus* para uso na siderurgia, por meio da análise de suas propriedades energéticas e comparação com o coque metalúrgico, visando verificar seu potencial como alternativa renovável para a produção de ferro-gusa e aço.

2. Material e métodos

Delineamento experimental

O experimento foi conduzido em delineamento inteiramente casualizado, considerando dois materiais: o carvão vegetal do clone comercial 144 (CV144) e o coque metalúrgico (CM), utilizado como referência para fins comparativos, com cinco repetições para cada material.

Caracterização do material

O experimento foi conduzido considerando dois materiais: o carvão vegetal do clone comercial 144 (CV144) e o coque metalúrgico (CM), utilizado como referência para fins comparativos, com cinco repetições para cada material, ambos doados por uma empresa local do Estado de Minas Gerais. As amostras foram previamente homogeneizadas e preparadas de acordo com procedimentos padronizados, visando garantir a representatividade e a reprodutibilidade das análises. Cada material foi considerado uma unidade experimental, sendo as determinações realizadas de forma independente. A densidade a granel foi determinada conforme a norma NBR 6922 (ABNT, 1981), baseada na relação entre a massa da amostra e o volume ocupado em recipiente de volume conhecido.

O poder calorífico superior (PCS) foi determinado por meio de uma bomba calorimétrica adiabática modelo IKA C200, de acordo com a metodologia estabelecida pela norma DIN 14918 (2010b). A partir dos valores de PCS, foram estimados o poder calorífico

inferior (PCI) e o poder calorífico útil (PCU), considerando relações empíricas que levam em conta a composição do material. Conforme a Equação 1 abaixo.

$$PCI = PCS - 600 * \left(\frac{9\,H}{100} \right) \qquad \text{(Equação 1)}$$

Em que: PCI = poder calorífico inferior (MJ.kg); PCS = poder calorífico superior (MJ.kg); H = teor de hidrogênio (%).

O poder calorífico útil (PCU) será determinado conforme a Equação 2:

$$PCU = PCI \left\{ \frac{(100 - U)}{100} \right\} - 6\,U \qquad \text{(Equação 2)}$$

Em que: PCU = poder calorífico útil (MJ.kg); PCI = poder calorífico inferior (MJ.kg); U = umidade em base úmida (%).

A densidade energética foi obtida a partir da multiplicação da densidade a granel pelo poder calorífico útil, conforme metodologia descrita por Andrade (2017), sendo este parâmetro utilizado para avaliar o potencial energético dos materiais.

A composição química elementar de carbono (C), hidrogênio (H), oxigênio (O), nitrogênio (N), enxofre (S) e cloro (Cl) em base seca, foi determinada utilizando um analisador elementar modelo Vario Micro Cube. O teor de oxigênio (O) foi estimado por diferença em relação aos demais elementos.

Análise de dados

Os dados foram submetidos à verificação dos pressupostos da ANOVA, avaliando-se a normalidade dos resíduos (teste de Shapiro-Wilk) e a homogeneidade das variâncias (teste de Levene), ambos a 5% de significância. Em seguida, aplicou-se a ANOVA (teste F) para comparação entre os materiais (CV144 e CM), utilizando o software R (versão 3.5.2). Quando observada diferença significativa ($p < 0,05$), aplicou-se o teste de Tukey a 5% de significância.

Esquema metodológico

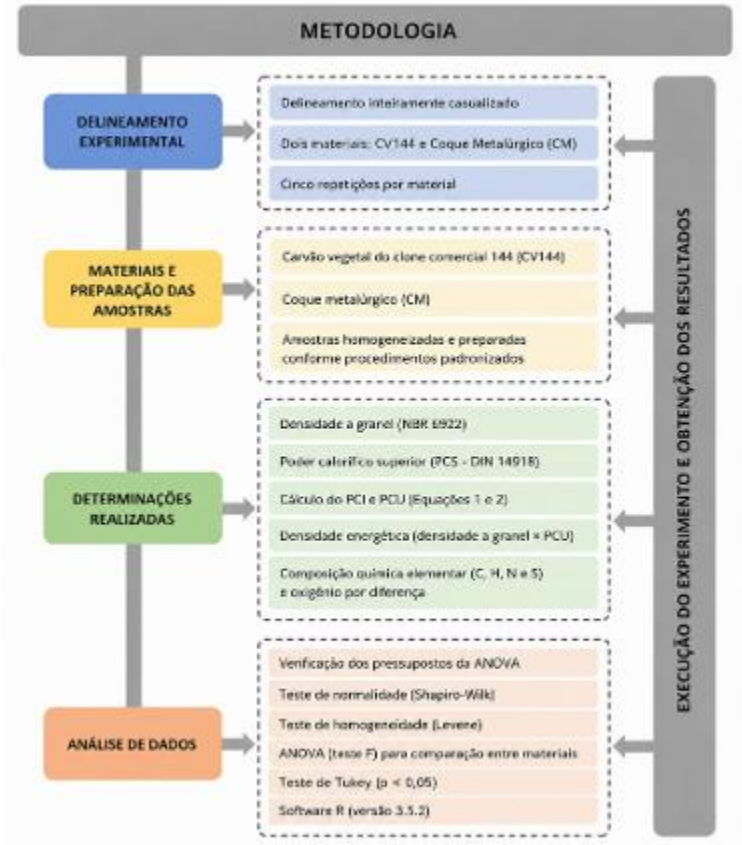


Figura 1 – Esquema representativo da metodologia aplicada no desenvolvimento do trabalho.

3. Resultados e discussão

Para a análise da densidade a granel, verificou-se que o carvão vegetal do clone 144 (CV144) apresentou valor médio de 0,097 g cm^{-3}, enquanto o coque metalúrgico (CM) apresentou densidade média de 0,357 g cm^{-3}. Esses resultados evidenciam que o CV144 possui densidade significativamente inferior quando comparado ao coque mineral. A densidade a granel é um parâmetro importante na avaliação de combustíveis sólidos, pois está diretamente relacionada à eficiência logística e operacional. Materiais com maior densidade tendem a ocupar menor volume para uma mesma quantidade de massa, o que favorece o armazenamento, o transporte e o manuseio (Kumar et al., 2021). Dessa forma, combustíveis mais densos permitem otimizar o uso de espaço e reduzir custos associados à logística. Por outro lado, materiais com baixa densidade a granel, como observado para o CV144, podem impactar negativamente o desempenho em sistemas industriais, especialmente em fornos siderúrgicos, uma vez que demandam maior volume para atingir a mesma carga de massa. Isso pode resultar em menor eficiência operacional e redução da produtividade. Nesse contexto, do ponto de vista logístico e econômico, a utilização de combustíveis com maior densidade a granel tende a

proporcionar melhores rendimentos no processo produtivo. A Figura 2 apresenta os valores obtidos para os poderes caloríficos superior, inferior e útil dos materiais avaliados.

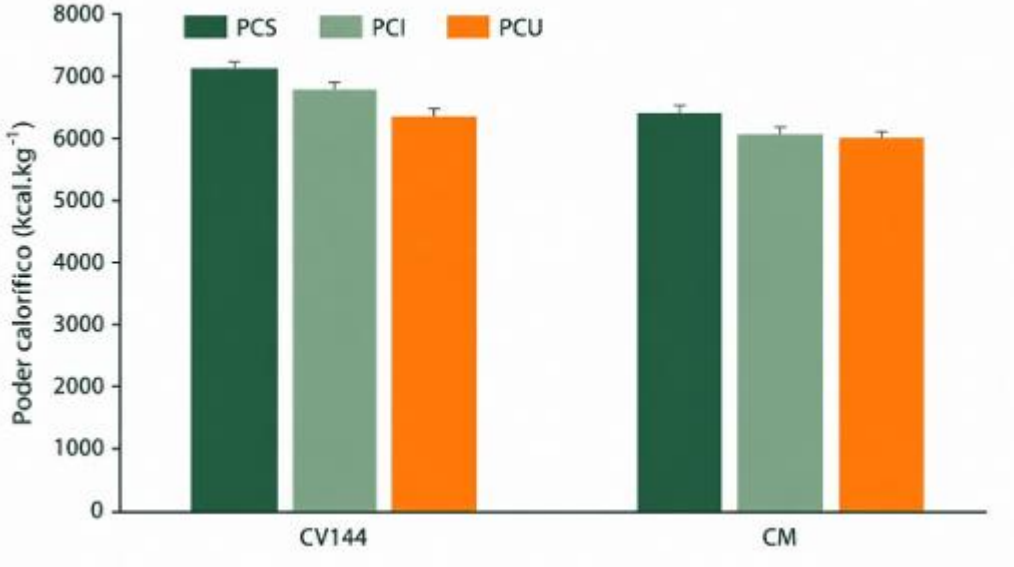


Figura 2 – Resultados de poder calorífico para as duas amostras. Em que CV144 = Carvão Vegetal 144; CM = Coque Metalúrgico.

Os valores de poder calorífico superior (PCS) indicaram que o coque metalúrgico (CM) apresentou média de 6452,58 kcal kg^{-1}, enquanto o carvão vegetal do clone 144 (CV144) atingiu 7131,30 kcal kg^{-1}. Observa-se que o CV144 apresentou desempenho estatisticamente superior ao CM. O PCS é um dos principais parâmetros para avaliação de combustíveis, pois representa a quantidade total de energia liberada durante a combustão completa. No contexto siderúrgico, elevados valores de PCS são desejáveis, uma vez que possibilitam a redução do consumo de agente redutor (carbono) para alcançar a mesma produtividade. Além disso, para um mesmo volume de material, combustíveis com maior PCS liberam maior quantidade de calor, contribuindo para maior eficiência térmica e melhor desempenho do processo (Neves et al., 2011). Em relação ao poder calorífico inferior (PCI), que representa a energia efetivamente disponível após descontadas as perdas associadas à evaporação da água, o CV144 apresentou valor de 6807,30 kcal kg^{-1}, superior ao observado para o CM (6128,58 kcal kg^{-1}), indicando melhor desempenho energético do carvão vegetal sob essa perspectiva. Por outro lado, para o poder calorífico útil (PCU), que considera condições mais próximas da aplicação prática, o CM apresentou valor de 6488,13 kcal kg^{-1}, enquanto o CV144 registrou 6107,83 kcal kg^{-1}. Esse resultado sugere que, apesar do maior potencial energético teórico do CV144, o coque metalúrgico apresenta ligeira vantagem em termos de energia efetivamente aproveitável. A Figura 3 apresenta os valores de densidade energética dos materiais avaliados.

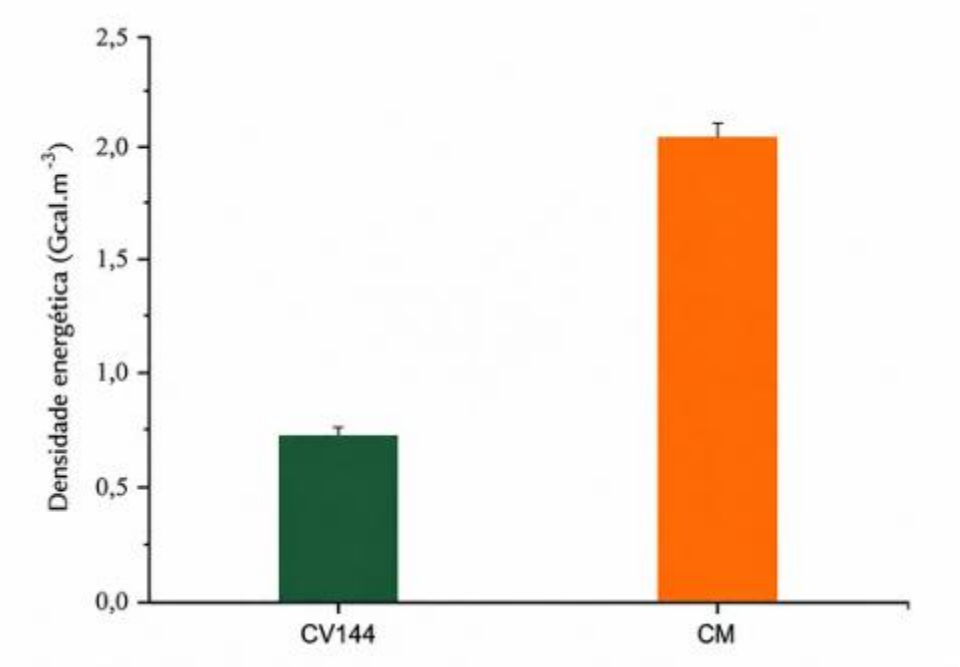


Figura 3 – Apresentação da densidade energética apara a amostra vegetal e mineral. Em que CV144 = Carvão Vegetal 144; CM = Coque Metalúrgico.

Observa-se que a densidade energética do carvão vegetal (CV144) foi de 0,70 Gcal m^{-3}, enquanto o coque metalúrgico (CM) apresentou valor superior, equivalente a 2,03 Gcal m^{-3}. A densidade energética é um parâmetro fundamental na avaliação de combustíveis sólidos, pois expressa a quantidade de energia armazenada por unidade de volume (da Silva et al., 2016). Nesse sentido, o menor valor observado para o CV144 indica uma menor concentração de energia por volume quando comparado ao CM. Esse resultado está diretamente relacionado à menor densidade a granel do carvão vegetal, impactando sua eficiência logística e volumétrica. Do ponto de vista siderúrgico, materiais com maior densidade energética tendem a ser mais vantajosos, pois permitem maior aporte energético em menor volume, favorecendo o desempenho operacional e a produtividade dos fornos. A tabela abaixo, mostra os resultados encontrados na análise química elementar (Tabela 1).

Tabela 1 - Análise elementar das amostras. Em que CV144 = Carvão Vegetal 144; CM = Coque Metalúrgico.

Sample	**C (%)**	**H (%)**	**O (%)**	**N (%)**	**S (%)**	**Cl (%)**
CV144	78,67	3,36	17,52	0,164	0,282	0,06
CM	75,64	1,79	20,87	0,941	0,763	0,06

Na Tabela 1 estão apresentados os teores elementares das amostras. Observa-se que o CV144 apresentou maior teor de carbono (78,67%) em comparação ao CM (75,64%), indicando bom potencial energético, uma vez que o carbono é o principal responsável pela geração de energia durante a combustão. O teor de hidrogênio também foi superior no CV144 (3,36%) em relação ao CM (1,79%), o que está associado a uma maior presença de materiais voláteis, característica típica de biomassas lignocelulósicas (Adrados et al., 2017; Gul et al., 2021). Esse fator pode favorecer a reatividade do material, embora possa implicar maior consumo durante o processo. Para o oxigênio, o CV144 apresentou menor teor (17,52%) em comparação ao CM (20,87%). Em geral, maiores teores de oxigênio estão associados ao aumento da reatividade, devido à presença de grupos funcionais ativos (Gao et al., 2025; Nyombi et al., 2019; Phounglamcheik et al., 2020). O teor de nitrogênio foi significativamente inferior no CV144 (0,164%) em relação ao CM (0,941%), o que representa uma vantagem importante para a siderurgia, pois reduz a incorporação de nitrogênio no aço e a formação de defeitos estruturais (Strakhov & Mikhailenko, 2008). Da mesma forma, o teor de enxofre foi menor no CV144 (0,282%) quando comparado ao CM (0,763%), sendo um aspecto positivo, visto que contribui para a redução das emissões de SO_2 e dos impactos ambientais associados (Heberlein et al., 2022; Zhou et al., 2017). Por fim, os teores de cloro foram baixos e semelhantes em ambas as amostras (0,06%), o que é desejável, pois minimiza a formação de compostos tóxicos durante processos em altas temperaturas (Strezov et al., 2024).

4. Conclusões

O carvão vegetal do clone comercial 144 (CV144) apresentou desempenho energético promissor quando comparado ao coque metalúrgico (CM), destacando-se pelos maiores valores de poder calorífico superior e inferior, o que indica maior potencial de geração de energia por unidade de massa. Além disso, a composição elementar evidenciou vantagens importantes do CV144, como menores teores de nitrogênio e enxofre, contribuindo para a produção de aço com menor incorporação de impurezas e redução de impactos ambientais. Por outro lado, o CV144 apresentou menor densidade a granel e densidade energética, o que pode limitar sua eficiência logística e volumétrica em aplicações industriais, exigindo maior volume de material para atingir a mesma carga energética. Dessa forma, conclui-se que o carvão vegetal do clone 144 possui potencial como alternativa renovável ao coque metalúrgico na siderurgia, especialmente sob a perspectiva ambiental. No entanto, sua aplicação em larga escala depende de estratégias

que visem otimizar suas propriedades físicas, de modo a melhorar seu desempenho operacional nos processos siderúrgicos.

5. Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

6. Referências bibliográficas

Adrados, A., Lopez-Urionabarrenechea, A., Acha, E., Solar, J., Caballero, B. M., & de Marco, I. (2017). Hydrogen rich reducing gases generation in the production of charcoal from woody biomass carbonization. *Energy Conversion and Management*, *148*, 352–359. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.06.010

Chaves, N. O., & Oliveira, R. M. P. B. (2020). As Alternativas De Aproveitamento Do Pó Do Alto-Forno: Uma Revisão. *Revista Eletrônica Perspectivas Da Ciência e Tecnologia - ISSN: 1984-5693*, *12*, 188–198. https://doi.org/10.22407/1984-5693.2020.v12.p.188-198

da Silva, R. S., Vendruscolo, D. G. S., da Rocha, J. R. M., Chaves, A. G. S., Souza, H. S., & da Motta, A. S. (2016). Desempenho silvicultural de Tectona grandis L. f. em diferentes espaçamentos em Cáceres, MT. *Floresta e Ambiente*, *23*(3), 397–405. https://doi.org/10.1590/2179-8087.143015

de Oliveira, L. P., Carneiro, A. de C. O., Peres, L. C., Demuner, I. F., Ferreira, S. O., Fernandes, S. A., & Jorge, F. de J. (2023). WOOD AND CHARCOAL QUALITY IN THE SELECTION OF Eucalyptus SPP. CLONES AND Corymbia torelliana X Corymbia citriodora FOR STEEL INDUSTRY. *Revista Arvore*, *47*. https://doi.org/10.1590/1806-908820230000022

Gao, L., Ma, X., Cheng, J., & Liu, Y. (2025). The effect of preparation process on combustibility of Robinia pseudoacacia charcoal and its structure-performance relationship. *Scientific Reports*, *15*(1). https://doi.org/10.1038/s41598-025-99467-x

Gul, E., Riva, L., Nielsen, H. K., Yang, H., Zhou, H., Yang, Q., Skreiberg, Ø., Wang, L., Barbanera, M., Zampilli, M., Bartocci, P., & Fantozzi, F. (2021). Substitution of coke with pelletized biocarbon in the European and Chinese steel industries: An LCA analysis. *Applied Energy*, *304*. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.117644

Heberlein, S., Chan, W. P., Veksha, A., Giannis, A., Hupa, L., & Lisak, G. (2022). High temperature slagging gasification of municipal solid waste with biomass charcoal as a greener auxiliary fuel. *Journal of Hazardous Materials*, *423*. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.127057

Kieush, L., Schenk, J., Koveria, A., Rantitsch, G., Hrubiak, A., & Hopfinger, H. (2023). Utilization of Renewable Carbon in Electric Arc Furnace-Based Steel Production: Comparative Evaluation of Properties of Conventional and Non-Conventional Carbon-Bearing Sources. *Metals*, *13*(4). https://doi.org/10.3390/met13040722

Kumar, J. A., Kumar, K. V., Petchimuthu, M., Iyahraja, S., & Kumar, D. V. (2021). Comparative analysis of briquettes obtained from biomass and charcoal. *Materials Today: Proceedings*, *45*(xxxx), 857–861. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.02.918

Lee, H., & Romero, J. (2023). Synthesis report of the IPCC sixth assessment report (AR6). In *Diriba Korecha Dadi*. Panmao Zhai.

Li, Q., Meng, A., Li, L., Zhou, H., & Zhanguest, Y. (2014). Investigation of biomass ash thermal decomposition by thermogravimetry using raw and artificial ashes. *ASIA PACIFIC JOURNAL OF CHERMICAL ENGINEERIN*, *7*(17), 743–753. https://doi.org/10.1002/apj

Mourão, M. B. (2011). *Introdução a Siderurgia*. 428. https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/5635026/mod_resource/content/0/Introdução a Siderurgia - Mourão%2C MB.pdf

Nyombi, A., Williams, M. R., & Wessling, R. (2019). Reactivity and Free Radical Chemistry of Lilac (Syringa vulgaris) Charcoal. *Energy and Fuels*, *33*(2), 1227–1235. https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.8b03665

Pereira, B. L. C., Oliveira, A. C., Carvalho, A. M. M. L., Carneiro, A. de C. O., Santos, L. C., & Vital, B. R. (2012). Quality of Wood and Charcoal from Eucalyptus Clones for Ironmaster Use . *International Journal of Forestry Research*, *2012*, 1–8. https://doi.org/10.1155/2012/523025

Phounglamcheik, A., Wang, L., Romar, H., Kienzl, N., Broström, M., Ramser, K., Skreiberg, Ø., & Umeki, K. (2020). Effects of Pyrolysis Conditions and Feedstocks on the Properties and Gasification Reactivity of Charcoal from Woodchips. *Energy and Fuels*, *34*(7), 8353–8365. https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.0c00592

Strakhov, V. M., & Mikhailenko, A. S. (2008). Low-nitrogen coal as a carburizer in the production of special steels. *Coke and Chemistry*, *51*(4), 147–152. https://doi.org/10.3103/s1068364x08040078

Strezov, V., Zhou, X., Evans, T., Kan, T., & Taylor, M. P. (2024). Investigation of the effect of chlorine in different additives on dioxin formation during high temperature processing of iron ore. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, *288*. https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2024.117406

Surup, G. R., Kaffash, H., Ma, Y., Trubetskaya, A., Pettersen, J. B., & Tangstad, M. (2022). Life Cycle Based Climate Emissions of Charcoal Conditioning Routes for the Use in the Ferro-Alloy Production. *Energies*, *15*(11). https://doi.org/10.3390/en15113933

Viana, F. L. E., Civil, E., Produção, E. De, & Administração, D. (2019). *Indústria siderúrgica*. 1–14.

Zhou, X., Wang, X., Zhang, H., & Wu, H. (2017). Enhanced nitrogen removal of low C/N domestic wastewater using a biochar-amended aerated vertical flow constructed wetland. *Bioresource Technology*, *241*, 269–275. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.05.072

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Propriedades físicas do carvão vegetal de *Hovenia dulcis* Thunberg em diferentes carbonizações

Kamily Vitória de Barros Sé[1]; Fernando Kassab Thibes[1]; Markus de Barros Figueiredo Sass[1]; Maria Cecília Schott Batista[1], Luana Maria dos Santos[1]; Flávia Alves Pereira[1]; Érick Martins Nieri[1]

[1] Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Resumo: A madeira, ao longo da história, tem sido uma matéria-prima útil e versátil, empregada tanto na fabricação de objetos quanto na produção de energia. Entre seus derivados, o carvão vegetal destaca-se como uma importante fonte energética. Nesse contexto, o controle do processo de carbonização é fundamental para garantir a qualidade física do produto. Desta forma, o estudo analisou o carvão de *Hovenia dulcis* Thunberg produzido a partir de duas marchas de carbonização foram determinadas as densidades relativas aparente, verdadeira e a porosidade. A densidade aparente foi determinada pela saturação e deslocamento de água, a densidade relativa verdadeira por picnometria e a porosidade pela associação entre ambas. Os resultados foram analisados pelo teste F, a 5% de probabilidade. A marcha 1 apresentou densidade relativa verdadeira superior (1,429 g cm^{-3}) á marcha 2 (1,325 g cm^{-3}), já a densidade aparente e a porosidade não apresentaram diferenças significativas. A taxa de aquecimento inferior, relacionada ao maior tempo e à temperatura final superior, potencializou alterações estruturais no carvão, evidenciando o controle da carbonização para a qualidade do produto.

Palavras-chave: Uva-do-Japão; Densidade relativa verdadeira; Porosidade.

Physical properties of *Hovenia dulcis* Thunberg charcoal at different carbonization levels

Abstract: Wood has been a useful and versatile raw material throughout human history, used both in the manufacture of objects and in energy production. Among its derivatives, charcoal stands out as an important energy source. In this context, controlling the carbonization process is essential to ensure the physical quality of the product. Therefore, this study evaluated charcoal produced from *Hovenia dulcis* Thunberg under two carbonization schedules, determining its apparent relative density, true relative density, and porosity. Apparent relative density was determined by water saturation and displacement, true relative density by pycnometry, and porosity from the relationship between the two densities. The results were analyzed using the F-test at a 5% significance level. Carbonization Schedule 1 showed a higher true relative density (1.429 g cm^{-3}) than Carbonization Schedule 2 (1.325 g cm^{-3}), whereas apparent relative density and porosity showed no significant differences between the schedules. The lower heating rate, associated with the longer carbonization time and higher final temperature, promoted structural changes in the charcoal, highlighting the importance of controlling the carbonization process to ensure product quality.

Keywords: Japanese raisin tree; True relative density; Porosity.

1. Introdução

A madeira, desde o início da humanidade, representou um importante instrumento para o desenvolvimento da civilização, desde a criação de ferramentas e objetos até a sua utilização energética. Uma das principais fontes de energia vegetal é o carvão vegetal, que apresenta elevada importância no mercado brasileiro, tanto na produção quanto no consumo, especialmente no setor siderúrgico, no qual é utilizado como combustível e agente redutor, além de constituir uma opção renovável e eficiente (Gomes *et al.*, 2020; Loureiro *et al.*, 2021).

O carvão vegetal é obtido pela conversão termoquímica da madeira sob condições controladas de temperatura e oxigênio (Dias Junior *et al.*, 2020; Lima *et al.*, 2022). Nesse processo, a qualidade do carvão é definida pelas características da madeira selecionada e pelas condições impostas durante a carbonização, principalmente pela taxa de aquecimento e pelo tempo total da atividade (Dufourny *et al.*, 2019; Lima *et al.*, 2022). Dessa forma, a caracterização tecnológica é essencial para determinar a adequação do material às diferentes finalidades energéticas e industriais (Dufourny *et al.*, 2019; Protásio *et al.*, 2021).

Dentre as espécies arbóreas que se revelam como opções interessantes para a cadeia produtiva do carvão vegetal, apresenta-se a *Hovenia dulcis* Thunberg Estudos indicam a possibilidade de conversão da madeira dessa espécie em biocarvão, ressaltando a sua importância e a necessidade de ampliação da caracterização de seus aspectos físicos, químicos e energéticos (Empl *et al.*, 2025; Reffatti, 2019) .

A análise do carvão produzido a partir da matéria-prima conhecida popularmente como uva-do-japão pode auxiliar na criação de novas possibilidades de aplicação de sua biomassa (Empl *et al.*, 2025). As propriedades do carvão vegetal são condicionadas pelas variações estruturais ocasionadas durante a atividade de carbonização (de Meira *et al.*, 2021).

O controle das variáveis durante este processo é essencial para relacionar as condições de produção à qualidade e às características do material gerado (Dufourny *et al.*, 2019; Ramos *et al.*, 2024). Dentre as principais ferramentas utilizadas para analisar as propriedades físicas, apresentam-se as densidades relativas aparente e verdadeira. A análise integrada dessas propriedades proporciona dados sobre a estrutura do carvão, permitindo avaliar as diferenças relacionadas à matéria-prima e às condições do processo de carbonização (Dufourny *et al.*, 2019; Dias Junior *et al.*, 2020).

Dessa forma, concebeu-se a hipótese de que as distintas marchas de carbonização alteram a estrutura do carvão vegetal, especialmente as paredes celulares carbonizadas. Essa ideia sustenta-se na constatação de que fatores como temperatura final, taxa de aquecimento e tempo de residência podem promover modificações na estrutura celular e nas propriedades

físicas, influenciando as densidades aparente e verdadeira e o volume de poros do carvão (Dufourny *et al.*, 2019; Lima *et al.*, 2022; Wang *et al.*, 2024; Dias Junior *et al.*, 2020; Ramos *et al.*, 2024).

Desse modo, o objetivo deste trabalho foi quantificar e comparar as densidades relativas aparente e verdadeira e a porosidade do carvão vegetal de *Hovenia dulcis* produzido em duas marchas de carbonização distintas, avaliando como as diferenças nas condições de produção interferem nessas propriedades físicas.

2. Material e métodos

2.1 Preparo do material

As madeiras de *Hovenia dulcis* foram obtidas a partir de quatro árvores, da Unidades de Ensino, Pesquisa e Extensão (UNEPE) Trilha Ecológica, localizada na Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Dois Vizinhos. Foram selecionadas árvores com diâmetro à altura do peito entre 10 a 20 cm.

A partir de cada indivíduo arbóreo, retirou-se cinco discos com 15 cm de espessura, das posições referente a 0%, 25%, 50%, 75% e 100% da altura comercial. Posteriormente, sucedeu a transformação do material em cavacos e na sequência foram destinados à produção de carvão vegetal.

Os cavacos foram secos em estufa com circulação de ar, a 103 ± 2 ºC, até a massa constante. Foram utilizados 300g de madeira seca, posicionando-se em um recipiente metálico, inserido dentro de um forno tipo mufla. Para cada marcha, foram realizadas nove carbonizações independentes (Tabela 1). Dessa forma, cada carbonização foi considerada uma repetição experimental.

A marcha 1 registrou temperatura final de aproximadamente 550 ºC, com taxa média de aquecimento de 1,53 ºC min^{-1} e duração total de seis horas. A marcha 2 foi conduzida até a temperatura final de 450 ºC, com taxa média de aquecimento de 5 ºC min^{-1} e duração total de uma hora e quarenta minutos.

Tabela 1 – Temperatura e tempo de carbonização utilizadas nas marchas de carbonização

Marcha	Temperatura (ºC)						
	150	200	250	350	450	500	550
Marcha 1	1 h	1 h	1 h	1 h	1 h	30m	30m
Marcha 2	10m	30m	20m	20m	15m	-	-

2.2

Determinação da densidade relativa aparente

A determinação da densidade relativa aparente seguiu a metodologia proposta por Rocha *et al*., (2021), adaptado da ABNT NBR 9165. As peças foram alocadas em recipientes cilíndricos de vidro, contendo água, e os carvões ficaram submersos por um período de, aproximadamente, 6 dias.

Decorrido o período, determinou-se o volume através do método de deslocamento da água. Em seguida, as amostras foram inseridas em estufa com circulação de ar, à temperatura de 103 ± 2 ºC, até a massa constante. Após resfriamento, determinou-se a massa seca das peças de carvão. A densidade relativa aparente foi obtida através da equação 1.

$$DA = \frac{m_s}{v_s} \qquad \text{Equação 1}$$

Em que:

DA = densidade relativa aparente do carvão vegetal;

m_s = massa seca da peça de carvão vegetal;

v_s = volume saturado da peça de carvão vegetal.

2.3 Determinação da densidade relativa verdadeira

Após a homogeneização do carvão vegetal obtido em cada uma das nove carbonizações, as amostras foram fragmentadas e classificadas entre as peneiras de 200 e 270 mesh. O material foi seco em estufa com circulação de ar, a 103 ± 2 ºC, durante 24 horas. Foram realizadas três repetições para cada carbonização, utilizando-se 2 g de material seco em cada análise.

As amostras foram transferidas para picnômetros, aos quais se adicionou água destilada até aproximadamente um terço da capacidade. Posteriormente, os picnômetros foram mantidos em aquecimento por uma hora, sob agitação manual periódica, para favorecer a remoção do ar retido nos poros e das partículas aderidas às paredes dos recipientes.

Após essa etapa, os picnômetros foram acondicionados sob a bancada e resfriados por um período de, aproximadamente, 40 minutos. Em seguida, completou-se o volume dos recipientes com água destilada. Posteriormente, determinou-se a massa do picnômetro, com água e carvão vegetal. A densidade relativa foi determinada segundo a equação 2:

$$DV = \frac{MC}{MC - (M1 - M2)} \qquad \text{Equação 2}$$

Em que:

DV = densidade relativa verdadeira do carvão vegetal, em g/cm³;

MC = massa seca de carvão adicionada ao picnômetro, em g;

M1 = massa do picnômetro contendo água e carvão após a fervura e o resfriamento, em g;

M2 = massa do picnômetro preenchido somente com água, em g.

2.4 Determinação da Porosidade

A determinação da porosidade do carvão vegetal foi realizada a partir dos valores adquiridos na densidade relativa aparente e verdadeira. Portanto, utilizou-se a seguinte equação:

$$P = \left(1 - \frac{DA}{DV}\right).100 \qquad \text{Equação 3}$$

Em que:

P = Porosidade do carvão vegetal, em %;

DA = Densidade relativa aparente do carvão vegetal;

DV = Densidade relativa verdadeira do carvão vegetal.

2.5 Análise de dados

O experimento foi conduzido em delineamento inteiramente casualizado, com dois tratamentos, correspondentes às marchas 1 e 2 de carbonização, 9 carbonizações e três repetições por tratamento. Foram avaliadas a densidade relativa aparente, a densidade verdadeira e a porosidade do carvão vegetal.

Os dados foram submetidos à análise de variância, e a significância dos efeitos dos tratamentos foi verificada pelo teste F, ao nível de 5% de probabilidade.

3. Resultados e discussão

A densidade relativa aparente e a porosidade dos carvões produzidos nas diferentes marchas não diferiram entre si, tendo efeito significativo apenas para a densidade relativa verdadeira (Tabela 2).

Tabela 2 – Valores médios da densidade relativa verdadeira, densidade relativa aparente e porosidade dos carvões vegetais produzidos a partir de diferentes marchas de carbonização

Parâmetros	Marcha 1	Marcha 2	CV (%)
Densidade verdadeira (g cm^{-3})	1,429 b	1,325 a	13,78
Densidade aparente (g cm^{-3})	0,298 a	0,292 a	13,20
Porosidade (%)	79,1 a	76,8 a	7,21

A densidade relativa verdadeira foi maior na marcha 1, com média de 1,429 g cm^{-3}, enquanto a marcha 2 apresentou média de 1,325 g cm^{-3}. Essa propriedade está relacionada à densidade da fração sólida que constitui o carvão vegetal e pode ser influenciada pelas transformações físico-químicas promovidas durante a carbonização. Com o aumento da temperatura, ocorre a progressiva degradação dos constituintes da madeira, acompanhada pela liberação de água, gases e compostos voláteis, redução relativa de grupos funcionais oxigenados e formação de uma matriz mais rica em estruturas carbonosas aromáticas e condensadas. Essas modificações afetam a organização e a composição da fase sólida do carvão e podem refletir em sua densidade verdadeira.

A maior densidade verdadeira observada na marcha 1 pode estar associada às condições empregadas nessa carbonização, como maior temperatura final (550 ºC), maior duração e menor taxa média de aquecimento em comparação à marcha 2. Essas condições proporcionaram maior exposição da biomassa ao tratamento térmico e podem ter favorecido maior saída de compostos voláteis e transformação da matriz carbonosa.

Estudos anteriores indicam que condições mais intensas de carbonização podem aumentar a densidade verdadeira do carvão, em razão de modificações em sua fração sólida (Somerville & Jahanshahi, 2015). Entretanto, sua avaliação isolada não permite confirmar maior teor de carbono fixo ou maior organização estrutural.

O maior valor observado na marcha 1 pode estar relacionado ao conjunto de condições adotado nessa carbonização, que apresentou maior temperatura final e maior duração. Como a

temperatura, a taxa de aquecimento e o tempo de carbonização variaram simultaneamente, não é possível separar o efeito de cada fator.

As médias observadas neste trabalho estão compreendidas nos intervalos de densidade verdadeira apresentados por Cárdenas-Aguiar *et al.,* (2024), entre 1,27 e 1,53 g cm^{-3}, e por Dias Júnior *et al.,* (2020), entre 1,12 e 1,50 g cm^{-3} para carvão de Eucalyptus saligna. Santos *et al.,* (2024) também verificaram valores próximos, variando de 1,44 a 1,68 g cm^{-3} em carvões produzidos com diferentes biomassas florestais.

A densidade relativa aparente foi semelhante entre as marchas de carbonização, indicando que, nas condições avaliadas, as diferenças entre os parâmetros utilizados não foram suficientes para alterar essa propriedade. Esse resultado também pode estar relacionado às características da madeira de origem e às variações de massa e volume que ocorrem durante o processo de carbonização.

As médias observadas neste trabalho estão entre os intervalos apresentados por Lima *et al.,* (2022), para carvões de diferentes espécies comerciais amazônicas, entre 0,2480 g cm^{-3} a 0,656 g cm^{-3}. Ramos *et al.,* (2024) também verificaram valores de 0,2550 g cm^{-3} e 0,600 g cm^{-3} de densidade relativa aparente para espécies nativas e 0,2270 g cm^{-3} a 0,4910 g cm^{-3} para *Eucalyptus* spp.

Pereira *et al.,* (2016) afirmam que além dos regimes de carbonização, esta variável é influenciada por características do material lenhoso de origem, como densidade e anatomia da madeira.

A porosidade média foi de 79,1% na marcha 1 e de 76,8% na marcha 2, sem diferença significativa entre as condições de carbonização. A degradação dos constituintes da madeira e a liberação de água, gases e compostos voláteis provocam, durante esse processo, perda de massa e modificações na estrutura do material, favorecendo a formação de espaços vazios no carvão. Com o aumento da temperatura, a maior saída de voláteis pode contribuir para o desenvolvimento da porosidade. Entretanto, essa propriedade também é influenciada pela estrutura anatômica da madeira e pelas alterações de massa e volume que ocorrem durante a carbonização. Assim, embora a marcha 1 tenha apresentado maior valor médio de porosidade, essa diferença não foi significativa.

Os valores encontrados estão dentro da faixa relatada por Anater *et al.* (2019), que observaram porosidades entre 63,87% e 82,46% em diferentes amostras de carvão vegetal.

4. Conclusões

Entre as propriedades avaliadas, apenas a densidade relativa verdadeira apresentou diferença entre as marchas de carbonização. A marcha 1 apresentou maior valor, com 1,429 g cm^{-3}, enquanto na marcha 2 a média foi de 1,325 g cm^{-3}. Para a densidade aparente, os valores foram de 0,298 e 0,292 g cm^{-3} e, para a porosidade, de 79,1 e 76,8%, respectivamente, sem diferença significativa entre as marchas.

5. Agradecimentos

Agradeço à Universidade Tecnológica Federal do Paraná, campus Dois Vizinhos e ao grupo de pesquisa científica Napi Wood Tech.

6. Referências bibliográficas

ANATER, M. J. N. et al. Análise da qualidade do carvão vegetal para uso residencial na região de Curitiba, Paraná, Brasil. Scientia Forestalis, v. 47, n. 123, p. 494-504, 2019.

Cárdenas-Aguiar, E., Méndez, A., Gascó, G., Lado, M., & Paz-González, A. (2024). The effects of feedstock, pyrolysis temperature, and residence time on the properties and uses of biochar from broom and gorse wastes. Applied Sciences, 14(10), Article 4283. https://doi.org/10.3390/app14104283

Antal, M. J., Jr., & Grønli, M. (2003). The art, science, and technology of charcoal production. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, *42*(8), 1619–1640. https://doi.org/10.1021/ie0207919.

Dias Junior, A. F., Esteves, R. P., da Silva, Á. M., Sousa Júnior, A. D., Oliveira, M. P., Brito, J. O., Napoli, A., & Braga, B. M. (2020). Investigating the pyrolysis temperature to define the use of charcoal. *European Journal of Wood and Wood Products*, *78*, 193–204. https://doi.org/10.1007/s00107-019-01489-6.

Dufourny, A., Van De Steene, L., Humbert, G., Guibal, D., Martin, L., & Blin, J. (2019). Influence of pyrolysis conditions and the nature of the wood on the quality of charcoal as a reducing agent. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, *137*, 1–13. https://doi.org/10.1016/j.jaap.2018.10.013.

Empl, F., Schatzl, M., Kleucker, S., de Almeida Garrett, A. T., Ferraz, F. A., Natalli, L. H., da Silva, D. A., da Silva Lopes, E., Figueiredo Filho, A., & Pelz, S. (2025). Characterization of biochar from *Hovenia dulcis* Thunb. and *Mimosa scabrella* Benth. species from the Mixed Ombrophyllous Forest. *Forests*, *16*(7), 1077. https://doi.org/10.3390/f16071077.

Gomes, A. F., Pereira, E. G., Santos, I. S., Carneiro, A. C. O., & Martins, M. A. (2020). Qualidade do carvão vegetal submetido a diferentes taxas de resfriamento com trocador de calor. *Ciência Florestal, 30*(3), 677–687. https://doi.org/10.5902/1980509829608.

Kwon, S. M., Kim, N. H., & Cha, D. S. (2009). An investigation on the transition characteristics of the wood cell walls during carbonization. *Wood Science and Technology, 43*, 487–498. https://doi.org/10.1007/s00226-009-0245-6.

Lima, M. D. R., Massuque, J., Bufalino, L., Trugilho, P. F., Ramalho, F. M. G., de Paula Protásio, T., & Hein, P. R. G. (2022). Clarifying the carbonization temperature effects on the production and apparent density of charcoal derived from Amazonia wood wastes. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 166*, 105636. https://doi.org/10.1016/j.jaap.2022.105636.

Ramos, R. D., Longue Júnior, D., Pereira, G. S., Silva, J. V. M., Valle, M. L. A., & Dias Júnior, A. F. (2024). Influence of basic density and chemical composition of wood on the carbonization process. *Ciência Florestal, 34*(4), e87722. https://doi.org/10.5902/1980509887722.

Reffatti, F. R. (2019). *Parâmetros de qualidade do carvão vegetal de Hovenia dulcis Thunb.* [Trabalho de conclusão de curso, Universidade Tecnológica Federal do Paraná]. Repositório Institucional da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Santos, M., Morim, A. C., Videira, M., Silva, F., Matos, M., & Tarelho, L. A. C. (2024). Characteristics of biochar obtained by pyrolysis of residual forest biomass at different process scales. Energies, 17(19), Article 4861. https://doi.org/10.3390/en17194861

Somerville, M., & Jahanshahi, S. (2015). The effect of temperature and compression during pyrolysis on the density of charcoal made from Australian eucalypt wood. *Renewable Energy, 80*, 471–478. https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.02.013.

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Qualidade do carvão vegetal comercializado para preparo de alimentos no município de Imperatriz – MA

Joabel Raabe[1]; Rafaella dos Santos Rodrigues[1]; Argel Costa Souza[1]; Guilherme dos Anjos Sobrinho Pereira[1]; Elvis Vieira dos Santos[2]; Udson de Oliveira Barros Junior[1]; Thiago de Paula Protásio[2]; Michael Douglas Roque Lima[1];

[1] Universidade Estadual da Região Tocantina do Maranhão - UEMASUL
[2] Universidade Federal de Lavras - UFLA

Resumo: O carvão vegetal é amplamente utilizado para uso doméstico no Brasil, porém informações sobre a qualidade do produto comercializado em escala regional ainda são limitadas. Este estudo objetivou avaliar as propriedades físicas, químicas, energéticas e de combustão do carvão vegetal comercializado em Imperatriz, MA. Amostras de carvão vegetal coletadas em quatro bairros do município de Imperatriz, MA foram analisadas quanto à umidade, densidade relativa aparente, composição química imediata, poder calorífico superior, densidade energética e índices de combustão. Em cada bairro foram selecionados três estabelecimentos comerciais, sendo adquiridas três embalagens comerciais de carvão vegetal (3 kg) por estabelecimento, totalizando 36 embalagens amostradas. Os resultados evidenciaram diferenças significativas entre as amostras quanto às propriedades avaliadas, indicando variação na qualidade e no desempenho energético do carvão vegetal. Embora parte dos carvões tenha apresentado características adequadas ao uso doméstico, a ausência de padronização compromete a eficiência do produto, reforçando a necessidade de critérios técnicos para sua comercialização.

Palavras-chave: Biocombustível; Matriz energética; Mercado florestal.

Quality of domestic charcoal commercialized in the municipality of Imperatriz, Maranhão, Brazil

Abstract: Charcoal is widely used for domestic purposes in Brazil; however, information regarding the quality of products commercialized at the regional scale remains limited. This study aimed to evaluate the physical, chemical, energetic, and combustion properties of charcoal commercialized in Imperatriz, Maranhão, Brazil. Charcoal samples collected from four neighborhoods in the municipality of Imperatriz, MA, were analyzed for moisture content, apparent relative density, proximate chemical composition, gross calorific value, energy density, and combustion indices. Three commercial establishments were selected in each neighborhood, and three commercial packages of charcoal (3 kg) were purchased from each, totaling 36 sampled packages. The results revealed significant differences among samples regarding the evaluated properties, indicating variations in charcoal quality and energy performance. Although some charcoals exhibited characteristics suitable for domestic use, the lack of standardization compromises product efficiency, highlighting the need for technical criteria for its commercialization.

Keywords: Biofuel; Energy matrix; Forest market.

1. Introdução

O carvão vegetal é um biocombustível renovável amplamente utilizado no Brasil, tanto como biorredutor na indústria siderúrgica quanto para carvão vegetal comercializado para cocção de alimentos (Rodrigues; Junior, 2019). O Brasil destaca-se entre os maiores produtores mundiais de carvão vegetal, destinado principalmente ao mercado interno e proveniente de florestas plantadas (IBÁ, 2025). No contexto urbano, seu consumo permanece expressivo em residências e estabelecimentos comerciais, tornando essencial a oferta de produtos com adequado desempenho energético e menor impacto ambiental.

Apesar de sua importância econômica e social, ainda não existem normas nacionais específicas que estabeleçam padrões mínimos de qualidade para o carvão vegetal destinado ao carvão vegetal comercializado para cocção de alimentos. Dessa forma, parâmetros como teor de umidade, densidade aparente, composição química imediata e propriedades energéticas nem sempre são informados ao consumidor, dificultando a avaliação da qualidade do produto. Além disso, essas características influenciam diretamente a eficiência da combustão, o consumo de combustível e as emissões atmosféricas, estando relacionadas às metas de sustentabilidade e ao uso eficiente da energia (Cugurullo, 2020; IEA, 2021).

A qualidade do carvão vegetal depende de fatores como a espécie utilizada, as características da madeira e as condições do processo de carbonização (Lima et al., 2023). Entretanto, diferentes matérias-primas e o reduzido controle de qualidade contribuem para elevada variabilidade das propriedades físico-químicas e energéticas dos carvões comercializados. Estudos realizados por Silva et al. (2018) demonstraram diferenças significativas entre marcas comerciais de carvão vegetal para cocção de alimentos, evidenciando a necessidade de critérios técnicos que assegurem maior padronização e desempenho do produto.

Na região Tocantina do Maranhão, especialmente no município de Imperatriz, ainda são escassas informações sobre a qualidade do carvão vegetal comercializado para cocção de alimentos. Nesse contexto, este trabalho teve como objetivo avaliar as propriedades físicas, químicas, energéticas e de combustão do carvão vegetal comercializado no município de Imperatriz, Maranhão, fornecendo subsídios para a compreensão da qualidade do produto e de sua variabilidade no mercado regional.

2. Material e métodos

2.1. Origem e amostragem do carvão vegetal

O estudo foi conduzido no município de Imperatriz, localizado na região Tocantina do estado do Maranhão, Brasil. Para a caracterização da qualidade do carvão vegetal doméstico comercializado, foram selecionados quatro bairros do município: Bacuri (A), Bom Sucesso (B), Colinas Park (C) e Mercadinho (D).

A seleção dos bairros teve como objetivo contemplar diferentes regiões da cidade, buscando representar distintos perfis de comercialização do carvão vegetal. Os bairros foram selecionados considerando sua distribuição espacial no município e a presença de estabelecimentos com comercialização regular de carvão vegetal ensacado destinado ao consumidor final. Partiu-se da hipótese de que diferenças na origem do produto, nos fornecedores, na logística de distribuição e nas condições de armazenamento poderiam influenciar a qualidade e nas características energéticas do carvão comercializado ao consumidor final.

Em cada bairro foram selecionados três estabelecimentos comerciais, sendo adquiridas três embalagens comerciais de carvão vegetal (3 kg) por estabelecimento, totalizando 36 embalagens amostradas. As embalagens foram armazenadas no Laboratório de Anatomia e Tecnologia da Madeira (LATECMA) da Universidade Estadual da Região Tocantina do Maranhão (UEMASUL) até a realização das análises.

De cada embalagem foram retiradas aleatoriamente 13 amostras representativas, subdivididas para análises físicas, determinação da umidade na base seca (UBS) e da densidade relativa aparente (DRA), e análises químicas (Figura 1).

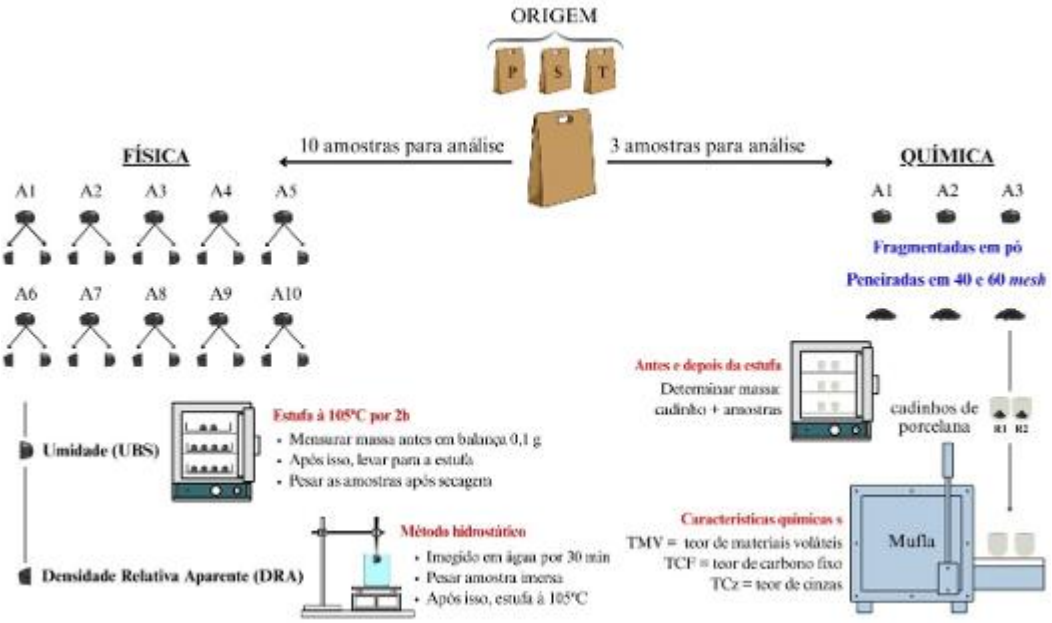


Figura 1 – Esquema ilustrativo da subdivisão das amostras de carvão e das análises de umidade, densidade relativa aparente e química imediata.

2.2. Caracterização física e química

A densidade relativa aparente (DRA) foi determinada conforme a NBR 11941 (ABNT, 2003), com adaptações no procedimento de saturação das amostras. A umidade na base seca (UBS) foi obtida após secagem em estufa a 105 ± 2 °C até massa constante.

As análises químicas imediatas foram realizadas no Laboratório Multiusuário de Biomateriais e Energia da Biomassa (LAMBEB), da Universidade Federal de Lavras (UFLA). Os teores de materiais voláteis, cinzas e carbono fixo foram determinados conforme a ASTM D1762-84 (ASTM, 2021), utilizando amostras compostas, moídas e classificadas entre 40 e 60 *mesh*.

2.3. Propriedades energéticas e combustibilidade

As propriedades energéticas foram avaliadas por meio do poder calorífico superior (PCS) e da densidade energética (DE). O PCS foi estimado conforme a metodologia proposta por Cordero et al. (2001), utilizando os teores de carbono fixo e materiais voláteis. A densidade energética foi obtida pelo produto entre o PCS e a densidade relativa aparente. A combustibilidade dos carvões foi avaliada por meio da razão de combustível (RC), índice de combustibilidade (IC) e inflamabilidade volátil (IV), calculados a partir das propriedades físicas, químicas e energéticas das amostras. Os índices mencionados foram calculados com base nas Equações 1, 2, 3, 4 e 5.

$$PCS = \left(0{,}3543\, x\, TCF_{bs}\right) + \left(0{,}1708\, x\, TMV_{bs}\right) \quad (1)$$

$$DE = DRA\, x\, PCS \quad (2)$$

$$RC = \frac{TCF_{bs}}{T\,MV_{bs}} \quad (3)$$

$$IC = \frac{PCS}{RC}\, x \left(115 - TCz_{bs}\right) x \frac{1}{105} \quad (4)$$

$$IV = \left(\frac{PCS - 0{,}338\, TCF_{bs}}{TMV_{bs} + UBS}\right) x\, 100 \quad (5)$$

onde: PCS é o poder calorífico superior (MJ kg^{-1}); TCF_{bs} é o teor de carbono fixo na base seca (%); TMV_{bs} é o teor de materiais voláteis na base seca (%); DE é a densidade energética (MJ

m^{-3}); DRA é a densidade relativa aparente (g cm^{-3}); RC é a razão de combustível; IC é o índice de combustibilidade (MJ kg^{-1}); TCz_{bs} é o teor de cinzas na base seca (%); IV é a inflamabilidade volátil (MJ kg^{-1}); e UBS é a umidade na base seca (%).

2.4. Análise estatística

Os dados foram submetidos à análise de variância (ANOVA), seguida do teste de Scott-Knott ($p \leq 0,05$). Os pressupostos de normalidade dos resíduos, homogeneidade das variâncias e independência foram verificados pelos testes de Shapiro-Wilk, Levene e Durbin-Watson, respectivamente. Todas as análises foram realizadas no software R, versão 4.3.2 (R Core Team, 2024).

3. Resultados e discussão

3.1. Características físicas dos carvões vegetais

A Figura 2 apresenta a variação da umidade na base seca (UBS) e da densidade relativa aparente (DRA) dos carvões vegetais comercializados nos bairros Bacuri (A), Bom Sucesso (B), Colinas Park (C) e Mercadinho (D). A UBS foi maior no bairro A (6,2%), enquanto os demais apresentaram valores inferiores a 5%. A DRA variou de 0,560 a 0,646 g cm^{-3}, com maior heterogeneidade nos bairros A e D.

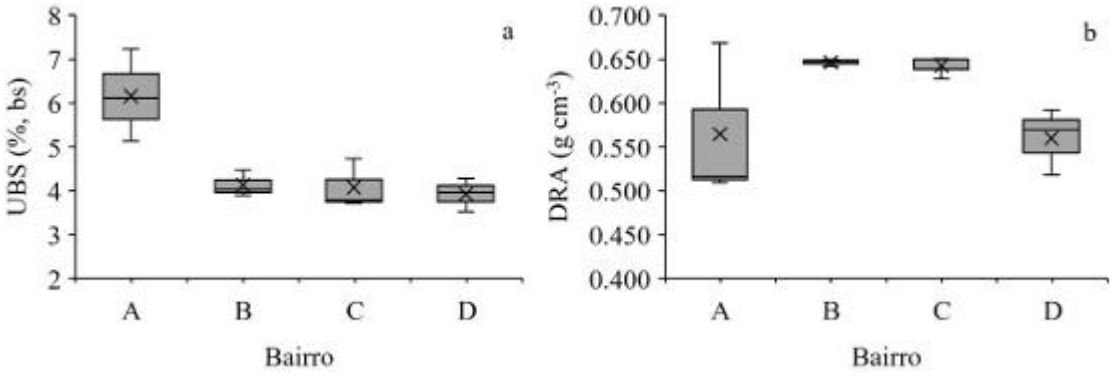


Figura 2 – Variação da umidade na base seca (UBS) (a) e densidade relativa aparente (DRA) (b) dos carvões vegetais comercializados em quatro bairros na cidade de Imperatriz, Maranhão.

A maior umidade observada no bairro A evidencia a necessidade de maior controle da secagem antes do ensacamento, uma vez que teores elevados reduzem a eficiência da combustão, retardam a ignição e favorecem a formação de fumaça (Dias Júnior et al., 2015; Nunes et al., 2020). Além disso, Rosa et al. (2012) e a Resolução SAA nº 10/2003 do Estado de São Paulo recomendam teores de umidade inferiores a 5% para carvões destinados ao uso

doméstico, condição atendida pelas amostras dos bairros B, C e D. A variabilidade de UBS e DRA indica ausência de padronização dos carvões comercializados, resultado também observado por Silva e Silva et al. (2020) e Jelonek et al. (2020).

Neste estudo, a padronização refere-se à uniformidade das propriedades físicas, químicas e energéticas do carvão vegetal comercializado, incluindo teor de umidade, densidade aparente, composição química imediata, poder calorífico e desempenho na combustão, parâmetros diretamente relacionados à qualidade e eficiência do produto.

3.2. Características químicas dos carvões vegetais

A Figura 3 mostra diferenças na composição química imediata entre os bairros, com maiores teores de materiais voláteis nos bairros C e D, maior carbono fixo no bairro A e maiores teores de cinzas no bairro D.

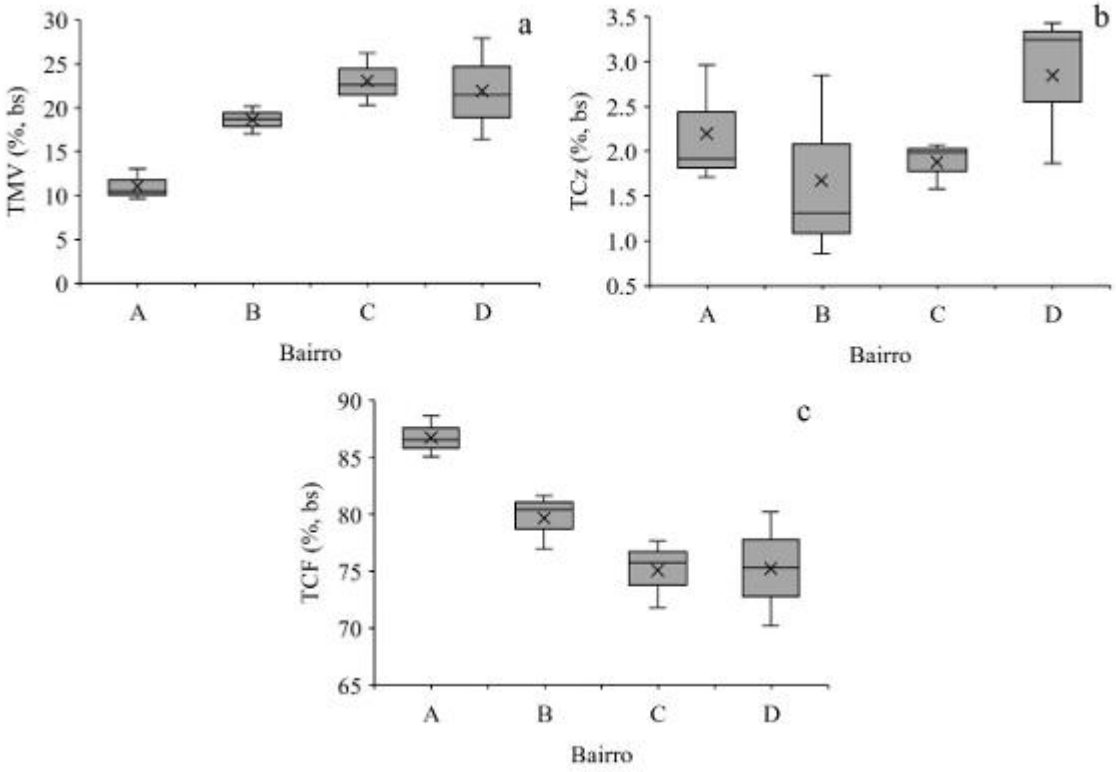


Figura 3 – Variação dos teores de materiais voláteis (TMV) (a), cinzas (TCz) (b) e carbono fixo (TCF) (c), na base seca (bs) dos carvões vegetais comercializados em quatro bairros na cidade de Imperatriz, Maranhão. Os bairros A, B, C e D, referem-se ao Bacuri, Bom Sucesso, Colinas Park e Mercadinho, respectivamente.

A composição química influencia diretamente o desempenho durante a combustão (Racero-Galaraga et al., 2024; Dias Júnior et al., 2020). Os maiores teores de materiais voláteis observados nos bairros C e D favorecem a ignição, enquanto os maiores teores de carbono fixo nos bairros A e B indicam maior estabilidade térmica e permanência da combustão (Brand et al., 2015).

Todos os bairros apresentaram teores médios de cinzas superiores ao limite do Selo Carvão Premium, indicando menor qualidade sob esse aspecto. Elevados teores de cinzas reduzem o aproveitamento energético e comprometem a eficiência térmica (Pelanda et al., 2015; Nunes et al., 2020).

3.3. Propriedades energéticas e comportamento de combustão

As propriedades energéticas e os índices de combustão dos carvões vegetais são apresentados nas Figuras 4 e 5. Os maiores valores médios de poder calorífico superior (PCS) foram observados no bairro A, enquanto a maior densidade energética (DE) ocorreu no bairro B. Em contraste, os bairros C e D apresentaram menores valores médios para essas propriedades.

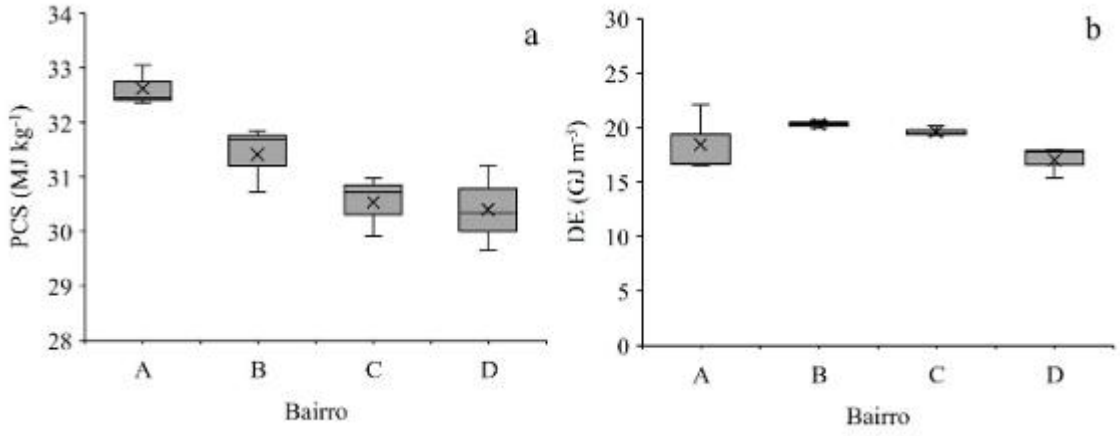


Figura 4 – Variação do poder calorífico superior (PCS) (a) e densidade energética (DE) (b) dos carvões vegetais comercializados em quatro bairros na cidade de Imperatriz, Maranhão. Os bairros A, B, C e D, referem-se ao Bacuri, Bom Sucesso, Colinas Park e Mercadinho, respectivamente.

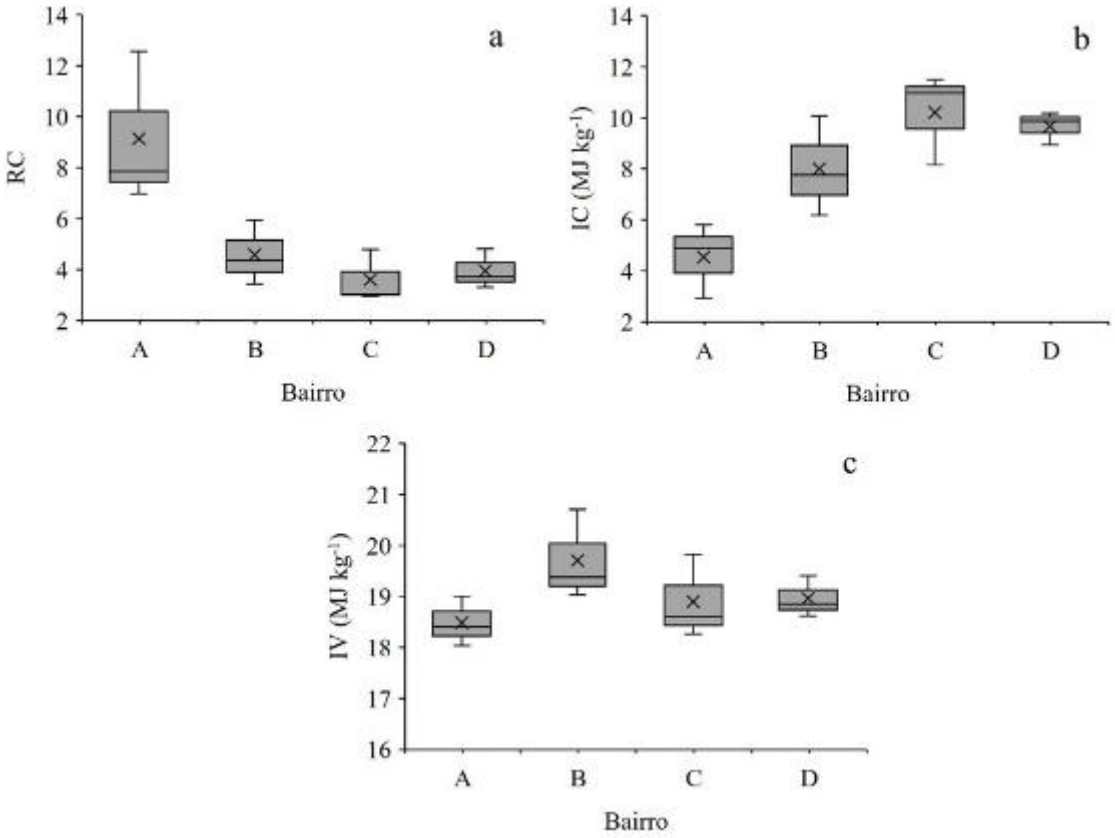


Figura 5 – Razão de combustível (RC) (a), índice de combustibilidade (IC), em MJ kg^{-1} (b) e inflamabilidade volátil (IV), em MJ kg^{-1} (c) dos carvões vegetais comercializados em quatro bairros na cidade de Imperatriz, Maranhão. Os bairros A, B, C e D, referem-se ao Bacuri, Bom Sucesso, Colinas Park e Mercadinho, respectivamente.

Os bairros A e B apresentaram carvões com maior estabilidade térmica, enquanto C e D favoreceram a ignição devido aos maiores TMV, porém com menor duração da combustão (Lubwama et al., 2023). As diferenças observadas refletem principalmente as condições de carbonização (Dias Júnior et al., 2020). Os resultados evidenciam elevada variabilidade nas propriedades físicas, químicas, energéticas e de combustão dos carvões comercializados em Imperatriz, indicando ausência de padronização e reforçando a necessidade de maior controle da matéria-prima e do processo de carbonização.

4. Conclusões

A avaliação das propriedades físicas, químicas, energéticas e de combustão do carvão vegetal doméstico comercializado no município de Imperatriz, Maranhão, evidenciou diferenças significativas na qualidade do produto entre os bairros avaliados, confirmando a variabilidade do carvão vegetal disponível no mercado regional. Os carvões comercializados no

bairro Bacuri apresentaram melhor desempenho energético e maior estabilidade de combustão, embora tenham apresentado maior teor de umidade.

5. Agradecimentos

Os autores agradecem à UEMASUL pela infraestrutura e pela concessão de bolsas de produtividade (Edital nº 16/2025 – PROPGI/UEMASUL), bem como ao LAMBEB/UFLA pelo apoio na realização das análises químicas.

6. Referências bibliográficas

American Society for Testing and Materials. (2021). ASTM D1762-84: Standard test method for chemical analysis of wood charcoal. ASTM International.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2003). NBR 11941: Madeira: Determinação da densidade básica. ABNT.

Brand, M. A., Rodrigues, A. A., Oliveira, A., Machado, M. S., & Zen, L. R. (2015). Qualidade do carvão vegetal para o consumo doméstico comercializado na Região Serrana Sul de Santa Catarina. Revista Árvore, 39(6), 1165–1173. https://doi.org/10.1590/0100-67622015000600020

Cordero, T., Marquez, F., Rodriguez-Mirasol, J., & Rodriguez, J. J. (2001). Predicting heating values of lignocellulosics and carbonaceous materials from proximate analysis. Fuel, 80(11), 1567–1571. https://doi.org/10.1016/S0016-2361(01)00034-5

Cugurullo, F. (2020). Urban artificial intelligence: From automation to autonomy in the smart city. Frontiers in Sustainable Cities, 2, Article 38. https://doi.org/10.3389/frsc.2020.00038

Dias Júnior, A. F., Brito, J. O., & Andrade, C. R. (2015). Granulometric influence on the combustion of charcoal for barbecue. Revista Árvore, 39(6), 1127–1133. https://doi.org/10.1590/0100-67622015000600016

Dias Junior, A. F., Esteves, R. P., Silva, Á. M., Sousa Júnior, A. D., Oliveira, M. P., Brito, J. O., Napoli, A., & Braga, B. M. (2020). Investigating the pyrolysis temperature to define the use of charcoal. European Journal of Wood and Wood Products, 78(1), 193–204. https://doi.org/10.1007/s00107-019-01515-w

IBÁ – Indústria Brasileira de Árvores. (2025). Relatório anual 2025: Ano base 2024. IBÁ.

International Energy Agency. (2021). World Energy Outlook 2021. IEA.

Jelonek, Z., Drobniak, A., Mastalerz, M., & Jelonek, I. (2020). Environmental implications of the quality of charcoal briquettes and lump charcoal used for grilling. Science of the Total Environment, 747, 141267. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141267

Lima, M. D. R., Bufalino, L., Scatolino, M. V., Hein, P. R. G., Carneiro, A. C. O., Trugilho, P. F., & Protásio, T. P. (2023). Segregating Amazonia logging wastes from sustainable forest management improves carbonization in brick kilns. Renewable Energy, 211, 772–788. https://doi.org/10.1016/j.renene.2023.04.126

Lima, M. D. R., Simetti, R., Assis, M. R., Trugilho, P. F., Carneiro, A. C. O., Bufalino, L., Hein, P. R. G., & Protásio, T. P. (2020). Charcoal of logging wastes from sustainable forest management for industrial and domestic uses in the Brazilian Amazonia. Biomass and Bioenergy, 142, 105804. https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2020.105804

Lubwama, M., Yiga, V. A., Wanambwa, S., Bbosa, D., & Lubwama, H. N. (2023). Pyrolysis kinetics and combustion characteristics of local firewood species and charcoal produced by slow pyrolysis. Biomass Conversion and Biorefinery, 13, 12679–12688. https://doi.org/10.1007/s13399-021-02125-5

Nunes, G. R. S., Kupke, M. S., Ximendes, M. C., Hanauer, J. E., Farias, J. A., & Pedrazzi, C. (2020). Qualidade do carvão vegetal para consumo doméstico comercializado na região central do Rio Grande do Sul. Agropecuária Científica no Semiárido, 16(3). https://doi.org/10.30969/acsa.v16i3.1265

Pelanda, K. A., Potulski, D. C., Silva, D. A., & Ferraz, F. (2015). Avaliação das possíveis implicações do uso de diferentes biomassas florestais como biocombustível em geradores de vapor. Brazilian Journal of Wood Science (Ciência da Madeira), 6(2), 112–121. https://doi.org/10.15210/cmad.v6i2.5457

Racero-Galaraga, D., Rhenals-Julio, J. D., Sofan-German, S., Mendoza, J. M., & Bula-Silvera, A. (2024). Proximate analysis in biomass: Standards, applications and key characteristics. Results in Chemistry, 12, 101886. https://doi.org/10.1016/j.rechem.2024.101886

R Core Team. (2024). R: A language and environment for statistical computing (Version 4.3.2). R Foundation for Statistical Computing. https://www.r-project.org/

Rodrigues, T., & Braghini Junior, A. (2019). Charcoal: A discussion on carbonization kilns. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 143, 104670. https://doi.org/10.1016/j.jaap.2019.104670

Rosa, R. A., Donária, M., Paes, J. B., Andrade, W. S. P., & Moulin, J. C. (2012). Qualidade do carvão vegetal para o consumo doméstico. Journal of Biotechnology and Biodiversity, 3(2), 41–48. https://doi.org/10.20873/jbb.uft.cemaf.v3n2.rosa

São Paulo (Estado). Secretaria de Agricultura e Abastecimento. (2003). Resolução SAA nº 10, de 11 de julho de 2003. Governo do Estado de São Paulo.

Silva e Silva, M. R., Ribeiro, E. A. S., Barbosa, J. P., Alves Júnior, F. T., Guedes, M. C., Pinheiro, P. G., & Bufalino, L. (2020). Quality attributes of commercial charcoals produced in Amapá, a Brazilian state located in the Amazonia. Environment, Development and Sustainability, 22, 719–732. https://doi.org/10.1007/s10668-018-0200-7

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Qualidade do carvão vegetal da madeira de *Corymbia* com diferentes idades e posições do tronco

Victor Vinicius Sousa Martinelli Sales[1]; Dalton Longue Júnior[1] João Vitor Moraes da Silva[1]; Augusto Leal de Souza Ferraz[1]; Maria Eduarda de Sousa Santos[1]

[1] Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia – UESB

Resumo: O carvão vegetal é um recurso energético com aplicação residencial e principalmente industrial. Dentre as espécies madeireiras, o gênero *Corymbia* vem sendo bastante utilizado para a produção de carvão vegetal, motivando pesquisas sobre a qualidade e eficiência energética. O objetivo deste trabalho foi determinar a qualidade do carvão vegetal de *Corymbia* em diferentes idades e posições no tronco. Foram realizadas carbonizações da madeira de *Corymbia* com idades de 3, 7 e 9 anos das posições base, meio e topo. Foram avaliados a composição química imediata, densidade aparente e rendimento gravimétrico. Os resultados mostraram que o rendimento foi máximo aos 7 anos, enquanto a densidade aparente do carvão aumentou progressivamente com a idade. O teor de carbono fixo do carvão não apresentou variações significativas no sentido base-topo, entretanto, foi maior na madeira de 3 anos. Portanto, conclui-se que a idade é um fator significante para a qualidade da madeira/carvão de *Corymbia* e que a madeira aos 7 anos é mais recomendada para a produção de carvão vegetal.

Palavras-chave: Carbonização, densidade aparente, composição química imediata.

Charcoal quality from *Corymbia* wood at different ages and trunk positions

Abstract: Charcoal is an energy resource used in residential and, primarily, industrial applications. Among timber species, the genus *Corymbia* has been widely used for charcoal production, driving research on its quality and energy efficiency. The objective of this study was to determine the quality of *Corymbia* charcoal at different ages and trunk positions. Carbonizations of *Corymbia* wood at 3, 7, and 9 years of age were performed using samples from the base, middle, and top positions. Proximate chemical composition, bulk density, and gravimetric yield were evaluated. The results showed that the yield peaked at 7 years, while the bulk density of the charcoal increased progressively with age. The fixed carbon content of the charcoal did not show significant variations along the base-to-top direction; however, it was higher in the 3-year-old wood. Therefore, it is concluded that age is a significant factor in the wood/charcoal quality of *Corymbia*, and that 7-year-old wood is the most recommended for charcoal production.

Keywords: Carbonization, apparent density, proximate analysis.

1. Introdução

A produção de carvão vegetal é uma atividade de grande relevância econômica no Brasil, sendo utilizada no setor residencial e especialmente para o setor siderúrgico. De acordo com a Indústria Brasileira de Árvores (IBÁ, 2025), o Brasil produziu 6,6 milhões de toneladas de carvão no ano de 2024, confirmando-o assim como o maior produtor de carvão vegetal do mundo.

Obtido predominantemente de madeiras oriundas de florestas plantadas, o carvão vegetal contribui também para a fixação de carbono na forma sólida e para a redução da pressão sobre as florestas nativas (Carneiro et al., 2024). A biomassa florestal é a principal matéria-prima do carvão vegetal, que se destaca como uma fonte de energia renovável (Oliveira et al., 2023).

Entretanto, o uso do carvão vegetal pela indústria fica condicionado aos padrões de qualidade pré-determinados, como na indústria siderúrgica, que por exemplo, requer carvão vegetal de alta qualidade para a produção de ferro-gusa, sendo as características desejáveis o alto teor de carbono fixo, elevada densidade aparente, além de baixo teor de cinzas e materiais voláteis (Andrade et al., 2025).

Muitas pesquisas têm sido desenvolvidas para a avaliação desses atributos. Mengistu et al. (2025) evidenciaram em seu estudo com *Acacia decurrens* que as propriedades físico-químicas e o poder calorífico do carvão vegetal são afetados pela idade da árvore e pela posição no tronco da qual a madeira é obtida. As árvores do estudo com 7 anos produziram carvão vegetal de melhor qualidade, com alta densidade básica, alto teor de carbono fixo e alto poder calorífico, associados a menores teores de voláteis e cinzas, quando comparadas às idades de 3 e 5 anos.

A densidade básica da madeira é um dos principais indicadores de qualidade do carvão vegetal, sendo demonstrada uma relação direta entre a densidade básica da madeira e a densidade aparente do carvão (Ramos et al., 2024). Partindo dessa lógica, a posição no tronco (base, meio e topo) pode influenciar as propriedades do carvão obtido, uma vez que essa variação altera a composição anatômica da madeira (Mengistu et al., 2025).

Nesse contexto, o presente trabalho teve como objetivo avaliar a influência das idades das árvores e da posição no tronco (base, meio e topo) sobre o rendimento gravimétrico, a densidade aparente e a composição química imediata do carvão vegetal produzido a partir de clones comerciais de *Corymbia.*

2. Material e métodos

a. Material

A madeira utilizada foi proveniente de clones comerciais de *Corymbia* com idades de 3, 7 e 9 anos. Os clones foram coletados em plantios localizados no município de Entre Rios, região nordeste da Bahia. As amostras de madeira foram separadas nas posições base, meio e topo e encaminhadas ao Laboratório de Tecnologia de Produtos Florestais da Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia (UESB) para a realização das carbonizações.

b. Métodos

Carbonização

As carbonizações ocorreram em forno tipo mufla com aquecimento elétrico e capacidade de 8 L, utilizando amostras de aproximadamente 400 g de madeira acondicionadas em forno cilíndrico de metal, por um período de 4 horas. O controle do tempo iniciou quando o forno atingiu a temperatura de 150 °C, mantendo uma taxa de aquecimento de 1,67 °C/min (100 °C/h) até a temperatura final de 450 °C, que foi mantida por 30 minutos.

O rendimento gravimétrico foi determinado pela razão entre a massa de carvão produzido com a massa de madeira seca, expresso em percentagem.

Determinação da qualidade do carvão vegetal

A densidade aparente do carvão foi determinada pelo método de imersão em água via balanço hidrostático, adaptada a partir da norma ABNT NBR 11941 (2003).

A densidade aparente foi calculada pela razão entre a massa seca da amostra (obtida após secagem em estufa a 103 ± 2 °C) e o seu respectivo volume aparente.

A composição química imediata foi determinada seguindo a norma ABNT 8112 (1986), para obtenção dos teores de materiais voláteis (MV), cinzas (CZ) e carbono fixo (CF), sendo o CF calculado por diferença dos demais componentes.

Delineamento experimental e análise estatística

O experimento foi conduzido em delineamento inteiramente casualizado (DIC), com 5 repetições (árvores) por tratamento. A influência da idade (3,7 e 9 anos) e da posição do tronco (base, meio e topo) sobre as propriedades do carvão foram avaliadas

separadamente. Os dados obtidos foram submetidos à análise de variância (ANOVA) e as médias comparadas pelo teste de *Tukey* a 95% de probabilidade. As análises de variância e os testes de médias foram realizados no software PAST (versão 5.3), enquanto os modelos de regressão linear e seus respectivos coeficientes de determinação (R^2) foram desenvolvidos com o auxílio do software Microsoft Excel.

3. Resultados e discussão

a. Efeito da idade sobre as propriedades do carvão vegetal

O rendimento gravimétrico apresentou o maior valor para a idade de 7 anos com aproximadamente 30,5%, e valor mínimo aos 9 anos com aproximadamente 29,0%. Na idade de 3 anos, a madeira de *Corymbia* apresentou valor intermediário de 29,5% (Figura 1A). Esse comportamento pode estar associado com as variações químicas que ocorrem com o avanço da idade, mesmo se tratando de material muito jovem, principalmente nos teores de lignina, que afetam diretamente o rendimento da carbonização (Gouvêa et al., 2015).

A densidade aparente do carvão apresentou tendência crescente com a idade, variando de aproximadamente 375 kg/m³ aos 3 anos para cerca de 430 kg/m³ aos 9 anos (Figura 1B). Esse resultado se confirma com a tendência do aumento da densidade básica da madeira com o avanço da idade, refletindo diretamente na densidade aparente do carvão produzido, conforme demonstrado por Ramos et al. (2024), que evidenciaram a relação direta entre essas duas variáveis.

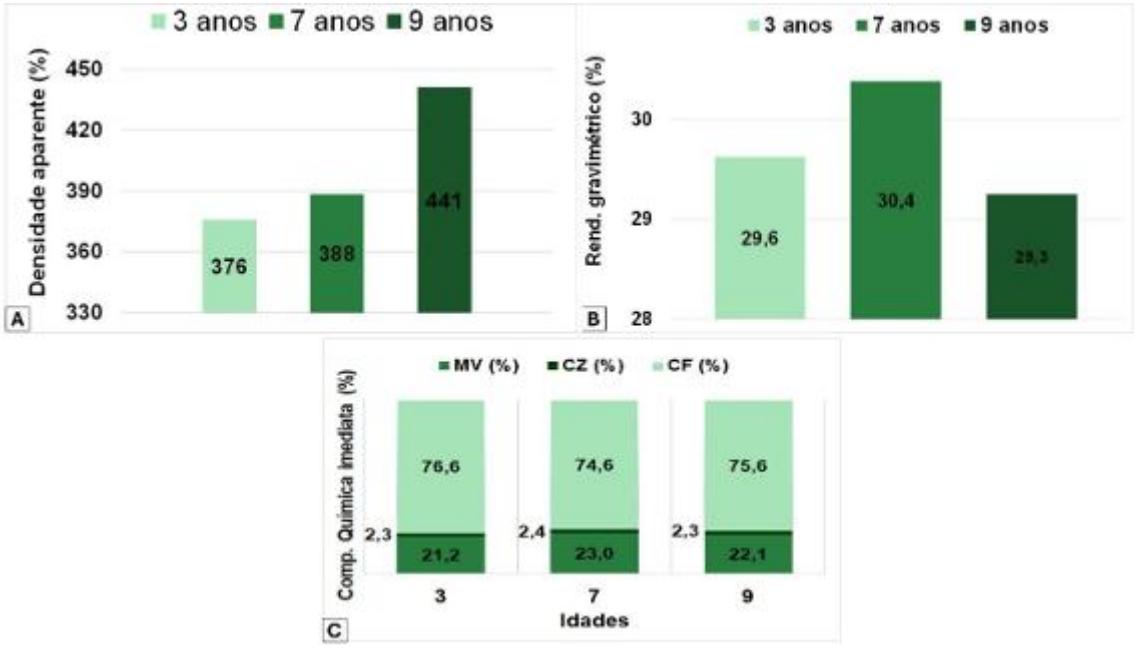


Figura 1 – Rendimento do processo de carbonização (A) e qualidade do carvão vegetal da madeira de *Corymbia*: (B) densidade aparente e (C) composição química imediata.

A composição química imediata se manteve estável entre as diferentes idades (Figura 1C), com teor de carbono fixo entre 74,6 e 76,6%, teor de materiais voláteis entre 21,2 e 23,0% e o teor de cinzas entre 2,3 e 2,4%. A estabilidade desses parâmetros indica que apesar da idade ter influenciado na densidade do carvão, o mesmo não ocorreu para sua composição química imediata dentro do intervalo de idades avaliado.

b. Efeito da posição no tronco sobre as propriedades do carvão vegetal

O teor de carbono fixo variou entre 74,5 e 77,2% entre as combinações de idade dos clones e posição no tronco, com diferenças significativas entre as posições meio e topo segundo o teste de Tukey a 95% de probabilidade (Figura 2A). Foram observados maiores valores de carbono fixo no carvão proveniente das árvores com 3 anos de idade em relação as outras idades (7 e 9 anos) para todas as posições. Mengistu et al. (2025) encontraram resultados semelhantes para a madeira de *Acacia decurrens*.

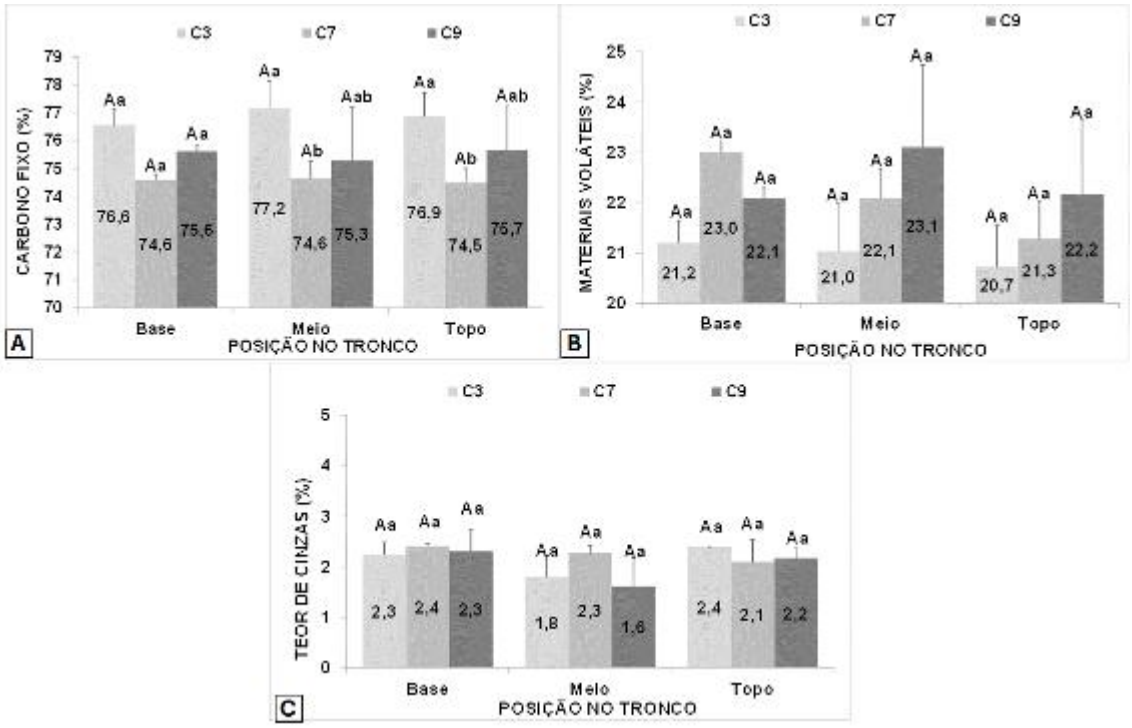


Figura 2 – Análise química imediata nas diferentes posições e diferentes idades

Letras minúsculas idênticas indicam igualdade estatística entre idades e letras maiúsculas idênticas indicam igualdade estatística entre posições no tronco, pelo teste de Tukey a 95% de probabilidade ($p \leq 0,05$).

O teor de materiais voláteis não apresentou diferença significativa entre idades e posições (Figura 2B), variando entre 20,7 e 23,1%.

O teor de CZ não apresentou diferença estatística significativa entre as posições no tronco e entre os clones avaliados (Figura 2C), variando entre 1,6 e 2,4%, valores que são considerados adequados na indústria siderúrgica (Andrade et al., 2025).

c. Relação entre a densidade básica da madeira e a densidade aparente do carvão

A análise de regressão demonstrou relação positiva entre a densidade básica da madeira e a densidade aparente do carvão vegetal, com comportamento distinto entre as posições no tronco (Figura 3A). Na posição base e topo observou-se forte ajuste linear (R^2 = 0,9956 e 0,9192 respectivamente), indicando que a densidade básica da madeira é um excelente preditor da densidade aparente do carvão nessa posição. Esse resultado corrobora com Ramos et al. (2024), que demonstraram em seu trabalho alta correlação entre essas variáveis.

Na posição meio (R^2 = 0,4223), o ajuste foi consideravelmente mais fraco, sugerindo que outros fatores, além da densidade básica, influenciam a densidade do carvão nessa região do tronco, possivelmente relacionados à maior heterogeneidade anatômica (Mengistu et al., 2025). Quando os dados de todas as posições foram agrupados em um modelo geral, o ajuste foi considerado moderado (R^2 = 0,3891), conforme mostrado na Figura 3B, reforçando que a segregação feita pela posição no troco apresenta efeito positivo nos atributos do produto final.

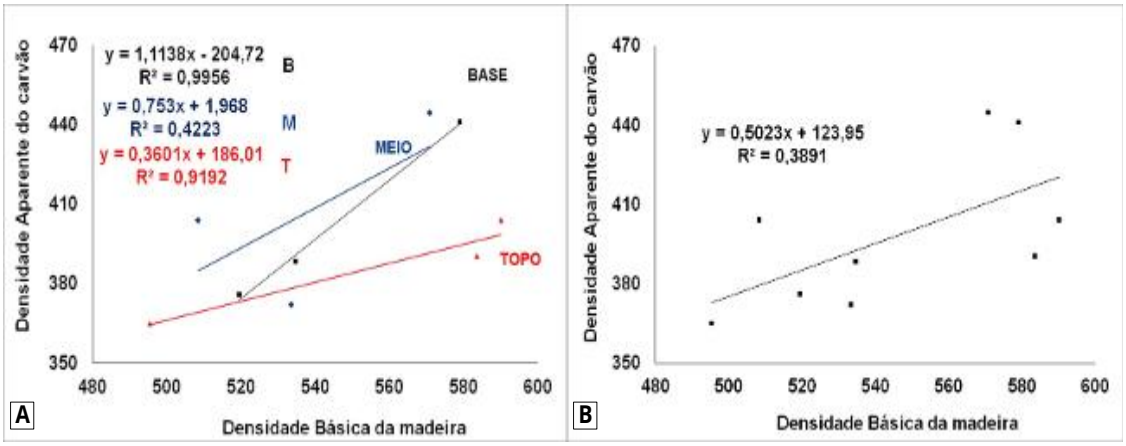


Figura 3 - Correlação entre densidade básica e aparente do carvão vegetal: separadamente pelas posições base, meio e topo (A); agrupadas pelas posições base, meio e topo (B).

4. Conclusões

O fator idade da madeira de *Corymbia* influenciou a densidade aparente do carvão vegetal, e pouco afetou o rendimento e composição química imediata.

A posição no tronco não afetou a composição química imediata quando consideradas as árvores inteiras, entretanto as madeiras com 3 anos segregadas pela posição do fuste apresentaram maior teor de carbono fixo.

Os resultados evidenciaram a importância da densidade aparente como indicador de qualidade do carvão vegetal, com potencial para subsidiar a seleção de material genético e a definição da idade ótima de corte para fins energéticos e siderúrgicos.

5. Agradecimentos

A Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia pela infraestrutura para realização da pesquisa. Ao CNPq pelo fomento da bolsa de pesquisa. Ao Grupo de Pesquisa em Tecnologia de Produtos Florestais (Woodtech) pelo suporte científico.

6. Referências bibliográficas

Andrade, R., Benedet, L., Mancini, M., Silva, S. H. G., Freitas, C. da S., Carneiro, M. A. C., & Curi, N. (2025). Portable X-ray fluorescence sensor for ecofriendly, low-cost, and fast assessment of eucalypt charcoal attributes. Ciência e Agrotecnologia, 49, e026424. https://doi.org/10.1590/1413-7054202549026424

Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT. (1986). NBR 8112: Carvão vegetal — Análise imediata. ABNT.

Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT. (2003). NBR 11941: Madeira — Determinação da densidade básica. ABNT

Carneiro, A. C. O., Cardoso, M. T., Zanuncio, A. J. V., Pereira, E. G., Carvalho, A. M. M. L., Martins, M. A., Guimarães, D. P. S., Evangelista, E. L. C., Castro, V. R., Carvalho, A. G., & Araujo, S. O. (2024). Carbonization gases as an energy source for Eucalyptus logs drying of different diameter classes in metallic dryer. Revista Árvore, 48(1), 1–17. https://doi.org/10.53661/1806-9088202448263784

Gouvêa, A. F. G., Trugilho, P. F., Assis, C. O., Assis, M. R., Colodette, J. L., & Gomes, C. M. (2015). Avaliação do efeito da relação siringila/guaiacila da lignina de eucalipto na produção de carvão vegetal. Ciência da Madeira, 6(2), 71–78. https://periodicos.ufpel.edu.br/index.php/cienciadamadeira/article/view/5945

Indústria Brasileira de Árvores (IBÁ). (2025). Relatório IBÁ 2025: ano base 2024. Brasília, Brasil. https://iba.org/wp-content/uploads/2025/10/IBA_relatorio_digital_POR.pdf

Oliveira, L. P. de, Carneiro, A. de C. O., Peres, L. C., Demuner, I. F., Ferreira, S. O., Fernandes, S. A., & Jorge, F. de J. (2023). Wood and charcoal quality in the selection of Eucalyptus spp. clones and *Corymbia torelliana* x *Corymbia citriodora* for steel industry. Revista Árvore, 47, e4722. https://doi.org/10.1590/1806-908820230000022 Mengistu,

M., Rawat, Y. S., Tekleyohannes, A. T., & Asfaw, S. F. (2025). Variation in the quality of charcoal from Acacia decurrens (J.C. Wendl.) Willd. with age and longitudinal stem portions. Trees, Forests and People, 19, 100790. https://doi.org/10.1016/j.tfp.2025.100790

Ramos, R. D., Longue Júnior, D., Pereira, G. S., Silva, J. V. M. da, Valle, M. L. A., & Dias Júnior, A. F. (2024). Influência da densidade básica e da composição química da madeira para o processo de carbonização. Ciência Florestal, 34(4), e87722. https://doi.org/10.5902/1980509887722

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Qualidade energética de resíduos de manejo florestal sustentável para aplicação do sistema fornos-fornalha na Amazônia

Samara Teixeira da Silva[1]; Elvis Vieira dos Santos[2]; Murilo Emanoel Queiroz de Oliveira[3]; Michael Douglas Roque Lima[4]; Paulo Fernando Trugilho[5]; Angélica de Cássia Oliveira Carneiro[6]; Thiago de Paula Protásio[7]

[1,3]Universidade Federal Rural da Amazônia; [2,5,7] Universidade Federal de Lavras; [4]Universidade Estadual da Região Tocantina do Maranhão; [6] Universidade Federal de Viçosa

Resumo: A elevada heterogeneidade dos resíduos provenientes de Planos de Manejo Florestal Sustentável (PMFS) representa um desafio para sua utilização em sistemas modernos de carbonização. Este estudo objetivou validar a qualidade energética de resíduos florestais amazônicos para aplicação do sistema fornos-fornalha na Amazônia. Foram avaliadas dezoito espécies, previamente segregadas em duas classes de densidade, quanto às propriedades físicas, químicas e energéticas. Os resíduos apresentaram ampla variabilidade tecnológica, porém com elevado potencial energético, evidenciado pelos valores de poder calorífico superior entre 19,1 e 21,2 MJ kg^{-1} e pela maior densidade energética das madeiras mais densas. A segregação por densidade reduziu a heterogeneidade da biomassa e favoreceu a obtenção de uma matéria-prima mais uniforme para a carbonização. Os resultados validam o potencial dos resíduos de PMFS para utilização no sistema fornos-fornalha e representam a primeira avaliação científica dessa tecnologia utilizando biomassa residual na Amazônia, contribuindo para o aproveitamento sustentável dos resíduos florestais na produção de bioenergia.

Palavras-chave: Carbonização; Bioenergia; Densidade Energética.

Energetic Quality of Sustainable Forest Management Residues for Kiln-Furnace System Application in the Amazon

Abstract: The high heterogeneity of residues generated from Sustainable Forest Management Plans (SFMPs) represents a major challenge for their use in modern carbonization systems. This study aimed to validate the energetic quality of Amazon forest residues for application in a kiln–furnace system in the Amazon. Eighteen wood species, previously classified into two density classes, were evaluated for their physical, chemical, and energetic properties. The residues exhibited high technological variability but also significant bioenergy potential, as demonstrated by higher heating values ranging from 19.1 to 21.2 MJ kg^{-1} and greater energy density in higher-density woods. Density-based segregation reduced biomass heterogeneity and provided a more homogeneous feedstock for carbonization. The results validate the potential of SFMP residues for use in kiln–furnace systems and represent the first scientific evaluation of this technology using residual forest biomass in the Amazon, contributing to the sustainable utilization of forest residues for bioenergy production.

Keywords: Carbonization; Bioenergy; Energy Density.

244. **Introdução**

A crescente demanda por fontes renováveis de energia e pela redução das emissões de gases de efeito estufa (GEE) tem impulsionado o desenvolvimento de tecnologias capazes de ampliar o aproveitamento sustentável da biomassa florestal. Nesse contexto, o carvão vegetal ocupa posição estratégica na matriz energética brasileira e na produção siderúrgica, destacando-se como um importante biorredutor renovável. Entre as alternativas para ampliar a oferta de biomassa sem promover novos desmatamentos, os resíduos provenientes de Planos de Manejo Florestal Sustentável (PMFS), como galhos, sapopemas e restos de troncos, representam uma fonte abundante e legalmente disponível para produção de bioenergia na Amazônia (Lima et al., 2023; Brasil, 2025).

Entretanto, a utilização desses resíduos em processos industriais ainda enfrenta limitações importantes. Ao contrário das florestas plantadas de *Eucalyptus*, normalmente compostas por matéria-prima mais homogênea, os resíduos de PMFS apresentam elevada variabilidade decorrente da diversidade de espécies exploradas, refletindo diferenças expressivas nas propriedades físicas, químicas, anatômicas e energéticas da madeira. Essa heterogeneidade influencia diretamente o comportamento térmico da biomassa e compromete a uniformidade do processo de carbonização e da qualidade do carvão vegetal produzido (Lima et al., 2020a; Lima et al., 2023; Barros et al., 2023; Soares et al., 2025; Santos et al., 2025).

Nos últimos anos, o sistema de carbonização fornos-fornalha consolidou-se como uma das principais inovações tecnológicas para produção de carvão vegetal de menor impacto ambiental, proporcionando maior controle operacional, aumento do rendimento gravimétrico, redução da geração de atiços e diminuição das emissões atmosféricas em relação aos sistemas tradicionais. A evolução dessa tecnologia incorporou sistemas de queima dos gases da carbonização, monitoramento térmico, e conceitos de economia circular, tornando o sistema uma alternativa tecnicamente consolidada para a produção sustentável de carvão vegetal (Damásio et al., 2015; Oliveira et al., 2017; Schettini et al., 2022; Silva et al., 2024; Carneiro et al., 2025). Apesar desses avanços, inexistem estudos científicos utilizando resíduos provenientes de PMFS em sistemas fornos-fornalha na Amazônia, limitando a expansão dessa tecnologia para uma região com elevada disponibilidade de biomassa residual.

Neste contexto, o presente estudo representa a primeira avaliação científica da aplicação do sistema fornos-fornalha utilizando resíduos provenientes de Planos de Manejo Florestal Sustentável na Amazônia. Parte-se da hipótese de que a segregação prévia da biomassa em classes de densidade reduz sua heterogeneidade e fornece matéria-prima com qualidade física, química e energética compatível com a operação eficiente dessa tecnologia. Assim, o objetivo

deste trabalho foi avaliar a qualidade energética de resíduos amazônicos segregados por densidade, validando seu potencial de utilização na primeira aplicação do sistema fornos-fornalha em condições operacionais da Amazônia.

2. Material e métodos

2.1 Área de estudo e sistema de carbonização

O estudo foi conduzido em uma Unidade de Produção de Carvão Vegetal (UPC) localizada no município de Paragominas, estado do Pará, Amazônia brasileira, onde foi implantada uma unidade demonstrativa do sistema de carbonização fornos-fornalha destinada ao aproveitamento energético de resíduos provenientes de Planos de Manejo Florestal Sustentável (PMFS).

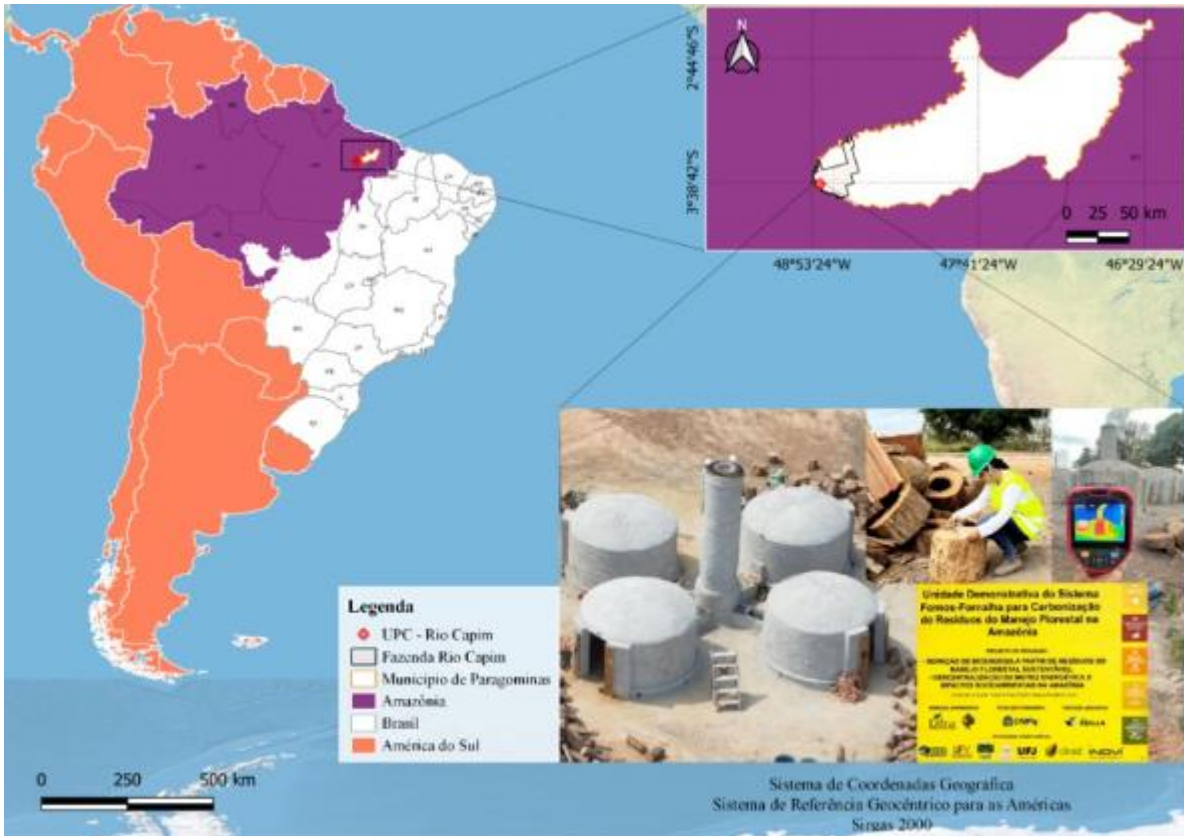


Figura 1 – Mapa de localização da Unidade de Produção de Carvão Vegetal (UPC) onde foi instalada a unidade demonstrativa do sistema fornos-fornalha, situada na Amazônia brasileira.

O sistema utilizado é composto por fornos circulares de alvenaria interligados a uma fornalha central por meio de dutos, permitindo a queima dos gases gerados durante a carbonização e maior controle operacional do processo.

2.2 Biomassa e delineamento experimental

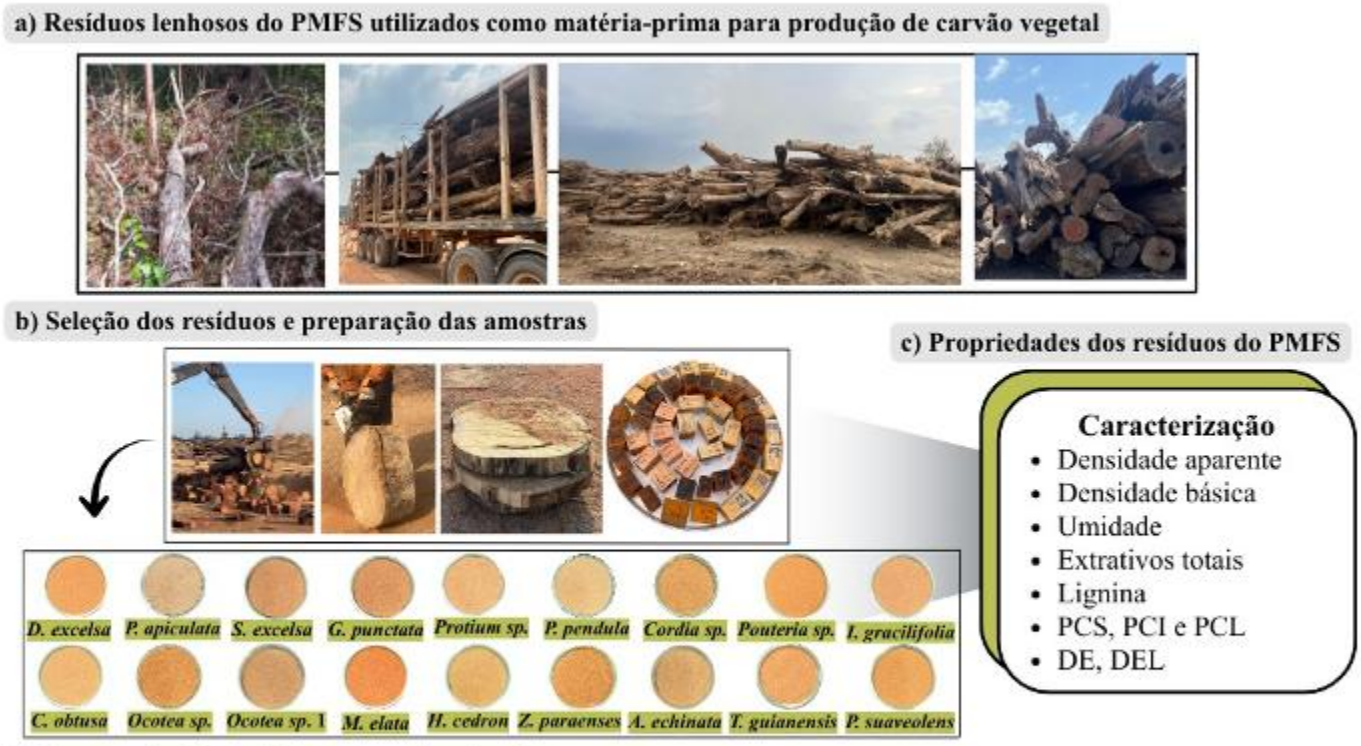


Figura 2 – Framework geral da pesquisa

Foram utilizados resíduos lenhosos provenientes de PMFS, segregados em duas classes de densidade básica (≤0,500 e ≥0,700 g cm^{-3}), sendo avaliados em seis ciclos de carbonização em escala industrial (três por classe).

2.3 Caracterização da biomassa

As propriedades físicas, químicas e energéticas da madeira foram determinadas conforme metodologias normatizadas. A densidade básica, o teor de umidade, os extrativos totais, a lignina total e o poder calorífico superior (PCS) foram determinados conforme as normas ABNT NBR 11941 (ABNT, 2003), ABNT NBR 14929 (ABNT, 2017), ABNT NBR 14853 (ABNT, 2010b), ABNT NBR 7989 (ABNT, 2010a) e ASTM E711-87 (ASTM, 2004), respectivamente. O poder calorífico inferior (PCI), o poder calorífico líquido (PCL) e a densidade energética (DE) foram calculados a partir do PCS, teor de hidrogênio, umidade e densidade básica da madeira.

2.4 Análises estatísticas

Os dados foram inicialmente submetidos à estatística descritiva. Para a caracterização da biomassa, adotou-se o delineamento inteiramente casualizado (DIC), considerando as classes de densidade como fator de variação. Os pressupostos de normalidade dos resíduos e

homogeneidade das variâncias foram verificados pelos testes de Shapiro-Wilk e Bartlett, respectivamente. Posteriormente, os dados foram submetidos à análise de variância (ANOVA) a 5% de significância. Como o experimento envolveu apenas duas classes de densidade, o teste F foi considerado conclusivo para a comparação entre os tratamentos.

3. Resultados e discussão

3.1 Heterogeneidade da biomassa amazônica e estratégia de segregação por densidade

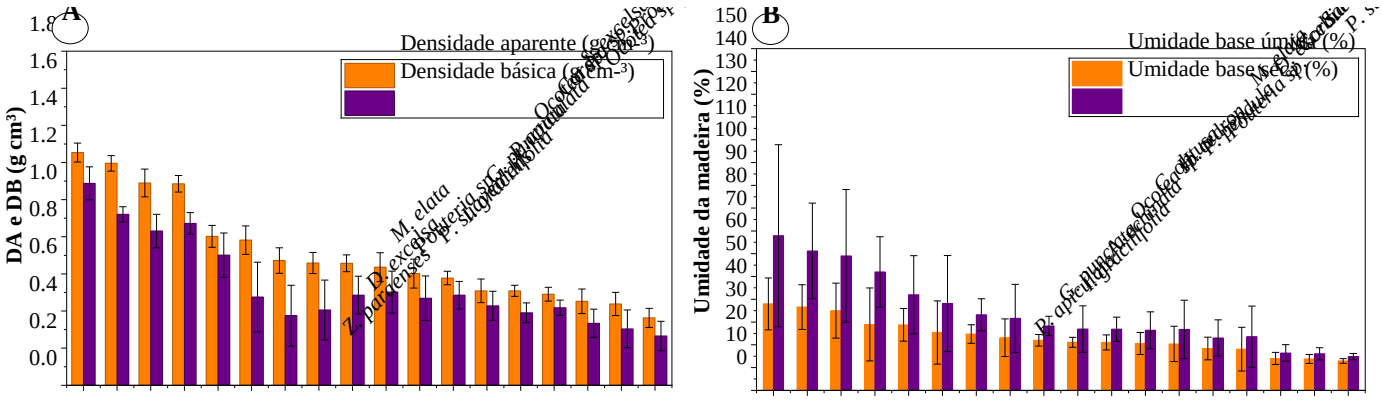


Figura 3 – Propriedades físicas dos resíduos provenientes de Planos de Manejo Florestal Sustentável (PMFS): (A) densidade aparente e densidade básica; (B) umidade base úmida e umidade base seca.

Os resíduos provenientes dos Planos de Manejo Florestal Sustentável apresentaram elevada variabilidade em suas propriedades físicas, refletindo a diversidade de espécies que compõem a floresta amazônica. A densidade básica variou entre 0,266 e 1,088 g cm^{-3}, enquanto diferenças expressivas também foram observadas para densidade aparente e teor de umidade (Figura 3), evidenciando a elevada heterogeneidade da matéria-prima utilizada neste estudo. Esses resultados corroboram observações anteriores de que resíduos provenientes de PMFS apresentam grande variabilidade física em função da diversidade das espécies exploradas na Amazônia (Lima et al., 2020a; Lima et al., 2023; Barros et al., 2023).

A elevada heterogeneidade influencia diretamente a transferência de calor, a secagem e a uniformidade da carbonização (Lima et al., 2020a; Lima et al., 2022; Barros et al., 2023). Diante desse cenário, a segregação prévia dos resíduos em classes de densidade constituiu uma estratégia para reduzir parte da variabilidade natural da biomassa amazônica. Conforme discutido por Lima et al. (2023) e Barros et al. (2023), o agrupamento da matéria-prima de acordo com propriedades semelhantes favorece maior uniformidade, melhora a eficiência dos

processos de carbonização e contribui para a obtenção de carvões vegetais de qualidade mais homogênea. Assim, a elevada amplitude dos valores observados na Figura 3 justifica a adoção da segregação por densidade como etapa fundamental para a utilização tecnológica desses resíduos no sistema fornos-fornalha.

3.2 A composição química confirma o potencial dos resíduos amazônicos para produção de bioenergia

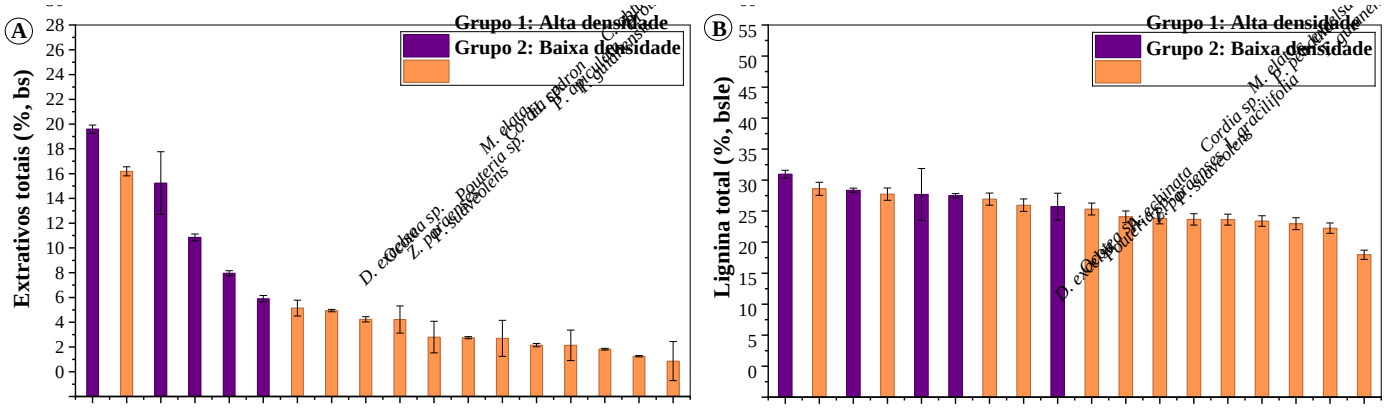


Figura 4 - Composição química dos resíduos provenientes de Planos de Manejo Florestal Sustentável (PMFS): (A) teor de extrativos totais; (B) teor de lignina total.

A composição química da madeira exerce influência direta sobre o comportamento da biomassa durante a carbonização, afetando o rendimento do processo e a qualidade do carvão vegetal produzido. Os resíduos provenientes de PMFS apresentaram ampla variação nos teores de extrativos totais **(**2,86 a 21,60%**)** e lignina total **(**29,31 a 33,24%**)** (Figura 4), comportamento esperado para biomassa oriunda de diferentes espécies tropicais e frequentemente relatado para resíduos amazônicos (Lima et al., 2020a; Lima et al., 2023). Os elevados teores de lignina e extrativos confirmam o potencial energético dos resíduos, uma vez que esses componentes favorecem, respectivamente, a formação de carbono fixo e o aumento do conteúdo energético da madeira (Assis et al., 2016; Lima et al., 2020a; Barros et al., 2023).

Mesmo diante da diversidade das espécies florestais exploradas nos PMFS, os resultados demonstram que a biomassa avaliada apresenta composição química compatível com sua utilização para fins energéticos. Além disso, a segregação dos resíduos por classes de densidade permitiu agrupar materiais com características químicas mais homogêneas, reduzindo parte da variabilidade originalmente presente e fornecendo matéria-prima mais uniforme para alimentação do sistema fornos-fornalha. Essa estratégia é particularmente relevante para tecnologias que dependem de maior estabilidade operacional e controle do

processo de carbonização, como o sistema avaliado neste estudo (Lima et al., 2023; Barros et al., 2023).

3.3 Qualidade energética integrada da biomassa valida sua aplicação no sistema fornos-fornalha

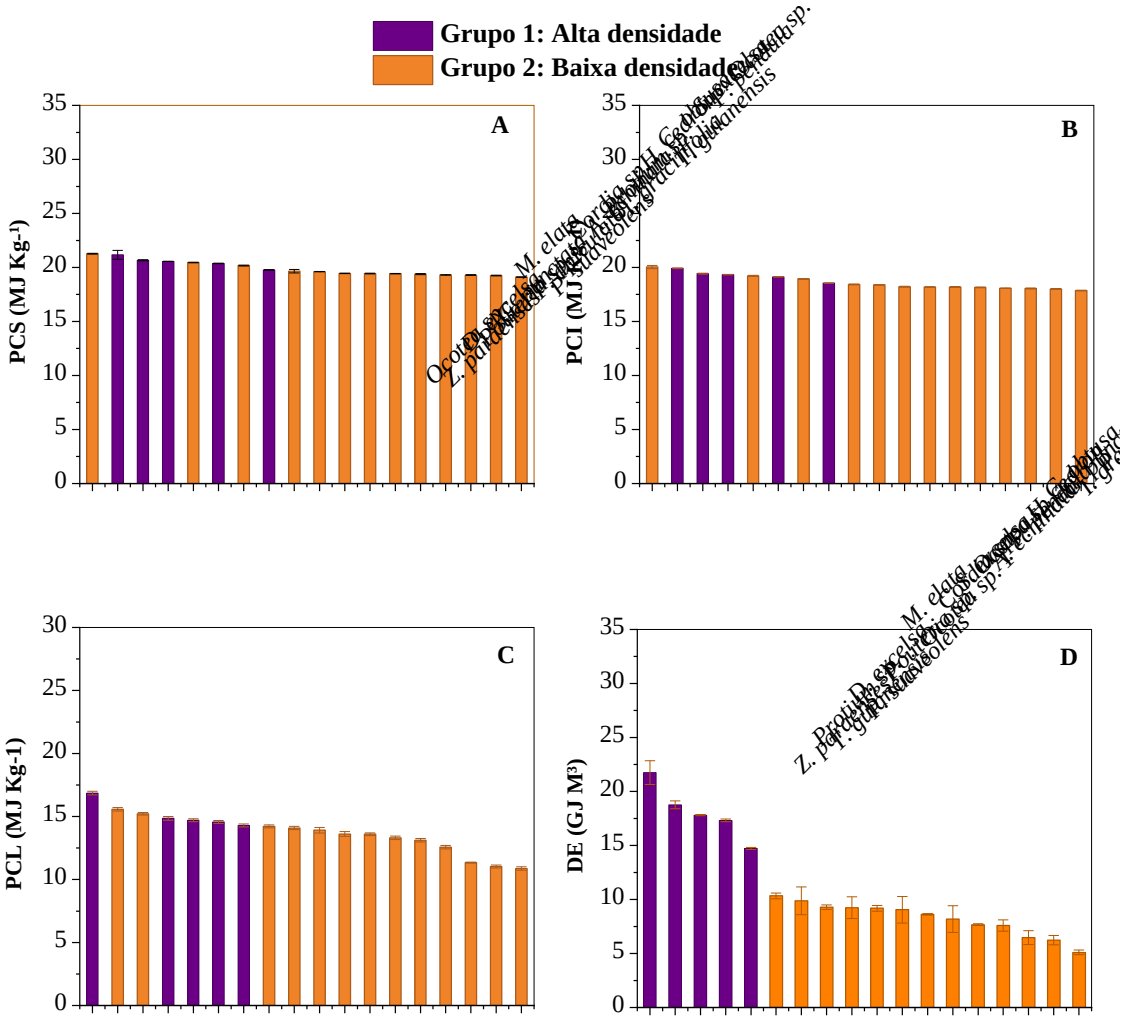


Figura 5 - Propriedades energéticas dos resíduos provenientes de Planos de Manejo Florestal Sustentável (PMFS): (A) Poder Calorífico Superior (PCS); (B) Poder Calorífico Inferior (PCI); (C) Poder Calorífico Líquido (PCL); (D) Densidade Energética (DE).

As propriedades energéticas da biomassa representam um dos principais critérios para seleção de matérias-primas destinadas à produção de carvão vegetal, pois influenciam diretamente a eficiência do processo de carbonização e a qualidade do produto (Protásio et al., 2022; Lima et al., 2020a). Nesse sentido, os resíduos provenientes de PMFS apresentaram elevado potencial energético, com valores de poder calorífico superior (PCS) variando entre

19,1 e 21,2 MJ kg^{-1} (Figura 5), faixa compatível com aquelas reportadas para espécies florestais tropicais utilizadas para fins bioenergéticos (Lima et al., 2023; Barros et al., 2023; Santos et al., 2025). Embora o PCS seja amplamente empregado na caracterização energética da biomassa, sua interpretação isolada pode ser insuficiente para avaliar o desempenho da matéria-prima em escala operacional. Dessa forma, a estimativa do poder calorífico inferior (PCI), do poder calorífico líquido (PCL) e, principalmente, da densidade energética (DE) permite uma avaliação mais representativa da energia efetivamente disponível durante o processo de carbonização.

Observou-se que os resíduos classificados na classe de maior densidade apresentaram os maiores valores de densidade energética, evidenciando maior quantidade de energia armazenada por unidade de volume. Esse comportamento está diretamente relacionado à maior concentração de massa lenhosa em um mesmo volume de madeira, característica considerada altamente desejável em processos industriais de conversão termoquímica (Lima et al., 2020). Sob o ponto de vista operacional, a utilização de biomassa com elevada densidade energética favorece o melhor aproveitamento da capacidade volumétrica dos fornos, reduz a variabilidade energética entre as cargas e contribui para maior estabilidade durante a carbonização. Essas características tornam-se ainda mais relevantes quando se utilizam resíduos provenientes de PMFS, cuja heterogeneidade natural pode comprometer a uniformidade do processo caso não sejam adotadas estratégias de padronização da matéria-prima.

Os resultados obtidos demonstram que, apesar da elevada diversidade das espécies florestais que são exploradas na Amazônia, os resíduos avaliados apresentam qualidade energética compatível com sua utilização em sistemas modernos de carbonização. Assim, a segregação prévia por classes de densidade mostrou-se uma estratégia eficiente para organizar uma matéria-prima naturalmente heterogênea, fornecendo base técnica para sua utilização na primeira avaliação científica da aplicação do sistema fornos-fornalha utilizando resíduos de PMFS na Amazônia**.**

4. Conclusões

A segregação por classes de densidade mostrou-se uma estratégia eficiente para reduzir a heterogeneidade dos resíduos provenientes de Planos de Manejo Florestal Sustentável, fornecendo uma biomassa com qualidade energética para utilização no sistema fornos-fornalha. Este estudo representa a primeira avaliação científica da aplicação dessa tecnologia utilizando biomassa residual na Amazônia, ampliando as perspectivas para o aproveitamento sustentável de resíduos florestais na produção de bioenergia.

5. Agradecimentos

Os autores agradecem ao CNPq (Processos nº 406053/2022-7 e nº 350017/2023-9), à FAPEMIG (APQ-05431-24) e à FAPESPA, pelo financiamento do projeto “Manejo de florestas nativas de importância econômica para a Amazônia” (Programa PDPG CAPES/FAPESPA, Termo de Outorga nº 078/2023). Agradecem ainda ao Grupo Keilla, à Embrapa Amazônia Oriental, à UFLA, à UFRA e à UEMASUL pelo apoio à execução desta pesquisa.

6. Referências bibliográficas

ABNT, A. B. de N. T. NBR 11941: Madeira – determinação da densidade básica. Rio de Janeiro: [*s. d.*], 2003.

ABNT, A. B. de N. T. NBR 14853: Madeira – determinação do material solúvel em etanol-tolueno, em diclorometano e em acetona. Rio de Janeiro: [*s. d.*], 2010b.

ABNT, A. B. de N. T. NBR 14929: Madeira – Determinação do teor de umidade de cavacos: método por secagem em estufa. Rio de Janeiro: [*s. d.*], 2017.

ABNT, A. B. de N. T. NBR 7989: Pasta celulósica e madeira – determinação de lignina insolúvel em ácido. Rio de Janeiro: [*s. d.*], 2010a.

ARAUJO, R. O. *et al.*Renewable Energy from Biomass: an Overview of the Amazon Region. [*S. l.*]: Springer, 2022. https://dx.doi.org/10.1007/s12155-021-10308-x

ASSIS, M. R. *et al.*Factors affecting the mechanics of carbonized wood: literature review. Wood Science and Technology, [*s. l.*], vol. 50, nº 3, p. 519–536, 2016. https://doi.org/10.1007/s00226-016-0812-6

ASTM, I. ASTM E711-87: Standard test method for gross calorific value of refuse-derived fuel by the bomb calorimeter. Philadelphia: [s. d.], 2004.

BARROS, D. de S. *et al.* Does the Segregation of Wood Waste from Amazonia Improve the Quality of Charcoal Produced in Brick Kilns?. Bioenergy Research, [*s. l.*], vol. 16, nº 3, p. 1604–1617, 2023. https://doi.org/10.1007/s12155-022-10551-w

BRASIL. MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. Balanço Energético Nacional: síntese 2025 / ano base 2024. Brasília, DF: [*s. d.*], 2025.

CARNEIRO, A. de C. O. *et al.*Circular Economy in Charcoal Production: Valorization of Residues for Increased Efficiency and Sustainability. Sustainability, [*s. l.*], vol. 17, nº 7, p. 3191, 2025. https://doi.org/ 10.3390/su17073191

DAMÁSIO, R. A. P. *et al.*Perfil Térmico e Controle da Carbonização em Forno Circular por Meio da Temperatura Interna. Revista Ciência da Madeira - RCM, [*s. l.*], vol. 6, nº 1, p. 11–22, 2015. https://doi.org/10.12953/2177-6830/rcm.v6n1p11-22

DIAS JÚNIOR, A. F. *et al.* Thermal profile of wood species from the brazilian semi-arid region submitted to pyrolysis. CERNE, [*s. l.*], vol. 25, nº 1, p. 44–53, 2019. https://doi.org/ 10.1590/01047760201925012602

LIMA, M. D. R. *et al.* Charcoal of logging wastes from sustainable forest management for industrial and domestic uses in the Brazilian Amazonia. BiomassandBioenergy, [*s. l.*], vol. 142, p. 105804, 2020.https://doi.org/ 10.1016/J.BIOMBIOE.2020.105804

LIMA, M. D. R. *et al.* Classifying waste wood from Amazonian species by near-infrared spectroscopy (NIRS) to improve charcoal production. Renewable Energy, [*s. l.*], vol. 193, p. 584–594, 2022. https://doi.org/ 10.1016/J.RENENE.2022.05.048

LIMA, M. D. R. *et al.* Segregating Amazonia logging wastes from sustainable forest management improves carbonization in brick kilns. Renewable Energy, [*s. l.*], vol. 211, p. 772–788, 2023.https://doi.org/ 10.1016/J.RENENE.2023.04.126

OLIVEIRA, A. C. *et al.* Análise de risco econômico de dois sistemas produtivos de carvão vegetal. Floresta e Ambiente, [*s. l.*], vol. 24, 2017. https://doi.org/ 10.1590/2179-8087.026516

PROTÁSIO, T. de P. *et al.* Influence of Extractives Content and Lignin Quality of Eucalyptus Wood in the Mass Balance of Pyrolysis Process. BioEnergy Research, [*s. l.*], vol. 14, nº 1, p. 175–189, 2021.https://doi.org/ 10.1007/s12155-020-10166-z

PROTÁSIO, T. de P. *et al.* Revealing the influence of chemical compounds on the pyrolysis of lignocellulosic wastes from the Amazonian production chains. International Journal of Environmental Science and Technology, [*s. l.*], vol. 19, nº 5, p. 4491–4508, 2022. https://doi.org/ 10.1007/s13762-021-03416-w

SANTOS, P. L. dos *et al.* Exploring the effects of slow pyrolysis temperature and species on the quality of charcoal from Amazonian woody wastes. Renewable Energy, [*s. l.*], vol. 240, p. 122257, 2025.https://doi.org/ 10.1016/J.RENENE.2024.122257

SCHETTINI, B. L. S. *et al.*Furnace-kiln system: How does the use of new technologies in charcoal production affect the carbon balance?. Industrial CropsandProducts, [*s. l.*], vol. 187, p. 115330, 2022.https://doi.org/ 10.1016/J.INDCROP.2022.115330

SILVA, L. F. da*et al.*Kiln-Furnace System: Validation of a Technology for Producing Charcoal with Less Environmental Impact in Brazil. Forests, [*s. l.*], vol. 15, nº 4, 2024. https://doi.org/ 10.3390/f15040645

SOARES, C. R. A. *et al.*Using wood anatomical characteristics and physicochemical properties to segregate Amazonian wood wastes for charcoal production. Acta Amazonica, [*s. l.*], vol. 55, 2025. https://doi.org/ 10.1590/1809-4392202403154

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Qualidade energética do carvão vegetal das biomassas de *Corymbia citriodora*

Natiele Moreira Dias[1]; Júlia Gabriela do Nascimento Mendes[1]; Karolayne Ferreira Saraiva[1]; Thatiele Pereira Eufrazio[1]; Maria Eduarda Pinto dos Santos[1]; Carlos Eduardo Lima Sousa[1]; Bruna Duque Guirardi[1]; Raquel Marchesan[1]

[1] Universidade Federal do Tocantins (UFT), Laboratório de Tecnologia e Utilização de Produtos Florestais (LabTecFlor), Gurupi, Tocantins, Brasil.

Resumo: O estudo analisou a qualidade energética do carvão vegetal produzido a partir da biomassa de *Corymbia citriodora*: fuste, galho e raiz. O material foi coletado em povoamento florestal em Formoso do Araguaia (TO), sendo transformado em cavacos e submetido à pirólise em forno tipo mufla, com temperatura final de 500 °C e taxa de aquecimento de 5 °C/min. Foram realizadas análises das propriedades físico-químicas do carvão vegetal e de seus rendimentos. Os resultados demonstraram que todas as biomassas tem potencial para uso energético, porém o fuste se destacou por reunir maior densidade energética, elevado teor de carbono fixo e superior rendimento em carvão, sendo a biomassa mais promissora para fins energéticos. Galhos e raízes, embora com desempenho menor, mostraram contribuição complementar, reforçando a viabilidade do uso integral da planta. Assim, o estudo evidencia que a espécie pode fornecer carvão de boa qualidade e apoiar estratégias de diversificação e otimização da matriz energética renovável.

Palavras-chave: Carbonização; Pirolise; Rendimento gravimétrico.

Energy Quality of Charcoal from Corymbia citriodora Biomass

Abstract: The study evaluated the energy quality of charcoal produced from different biomass fractions of *Corymbia citriodora*: stem, branch, and root. The material was collected from a forest stand in Formoso do Araguaia (TO), processed into wood chips, and subjected to pyrolysis in a muffle-type furnace at a final temperature of 500 °C and a heating rate of 5 °C/min. Physicochemical properties and charcoal yields were analyzed. Results indicated that all biomass fractions have potential for energy use; however, the stem stood out by presenting higher energy density, greater fixed carbon content, and superior charcoal yield, making it the most promising fraction for energy purposes. Branches and roots, although showing lower performance, contributed in a complementary way, reinforcing the feasibility of using the entire plant. Thus, the study highlights the species capacity to produce high-quality charcoal and to support strategies for diversification and optimization of the renewable energy matrix.

Keywords: Carbonization; Pyrolysis; Gravimetric yield.

1. Introdução

A matriz energética global tem sido historicamente sustentada por combustíveis fósseis convencionais, como carvão mineral, petróleo e gás natural. Essa dependência, entretanto, está

associada a impactos ambientais significativos, sobretudo pela emissão em larga escala de gases de efeito estufa (GEE), como o dióxido de carbono (CO_2) (El-Fawal et al., 2025).

Nesse cenário, a biomassa proveniente de florestas energéticas surge como alternativa estratégica para a bioeconomia, oferecendo potencial para substituir combustíveis fósseis em setores como a siderurgia e as usinas termelétricas, contribuindo para a mitigação das emissões de GEE (Massuque et al., 2023).

O Brasil, líder mundial na produção de carvão vegetal, registrou em 2024 cerca de 6,6 milhões de toneladas, oriundas principalmente de florestas plantadas, consolidando-se como referência no uso desse recurso renovável nos processos industriais de ferro-gusa e aço (IBA, 2025).

Entre as espécies utilizadas, o gênero *Corymbia*, anteriormente classificado como *Eucalyptus*, tem se destacado como alternativa promissora, apresentando elevadas taxas de crescimento e densidade da madeira, características comparáveis às de *Eucalyptus spp.* (Damacena et al., 2021; Loureiro et al., 2021).

No que se refere às rotas de conversão da biomassa, a pirólise se destaca como um processo particularmente eficiente, capaz de gerar simultaneamente produtos de alto valor agregado, como bio-óleo, biocarvão e gases combustíveis, além de favorecer o aproveitamento de resíduos sólidos agrícolas, industriais e urbanos, ampliando benefícios ambientais (El-Fawal et al., 2025).

Apesar do uso consolidado do fuste na produção de carvão vegetal, resíduos como galhos e raízes ainda são pouco explorados, embora representem uma oportunidade para reduzir desperdícios e ampliar o aproveitamento da biomassa. A escassez de estudos sobre suas propriedades energéticas evidencia uma lacuna científica relevante. Diante disso, este trabalho tem como objetivo avaliar a qualidade energética do carvão vegetal produzido a partir das biomassas de fuste, galho e raiz, identificando suas potencialidades e limitações para aplicação no setor energético.

2. Material e métodos

O material utilizado nesta pesquisa foi proveniente de um povoamento florestal de *Corymbia citriodora*, localizado no município de Formoso do Araguaia, estado do Tocantins. As toras foram coletadas aleatoriamente em pilhas submetidas à secagem natural por 90 dias. A partir dessas toras, retiraram-se discos, além da seleção de galhos e raízes provenientes das mesmas pilhas. O preparo das amostras e as análises foram realizados no Laboratório de

Tecnologia e Utilização de Produtos Florestais I da Universidade Federal do Tocantins (UFT), Campus Gurupi. As diferentes biomassas foram convertidas em cavacos, posteriormente empregados na produção de carvão vegetal por meio de pirólise.

A pirólise foi conduzida em forno tipo mufla, com temperatura final de 500 °C e taxa de aquecimento de 5 °C/min, conforme descrito na Tabela 1. O sistema foi pesado antes e após o processo, permitindo a quantificação dos produtos obtidos e a determinação dos respectivos rendimentos.

Tabela 1 - Programa de carbonização da madeira

Temperatura °C							**Taxa de Aquecimento (°C/min)**	**Tempo total**
150	**200**	**250**	**350**	**400**	**450**	**500**		
1h	1h	30min	1h	30min	30min	1h	5	5h 30min

O rendimento gravimétrico total em carvão vegetal é calculado dividindo-se a massa seca do carvão vegetal obtido, pela massa seca da biomassa utilizada no processo de carbonização e multiplicando o resultado por 100, para expressar em percentual. O rendimento em gases condensáveis foi obtido por meio da recuperação desses gases durante a carbonização das biomassas em forno elétrico tipo mufla, utilizando um sistema adaptado de coleta. Dessa forma, foi possível quantificar os rendimentos em gases condensáveis e não condensáveis.

Os gases condensáveis, ao atingirem a temperatura ambiente, se liquefazem, originando o licor pirolenhoso, composto principalmente por ácido acético, ácido fórmico, metanol e alcatrão. O alcatrão insolúvel, mais denso, deposita-se na parte inferior do recipiente. O rendimento em gases condensáveis é calculado dividindo-se a massa do licor pirolenhoso obtido, pela massa da biomassa utilizada na carbonização e multiplicando o resultado por 100, para expressar em percentual. Já o rendimento dos gases não condensáveis é obtido subtraindo de 100 a soma do rendimento gravimétrico total em carvão vegetal e o rendimento em gases condensáveis.

A densidade a granel do carvão vegetal foi determinada utilizando cavacos, calculada pela razão entre a massa dos cavacos e o volume por eles ocupado. Para a análise química imediata, o carvão vegetal produzido foi macerado até a obtenção de partículas finas, posteriormente peneiradas. Foram selecionadas as partículas que atravessaram a malha de 40

mesh e ficaram retidas na de 60 mesh para as análises. As quais seguiram a norma D1762–84 (ASTM, 2013), determinando os teores de materiais voláteis (MV) a 850 °C, cinzas (CZ) a 700 °C por 6 h e, por diferença, o carbono fixo (CF).

O poder calorífico superior (PCS) do carvão vegetal foi estimado conforme a metodologia proposta por Vale et al. (2002). A densidade energética (De) foi calculada segundo Jesus et al. (2017), pela razão entre a densidade a granel e o poder calorífico superior. O estoque de carbono (EC) foi determinado de acordo com Protásio et al. (2013), multiplicando a densidade a granel pelo carbono fixo, dividido por 100.

O experimento foi conduzido em delineamento inteiramente casualizado (DIC). As análises estatísticas foram realizadas nos programas Statgraphics Centurion XVI.I e SISVAR 5.6. Após a análise de variância (ANOVA), aplicou-se o teste de Tukey para comparação das médias ao nível de 5% de probabilidade, nos casos em que houve diferença significativa. O programa Excel 2007® foi utilizado para tabulação dos dados e cálculo do coeficiente de variação (CV%).

3. Resultados e discussão

Na Tabela 2 são apresentados os resultados do rendimento gravimétrico total em carvão vegetal, rendimento em gases condensáveis e não condensáveis, das três biomassas de *Corymbia citriodora* a temperatura final de 500°C.

Tabela 2 - Médias de rendimento da carbonização das biomassas

Rendimento da pirólise	**Fuste**	**Galho**	**Raiz**
RG_{Total} carvão (%)	43,56	37,86	42,60
RGC (licor) (%)	35,57	39,53	37,21
RGNC (%)	20,87	22,61	20,20

Nota: RG_{Total} é o rendimento gravimétrico total em carvão vegetal (%); RGC é rendimento em gases condensáveis (%); RGNC é rendimento em gases não condensáveis.

Ao analisar os rendimentos obtidos no processo de carbonização (Tabela 2), observa-se que o fuste apresentou a maior média de rendimento em carvão vegetal (43,56%), seguido pela raiz (42,60%). Ambos se destacaram não apenas pela elevada produtividade, mas também pelos baixos valores de gases não condensáveis (RGNC), o que indica um processo mais limpo e eficiente. Essa característica é relevante, pois a menor emissão de gases durante a carbonização contribui para reduzir impactos ambientais, reforçando o caráter sustentável da produção.

Em contrapartida, os galhos apresentaram o menor rendimento, com 37,21%. Apesar disso, o valor ainda se mostrou superior ao obtido por Marchesan et al. (2020), que reportaram 30,66% para o carvão vegetal de *Corymbia citriodora* submetido à pirólise a 700 °C. Esse resultado evidencia que, mesmo sendo a fração menos produtiva dentro do presente estudo, os galhos alcançaram rendimento superior ao do fuste reportado por Marchesan, demonstrando seu potencial significativo como matéria-prima para a produção de carvão vegetal.

O processo de carbonização visa maximizar o rendimento em carvão vegetal, já que na maioria dos casos a fumaça não é recuperada. No presente estudo, entretanto, houve a recuperação da fumaça líquida (licor pirolenhoso), correspondente ao RGC. Observou-se que o fuste apresentou menor percentual médio (35,57%), seguido da raiz (37,21%), enquanto os galhos apresentaram maior rendimento em gases condensáveis (39,53%). Esse resultado é vantajoso quando se objetiva a produção de bio-óleo.

Na Tabela 3 é possível observar os valores médios das propriedades físicas, químicas e energéticas do carvão vegetal produzido a partir da biomassa de *Corymbia citriodora.*

Tabela 3 - Resultados das propriedades físicas, químicas e energéticas do carvão

Carvão vegetal de *Corymbia citriodora*					
Parâmetros	**Fuste**	**Galho**	**Raiz**	**CV (%)**	**Pr>Fc**
Dg (g/cm³)	0,23	0,16	0,13	-	-
MV (%)	32,73 a (5,86)	32,48 a (4,47)	31,61 a (2,18)	4,48	ns
CF (%)	67,01 a (2,86)	67,23 a (2,15)	67,75 a (0,93)	2,13	ns
Cz (%)	0,25 b (17,21)	0,28 b (9,85)	0,64 a (15,87)	17,19	*
PCS (Kcal/Kg)	7163,71 a (0,89)	7171,36 a (0,67)	7188,47 a (0,29)	0,66	ns
De (Kcal/cm³)	1636,81 a (0,89)	1184,07 b (0,67)	954,05 c (0,29)	0,77	*
ECF (Kg/m³)	153,11 a (2,86)	111,01 b (2,15)	89,92 c (0,93)	2,47	*

Nota: Médias seguidas pela mesma letra minúscula na linha não diferem estatisticamente (Teste de Tukey – P≥0,05). Dg (g/cm^3) Densidade à granel; MV (%) Materiais voláteis; CF (%) Carbono fixo; CZ (%) Cinzas; PCS (Kcal/kg) Poder calorifico superior; De (Kcal/kg) Densidade energética; ECF (Kg/m3) Estoque de carbono fixo; CV (%): Coeficiente de variação da interação; Valores entre parêntesis representam o coeficiente de variação. *Diferença significativa ao nível de 5% de probabilidade; ns não significativo ao nível de 5% de probabilidade.

Na análise da densidade a granel, o fuste apresentou a maior média (0,23 g/cm³), seguido pelos galhos (0,16 g/cm³) e pela raiz, que obteve o menor valor (0,13 g/cm³). A densidade da biomassa é uma das propriedades mais determinantes para o rendimento em massa e energia do carvão vegetal, pois está diretamente relacionada à densidade energética e ao estoque de

carbono fixo. Em termos práticos, quanto maior a densidade da biomassa, maior será a quantidade de carbono disponível por unidade de volume.

Os valores de materiais voláteis (MV%) e carbono fixo (CF%) não apresentaram diferenças estatisticamente significativas entre as biomassas, o que pode estar associado à temperatura utilizada na pirólise, que promoveu degradação uniforme dos constituintes voláteis. Como consequência, o poder calorífico superior (PCS) também se manteve estável, evidenciando que todas as frações da biomassa possuem potencial energético equivalente.

Em relação ao teor de cinzas, o carvão obtido a partir do fuste e dos galhos apresentou os melhores resultados (0,25% e 0,28%, respectivamente). A raiz apresentou maior teor (0,64%), embora ainda inferior ao valor reportado por Marchesan et al. (2020) para o fuste (0,88%). Esse resultado indica que, mesmo com maior teor de cinzas, a raiz continua promissora. Vale destacar que elevados teores de cinzas podem favorecer o acúmulo de impurezas em peças metálicas solidificadas, alterando propriedades do ferro-gusa (Massuque et al., 2023). Assim, são desejáveis carvões com altos teores de carbono fixo e baixos teores de voláteis e cinzas, pois tendem a queimar mais lentamente, aumentando o tempo de residência no alto-forno e melhorando o consumo específico (Loureiro et al., 2021).

A densidade energética e o estoque de carbono fixo foram os parâmetros que apresentaram diferenças significativas. O carvão do fuste se sobressaiu com 1636,81 kcal/cm³ e 153,11 kg/m³, seguido pelo galho (1184,07 kcal/cm³; 111,01 kg/m³) e pela raiz (954,05 kcal/cm³; 89,9 kg/m³), respectivamente. Esses resultados refletem diretamente a importância da densidade da biomassa nas propriedades avaliadas, sendo que aquelas com maior densidade a granel apresentaram os maiores valores, conforme discutido anteriormente.

4. Conclusões

A carbonização das biomassas de fuste, galho e raiz de *Corymbia citriodora* a 500 °C demonstrou estabilidade nos principais parâmetros de qualidade energética, como matérias voláteis, carbono fixo e poder calorífico superior. Os resultados evidenciam que, embora todas as frações apresentem potencial para uso no setor energético, o fuste se destaca por reunir maior densidade energética, maior estoque de carbono fixo e elevado rendimento em carvão, configurando-se como a biomassa mais promissora. O galho e a raiz, apesar de apresentarem desempenho inferior, contribuem de forma complementar, reforçando a viabilidade do aproveitamento integral da planta para fins energéticos.

5. Agradecimentos

Agradecemos à Universidade Federal do Tocantins (UFT), campus de Gurupi, e ao Laboratório de Tecnologia e Utilizações de Produtos Florestais I, pelo apoio e colaboração.

6. Referências bibliográficas

American Society for Testing and Materials. (2013). D1762-84: Standard test method for chemical analysis of wood charcoal. United States.

Damacena, M., Oliveira, C., Almado, R., Souza, G., Santos, G., Bhering, L., & Assis, T. (2021). Genetic improvement for kino reduction in Corymbia hybrid clones. Boletim Técnico SIF, 1, 1-7.

El-Fawal, E. M., Naggar, A. E. M. A., El-Zahhar, A., Alghandi, M. M., Morshedy, A. S., Sayed, H. E. A., & Mohammed, A. (2025). Biofuel production from waste residuals: comprehensive insights into biomass conversion technologies and engineered biochar applications. RSC Advances, 15, 11942-11974. https://doi.org/10.1039/d5ra00857c

Indústria Brasileira de Árvores – IBÁ. (2025). Relatório 2025. https://iba.org/wp-content/uploads/2025/10/IBA_relatorio_digital_POR.pdf.

Jesus, M. S., Costa, L. J., Ferreira, J. C., Freitas, F. P., Santos, L. C., & Rocha, M. F. V. (2017). Caracterização energética de diferentes espécies de Eucalyptus. Floresta, 47(1), 11-16.

Loureiro, B. A., De Assis, M. R., De Farias Melo, I. C. N., De Oliveira, A. J. F. C., & Trugilho, P. F. (2021). Rendimento gravimétrico da carbonização e caracterização qualitativa do carvão vegetal em clones de híbridos de Corymbia spp para uso industrial. Ciência Florestal, 31, 214-232. https://doi.org/10.5902/1980509836120

Marchesan, R., Oliveira, D., Da Silva, R. C., De Carvalho, L. A., Gomes, R., & Almeida, V. C. (2020). Quality of charcoal from three species of the Eucalyptus and the Corymbia citriodora species planted in the south of Tocantins. Revista Floresta, 50(3), 1643-1652. https://doi.org/10.5380/rf.v50i3.65303

Massuque, J., Lima, M. D. R., Da Silva, P. H. M., De Paula Protásio, T., & Trugilho, P. (2023). Potential of charcoal from non-commercial Corymbia and Eucalyptus wood for use in the steel industry. Renewable Energy. https://doi.org/10.1016/j.renene.2023.04.061

Protásio, P. T., Couto, A. M., Dos Reis, A. A., Trugilho, P. F., & Godinho, T. P. (2013). Potencial siderúrgico e energético do carvão vegetal de clones de Eucalyptus spp. aos 42 meses de idade. Pesquisa Florestal Brasileira, 33(74), 137-149. https://doi.org/10.4336/2013.pfb.33.74.

Vale, A. T., Brasil, M. A. M., & Leão, A. L. (2002). Quantificação e caracterização energética da madeira e casca de espécies do cerrado. Ciência Florestal, 12(1), 71-80.

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Qualidade energética e composição química de carvões vegetais produzidos pelos sistemas convencional e forno-fornalha

Daniele Bernardy[1]; Ana Elisa Souza Iop[1]; Jorge Antonio de Farias[1]; Pietra Tessele[1]

[1] Universidade Federal de Santa Maria

Resumo: O carvão vegetal constitui uma importante fonte de energia renovável, sendo amplamente utilizado nos setores siderúrgico, industrial e doméstico. Entretanto, a qualidade do combustível é influenciada pelas condições de carbonização, tornando necessária a avaliação de tecnologias mais eficientes. Nesse contexto, este trabalho teve como objetivo comparar as características químicas imediatas e o poder calorífico superior de carvões vegetais comerciais produzidos pelos sistemas convencional e forno-fornalha. Foram avaliadas oito amostras, sendo sete produzidas pelo sistema convencional e uma pelo sistema forno-fornalha. As amostras foram homogeneizadas, moídas e submetidas à determinação dos teores de materiais voláteis, cinzas e carbono fixo, além do poder calorífico superior. O carvão produzido pelo sistema forno-fornalha apresentou menor teor de cinzas (0,75%), maior teor de carbono fixo (69,70%) e o maior poder calorífico superior (7.213,92 kcal kg⁻¹), já entre as amostras produzidas pelo sistema convencional, os teores de materiais voláteis variaram de 21,76 a 41,97%, os de cinzas de 0,76 a 15,45% e os de carbono fixo de 43,24 a 68,67%, enquanto o poder calorífico superior variou de 5001,50 a 7149,28 kcal kg⁻¹. Dessa forma, o forno-fornalha demostra maior eficiência do processo de carbonização e melhor qualidade energética. Conclui-se que o sistema forno-fornalha produz carvão vegetal de maior qualidade tecnológica e energética, constituindo uma alternativa promissora para o aumento da eficiência e da sustentabilidade da cadeia produtiva do carvão vegetal.

Palavras-chave: Bioenergia; Carbonização; Carbono fixo

Energy quality and chemical composition of charcoal produced by conventional and kiln-furnace systems

Abstract: Charcoal is an important renewable energy source widely used in the steel, industrial, and domestic sectors. However, fuel quality is influenced by carbonization conditions, making it necessary to evaluate more efficient technologies. In this context, this study aimed to compare the proximate chemical characteristics and higher heating value of commercial charcoal produced using conventional and furnace-kiln systems. Eight samples were evaluated, seven produced using the conventional system and one using the furnace-kiln system. The samples were homogenized, ground, and subjected to determination of volatile matter, ash, and fixed carbon contents, as well as higher heating value. Charcoal produced using the furnace-kiln system presented a lower ash content (0.75%), higher fixed carbon content (69.70%), and the highest higher heating value (7,213.92 kcal kg⁻¹). Among the samples produced using the conventional system, volatile matter content ranged from 21.76 to 41.97%, ash content from 0.76 to 15.45%, and fixed carbon content from 43.24 to 68.67%, while the higher heating value ranged from 5,001.50 to 7,149.28 kcal kg⁻¹. Thus, the furnace-kiln system demonstrated greater carbonization process efficiency and better energy quality. It is concluded that the furnace-kiln

system produces charcoal with higher technological and energy quality, representing a promising alternative for increasing the efficiency and sustainability of the charcoal production chain.

Keywords: Bioenergy; Carbonization; Fixed carbon

1. Introdução

A crescente demanda por fontes de energia renováveis e a necessidade de reduzir as emissões de gases de efeito estufa têm impulsionado o desenvolvimento de tecnologias mais eficientes e ambientalmente sustentáveis para a produção de biocombustíveis sólidos (IPCC, 2022). Nesse contexto, o carvão vegetal destaca-se como uma importante fonte de energia renovável devido à elevada densidade energética, ao alto teor de carbono fixo e à sua ampla utilização nos setores siderúrgico, industrial e doméstico, desempenhando papel estratégico na transição para uma economia de baixo carbono (Rodrigues; Júnior, 2019).

O Brasil ocupa posição de destaque na produção mundial de carvão vegetal, sendo referência na utilização desse biocombustível como agente redutor na siderurgia. Entretanto, grande parte da produção ainda é realizada em fornos convencionais de alvenaria, caracterizados pelo baixo controle operacional, menor rendimento gravimétrico e elevadas emissões de gases provenientes da carbonização da madeira (Silva et al., 2024).

Nos últimos anos, sistemas mais eficientes de carbonização, como o forno-fornalha, vêm sendo desenvolvidos para aumentar o aproveitamento energético da biomassa e reduzir as emissões atmosféricas. Nessa tecnologia, os gases gerados durante a pirólise são direcionados para uma fornalha, onde são queimados de forma controlada, reduzindo significativamente a emissão de metano e outros gases de efeito estufa, além de proporcionar maior eficiência térmica ao processo (Schettini et al., 2022).

A qualidade do carvão vegetal é influenciada tanto pelas características da matéria-prima quanto pelas condições de carbonização. Entre os principais parâmetros utilizados para sua avaliação destacam-se os teores de materiais voláteis, cinzas, carbono fixo e o poder calorífico superior. De modo geral, carvões com maior teor de carbono fixo e menores teores de materiais voláteis e cinzas apresentam melhor desempenho energético, maior estabilidade durante a combustão e maior eficiência como combustível sólido (Safarian, 2023).

Embora os benefícios ambientais dos sistemas de carbonização mais modernos sejam amplamente reconhecidos, ainda são poucos os estudos comparando a qualidade química e energética de carvões vegetais comercializados produzidos por diferentes tecnologias de

carbonização (Rodrigues; Júnior, 2019). Nesse contexto, o presente trabalho teve como objetivo comparar as características químicas imediatas e o poder calorífico superior de carvões vegetais produzidos pelo sistema convencional e pelo sistema forno-fornalha, visando avaliar a influência da tecnologia de carbonização sobre a qualidade energética do combustível.

2. Material e métodos

Foram avaliadas oito amostras comerciais de carvão vegetal destinadas ao consumo doméstico, sendo sete produzidas pelo sistema convencional de carbonização e uma produzida pelo sistema forno-fornalha. As amostras foram adquiridas no comércio do estado do Rio Grande do Sul e encaminhadas ao Laboratório de Química da Madeira (UFSM), onde foram identificadas, homogeneizadas e moídas em moinho tipo Willey para a realização das análises.

A seleção das amostras foi realizada considerando a disponibilidade de carvões comerciais produzidos pelos diferentes sistemas de carbonização na região de estudo. Observou-se predominância de carvão vegetal produzido em fornos convencionais no mercado regional, enquanto a disponibilidade de produtos provenientes do sistema forno-fornalha foi limitada. Dessa forma, foi possível obter sete amostras produzidas pelo sistema convencional e apenas uma amostra produzida pelo sistema forno-fornalha.

Por se tratar de produtos comerciais, não foi possível obter informações detalhadas sobre a matéria-prima utilizada na produção das amostras, incluindo as espécies ou composição da madeira, bem como seu teor de umidade no momento da carbonização. Essa condição foi considerada na interpretação dos resultados, uma vez que as características da matéria-prima também podem influenciar a qualidade química e energética do carvão vegetal.

A composição química imediata foi determinada por meio da quantificação dos teores de materiais voláteis (MV), cinzas (CZ) e carbono fixo (CF), conforme os procedimentos estabelecidos pelas normas da Technical Association of the Pulp and Paper Industry (TAPPI), em triplicatas. O teor de carbono fixo foi obtido por diferença, conforme a Equação (1).

$$[CF = 100 - (MV + CZ)]$$

Em que:

CF = carbono fixo (%);

MV = materiais voláteis (%);

CZ = teor de cinzas (%).

O poder calorífico superior (PCS) foi determinado conforme a ABNT NBR 8633. Para a realização do ensaio, as amostras moídas foram previamente compactadas na forma de briquetes (duplicatas) e submetidas à combustão em bomba calorimétrica, sendo os resultados expressos em kcal kg^{-1}.

3. Resultados e discussão

A composição química imediata e o poder calorífico superior dos carvões vegetais produzidos pelos diferentes sistemas de carbonização é apresentada na Tabela 1. Foram observadas diferenças entre as marcas avaliadas para os teores de materiais voláteis (MV), cinzas (CZ), carbono fixo (CF) e poder calorífico (PCS), evidenciando diferenças na qualidade química e energética das amostras avaliadas, que podem estar relacionadas tanto às condições de carbonização quanto às características da matéria-prima utilizada.

Tabela 1 – Composição química imediata e o poder calorífico superior dos carvões vegetais produzidos pelos diferentes sistemas de carbonização

Amostra	MV(%)	CZ(%)	CF(%)	PCS (kcal kg^{-1})
Conv. 1	29,62 ± 1,47	2,31 ± 1,05	68,07 ± 2,39	7149,28
Conv. 2	21,76 ± 0,40	9,56 ± 2,39	68,67 ± 2,16	6936,34
Conv. 3	36,90 ± 0,70	0,76 ± 0,04	62,33 ± 0,74	6652,87
Conv. 4	41,30 ± 0,75	15,45 ± 3,38	43,24 ± 3,16	5001,50
Conv. 5	41,97 ± 4,32	1,17 ± 0,17	56,86 ± 4,49	6514,02
Conv. 6	37,73 ± 0,84	2,99 ± 0,11	59,27 ± 0,76	6807,30
Conv. 7	32,10 ± 1,23	5,40 ± 0,43	62,50 ± 1,61	6894,59
Forno-fornalha	29,55 ± 0,44	0,75 ± 0,02	69,70 ± 0,46	7213,92

Conv. = Covencional.

Os teores de materiais voláteis variaram entre as amostras avaliadas, sendo observado o menor valor para o carvão produzido pelo sistema forno-fornalha (29,55%). A redução do conteúdo de compostos voláteis pode estar associada a uma maior degradação térmica dos componentes lignocelulósicos durante a carbonização, favorecendo a concentração relativa de carbono na estrutura do carvão. Sistemas com maior controle térmico tendem a promover uma degradação mais completa da hemicelulose e da celulose, resultando em carvões com menor teor de materiais voláteis e maior estabilidade durante a combustão (Cha et al., 2026).

O teor de cinzas também apresentou elevada variação entre as marcas comerciais. Enquanto algumas amostras apresentaram baixos conteúdos minerais, compatíveis com carvões

de boa qualidade, outras exibiram concentrações elevadas de cinzas. Valores elevados são indesejáveis porque representam material incombustível, reduzindo a eficiência energética do combustível e aumentando a formação de resíduos durante a combustão (Demirbas, 2004). Além disso, altos teores de cinzas podem indicar contaminação da matéria-prima por solo, casca ou impurezas incorporadas durante a produção e o armazenamento (Nunes et al., 2016). A elevada variação observada entre as amostras pode estar relacionada tanto às condições de produção quanto às características e ao manuseio das diferentes matérias-primas.

Em relação ao carbono fixo, verificou-se que o carvão produzido pelo sistema forno-fornalha apresentou os maiores valores entre todas as amostras avaliadas. Esse resultado evidencia que o maior controle das condições de carbonização favorece a concentração de carbono na matriz sólida, aumentando a qualidade do combustível (Safarian, 2023). O carbono fixo constitui a fração responsável pela combustão lenta e pela maior liberação de energia, sendo um dos principais indicadores tecnológicos utilizados para avaliar a qualidade do carvão vegetal (Lima et al., 2022). Entretanto, considerando que apenas uma amostra do sistema forno-fornalha foi avaliada e que não foram obtidas informações sobre a matéria-prima utilizada, esse resultado deve ser interpretado como uma tendência, não sendo possível atribuí-lo exclusivamente à tecnologia de carbonização.

Os resultados observados demonstram uma relação inversa entre os teores de materiais voláteis e carbono fixo, comportamento verificado na literatura para carvões vegetais produzidos sob diferentes condições de carbonização. À medida que a temperatura e a eficiência do processo aumentam, ocorre maior degradação térmica dos componentes lignocelulósicos, reduzindo a fração volátil e promovendo o enriquecimento relativo em carbono (Costa, 2019). Esse comportamento explica o desempenho superior do sistema forno-fornalha em relação às amostras produzidas pelo método convencional.

O poder calorífico superior variou de 5001,50 a 7213,92 kcal kg^{-1} entre as amostras avaliadas (Tabela 1), evidenciando diferenças marcantes na qualidade energética dos carvões vegetais analisados. O maior valor foi observado para o carvão produzido pelo sistema forno-fornalha (7213,92 kcal kg^{-1}), enquanto a menor média foi registrada para a amostra Conv. 4 (5001,50 kcal kg^{-1}).

Os resultados obtidos são compatíveis com estudos recentes que avaliaram sistemas de carbonização mais eficientes. Silva et al. (2024) verificaram que o sistema forno-fornalha produz carvões com maior rendimento gravimétrico, maior teor de carbono fixo e melhor qualidade energética em comparação aos fornos convencionais, atribuindo esse desempenho ao

maior controle da temperatura e à queima dos gases gerados durante a carbonização. Também se destaca que a melhoria do processo resulta em menor emissão de gases de efeito estufa, pois ocorre a queima desses gases na fornalha e em um produto final de maior valor energético.

O elevado PCS do carvão produzido pelo sistema forno-fornalha está diretamente relacionado ao seu maior teor de carbono fixo (69,70%) e ao baixo teor de cinzas (0,75%). O carbono fixo representa a fração mais energética do carvão vegetal, enquanto as cinzas correspondem ao material mineral incombustível, reduzindo a energia disponível durante a combustão (Lima et al., 2022; Safarian et al., 2023). Dessa forma, materiais com maior concentração de carbono e menor conteúdo mineral tendem a apresentar maior poder calorífico.

Esse comportamento evidencia que a melhoria do processo de carbonização não apenas reduz as emissões atmosféricas, mas também promove incremento direto na qualidade energética do combustível. O aumento do carbono fixo representa maior concentração de carbono na matriz sólida, favorecendo a combustão prolongada e maior liberação de energia, enquanto a redução do conteúdo mineral diminui a fração incombustível da biomassa e melhora a eficiência energética do carvão vegetal (Olabisi et al., 2023). Estudos também apontam que o sistema forno-fornalha pode contribuir para a redução das emissões atmosféricas pela queima dos gases gerados durante a carbonização, entretanto, esse efeito não foi mensurado no presente estudo.

Verifica-se que a adoção de tecnologias de carbonização mais eficientes pode proporcionar ganhos simultâneos na qualidade energética do carvão vegetal e na padronização do produto, fatores essenciais para aplicações industriais e para a consolidação de uma cadeia produtiva mais sustentável.

4. Conclusões

Os resultados evidenciaram diferenças na qualidade química e energética entre as amostras de carvão vegetal avaliadas. A amostra produzida pelo sistema forno-fornalha apresentou o maior teor de carbono fixo (69,70%), menor teor de cinzas (0,75%) e maior poder calorífico superior (7.213,92 kcal kg^{-1}), indicando características favoráveis ao desempenho energético do combustível.

Observou-se elevada variabilidade entre as marcas produzidas pelo sistema convencional, principalmente quanto aos teores de cinzas e carbono fixo, refletindo diferenças no controle operacional durante a carbonização e, consequentemente, na qualidade do produto. É importante considerar que as marcas utilizadas foram produzidas a partir de diferentes

espécies e não se sabe o teor de umidade da madeira utilizado no momento da produção do carvão, fator esse que também interfere na qualidade do produto.

Os resultados obtidos indicam que a tecnologia forno-fornalha representa uma alternativa promissora para a produção de carvão vegetal de maior qualidade energética, contribuindo simultaneamente para a obtenção de um combustível mais homogêneo, com maior potencial de aproveitamento energético e menor geração de resíduos minerais. Dessa forma, a adoção de tecnologias mais eficientes de carbonização pode favorecer tanto o desempenho energético quanto a sustentabilidade da cadeia produtiva do carvão vegetal.

5. Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

6. Referências bibliográficas

Costa, R. L. (2019). Estudo da decomposição lignocelulósica da biomassa nos processos de pirólise e de gaseificação com vapor de água. (Tese de Doutorado). Universidade Federal de Santa Catarina.

Cha, JS, Park, SH, Jung, SC, Ryu, C., Jeon, JK, Shin, MC, & Park, YK (2016). Produção e utilização de biochar: uma revisão. Journal of Industrial and Engineering Chemistry , 40 , 1-15. 10.1016/j.jiec.2016.06.002

Da Silva, L. F., Arantes, M. D. C., Marcelino, R. A. G., Mendes Castro, A. F. N., Ataíde, G. D. M., Castro, R. V. O., ... & Colen, F. (2024). Kiln-Furnace System: Validation of a Technology for Producing Charcoal with Less Environmental Impact in Brazil. Forests, 15(4), 645. https://doi.org/10.3390/f15040645.

Demirbas, A. (2004). Características de combustão de diferentes combustíveis de biomassa. Progresso em energia e ciência da combustão, 30 (2), 219-230. 10.1016/j.pecs.2003.10.004.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2022.

Lima, M. D. R., Massuque, J., Bufalino, L., Trugilho, P. F., Ramalho, F. M. G., de Paula Protásio, T., & Hein, P. R. G. (2022). Clarifying the carbonization temperature effects on the production and apparent density of charcoal derived from Amazonia wood wastes.

Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 166, 105636. https://doi.org/10.1016/j.jaap.2022.105636.

Nunes, L. J. R., Matias, J. C. O., & Catalão, J. P. S. (2016). Biomass combustion systems: A review on the physical and chemical properties of the ashes. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 53, 235-242. https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.08.053.

Olabisi, A. S., Balogun, A. O., Oni, T. O., Fakinle, B. S., Sotoudehnia, F., McDonald, A. G., & Ikubanni, P. P. (2023). Physicochemical characterization of woody lignocellulosic biomass and charcoal for bio-energy heat generation. Scientific Reports, 13(1), 19242. https://doi.org/10.1038/s41598-023-46054-7.

Rodrigues, T., & Junior, AB (2019). Carvão vegetal: Uma discussão sobre fornos de carbonização. Journal of analytical and applied pyrolysis, 143, 104670. https://doi.org/10.1016/j.jaap.2019.104670.

Safarian, S. (2023). Performance analysis of sustainable technologies for biochar production: A comprehensive review. Energy Reports, 9, 4574-4593. https://doi.org/10.1016/j.egyr.2023.03.111.

Schettini, B. L. S., Jacovine, L. A. G., Torres, C. M. M. E., Carneiro, A. D. C. O., Villanova, P. H., da Rocha, S. J. S. S., ... & Castro, R. V. O. (2022). Furnace-kiln system: How does the use of new technologies in charcoal production affect the carbon balance?. Industrial Crops and Products, 187, 115330. 10.1016/j.indcrop.2022.115330.

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Resíduos da exploração comercial do palmito da guerobeira (*Syagrus oleracea* (Mart.) Becc) para geração de bioenergia

Murillo Rodrigues Chaves[1]; Pedro Augusto Fonseca Lima[1]; Mariana Dianese Alves de Moraes[1]; Anna Clara Chaves Ribeiro[1]; Emilly Amabilly Rocha Borges[1]; Carlos de Melo e Silva Neto[1]; Macksuel Fernandes da Silva[1]; Carlos Roberto Sette Júnior[1]

[1] Universidade Federal de Goiás, Departamento de Engenharia Florestal.

Resumo: A busca por fontes renováveis tem ampliado o interesse por biomassas residuais. Este trabalho avaliou o potencial energético de resíduos da Guerobeira (*Syagrus oleracea* (Mart.) Becc.), palmeira nativa do Cerrado utilizada para extração de palmito. Resíduos coletados em Goiânia e Senador Canedo (GO) foram divididos em folhas (T1), estipe (T2), demais resíduos (T3) e mistura dos componentes (T4), com três repetições. Avaliaram-se granulometria, umidade, densidade a granel, poder calorífico superior e inferior e densidade energética. Predominaram partículas retidas em 20 mesh. A densidade variou de 119,39 a 172,75 kg m^{-3}, a umidade de 4,05 a 9,73% e a densidade energética de 1657 a 2763 MJ m^{-3}, com diferenças significativas entre tratamentos. Os resíduos apresentaram potencial bioenergético, podendo reduzir desperdícios e gerar renda aos produtores.

Palavras-chave: Biomassa residual; energia renovável; Cerrado.

Residues from the commercial harvesting of gueroba palm heart (Syagrus oleracea (Mart.) Becc.) for bioenergy generation

Abstract: The search for renewable energy sources has increased interest in residual biomass. This study evaluated the energy potential of residues from Guerobeira (*Syagrus oleracea* (Mart.) Becc.), a palm species native to the Cerrado and used for heart-of-palm production. Residues collected in Goiânia and Senador Canedo, Goiás, Brazil, were divided into leaves (T1), stem (T2), other residues (T3), and a mixture of the components (T4), with three replicates. Particle size distribution, moisture content, bulk density, higher and lower heating values, and energy density were evaluated. Particles retained on the 20 mesh sieve predominated. Bulk density ranged from 119.39 to 172.75 kg m^{-3}, moisture content from 4.05 to 9.73%, and energy density from 1657 to 2763 MJ m^{-3}, with significant differences among treatments. The residues showed bioenergy potential and may contribute to reducing waste and generating additional income for producers.

Keywords: Residual biomass; Renewable energy; Cerrado.

1. Introdução

A busca por fontes renováveis de energia tem se intensificado diante da necessidade de diversificação da matriz energética e da redução da dependência de fontes fósseis, caracterizadas por sua disponibilidade limitada e pelos impactos ambientais associados à sua utilização. Nesse contexto, a biomassa vegetal apresenta-se como uma alternativa para a

produção de bioenergia, podendo ser convertida em diferentes formas de energia útil, como calor, eletricidade e força motriz (Faria et al., 2016; MME, 2015).

As possibilidades de aproveitamento energético da biomassa dependem, entretanto, de sua origem e de suas características. Diferentes materiais vegetais apresentam propriedades químicas, físicas e energéticas distintas, que interferem diretamente nas formas de conversão e na eficiência de seu aproveitamento. Dessa maneira, a avaliação e a caracterização de diferentes fontes de biomassa são necessárias para identificar materiais com potencial de utilização energética e ampliar as possibilidades de inserção de fontes renováveis na matriz energética (EPE, 2021).

Entre as fontes de biomassa com possibilidade de aproveitamento energético estão os resíduos gerados por atividades agrícolas, florestais e agroextrativistas. Embora parte desses materiais possa contribuir para processos ecológicos, como a ciclagem de nutrientes e a manutenção da matéria orgânica no solo, a geração de grandes volumes de resíduos e seu acúmulo sem destinação adequada podem representar um problema ambiental e econômico. Ao mesmo tempo, esses materiais apresentam potencial para utilização como matéria-prima na produção de bioenergia (Thiffault et al., 2014; Mendonça et al., 2021).

O aproveitamento energético de resíduos apresenta ainda a vantagem de utilizar materiais já gerados por outras atividades produtivas, reduzindo a necessidade de implantação de cultivos destinados exclusivamente à produção energética. Dessa forma, biomassas residuais podem representar uma alternativa de menor custo de aquisição da matéria-prima e possibilitar o aproveitamento de materiais que, de outra maneira, permaneceriam sem utilização ou seriam descartados (Santos et al., 2017).

No Cerrado, diversas espécies vegetais são utilizadas por comunidades e produtores locais para fins alimentícios, medicinais e econômicos. Entre essas espécies encontra-se a Guerobeira, palmeira nativa de importância regional, utilizada principalmente para a extração do palmito. Nesse processo, apenas uma pequena parte da planta é destinada ao consumo e à comercialização, enquanto grande quantidade de biomassa permanece como resíduo após a colheita.

A geração dessa biomassa residual indica uma possibilidade de aproveitamento que ainda necessita de avaliação quanto às suas características energéticas. Para determinar o potencial de utilização de um resíduo vegetal como fonte de bioenergia, é necessário conhecer as propriedades das diferentes partes que compõem o material, uma vez que componentes como madeira, casca e copa podem apresentar características distintas (Sette Júnior et al., 2020).

Ainda de acordo com esses autores, essas propriedades influenciam as possibilidades de utilização da biomassa, seja na forma de lenha, carvão vegetal ou produtos densificados, entre outras formas de conversão energética.

Nesse contexto, a caracterização dos resíduos gerados pela colheita do palmito da guerobeira pode fornecer informações sobre suas possibilidades de aproveitamento energético e contribuir para a destinação de uma biomassa ainda pouco utilizada. Assim, este trabalho teve como objetivo avaliar o potencial energético da biomassa residual proveniente da colheita do palmito da Guerobeira.

2. Material e métodos

O estudo foi realizado no Laboratório de Qualidade da Madeira e Bioenergia (LQMBio) da Universidade Federal de Goiás (UFG). Foram utilizados resíduos provenientes da colheita de Guerobeira (*Syagrus oleracea* (Mart.) Becc.) cultivadas nos municípios de Goiânia e Senador Canedo, estado de Goiás. A biomassa foi separada em quatro tratamentos: folhas (T1), estipe (T2), demais resíduos da colheita, correspondentes às partes não classificadas como folha ou estipe (T3) e mistura dos três componentes em proporções iguais, com 33% de cada tratamento (T4). Foram utilizadas três repetições por tratamento.

As biomassas foram caracterizadas quanto à distribuição granulométrica, teor de umidade, densidade a granel, poder calorífico superior (PCS), poder calorífico inferior (PCI) e densidade energética a granel. A distribuição granulométrica foi determinada conforme a ISO 17827-1 (2016), por meio de peneiramento oscilatório. As amostras, previamente secas e homogeneizadas, foram submetidas a um conjunto de peneiras de 20, 40, 60 e 100 mesh, dispostas em ordem decrescente de abertura. O peneiramento foi realizado durante 5 min, a uma frequência de 80 batidas intermitentes por minuto. Ao final, o material retido em cada peneira foi pesado, e a distribuição granulométrica foi expressa como porcentagem da massa retida em cada fração em relação à massa total da amostra. O teor de umidade foi determinado conforme a ISO 18134-1 (2022), pelo método de secagem em estufa e a densidade a granel segundo a ISO 17828 (2015), pela relação entre a massa da biomassa e o volume conhecido do recipiente.

O PCS foi determinado em calorímetro IKA WORKS C-200, conforme a ISO 18125 (2017). O Poder Calorífico Inferior (PCI, $MJ \cdot kg^{-1}$) foi calculado de acordo com a Equação 1, conforme a teoria do poder calorífico líquido (*Net Calorific Value*) proposta por Van Loo e Koppejan (2002), considerando o teor de umidade e o teor de hidrogênio da biomassa.

$$PCI = PCS\left(1 - \frac{u}{100}\right) - 2{,}447\frac{u}{100} - 2{,}447 \times 9{,}01 \times \frac{H}{100}\left(1 - \frac{u}{100}\right) \quad \text{Equação 1}$$

Em que:

PCI = poder calorífico inferior (MJ·kg⁻¹, base úmida);

PCS = poder calorífico superior (MJ·kg⁻¹, base seca);

u = teor de umidade da biomassa (% base úmida);

H = teor de hidrogênio da biomassa (% base seca);

2,447 MJ·kg⁻¹ = calor latente de vaporização da água a 25 °C;

9,01 = fator estequiométrico correspondente à massa de água formada pela combustão do hidrogênio.

3. Resultados e discussão

A distribuição granulométrica apresentou comportamento semelhante entre os tratamentos, com predominância de partículas retidas na peneira de 20 mesh (Figura 1). Essa fração representou aproximadamente 66% no T1, 86% no T2, 83% no T3 e 78% no T4, enquanto as frações retidas nas peneiras de 40, 60 e 100 mesh ocorreram em menores proporções. Os resultados indicam maior concentração da biomassa nas frações de maior granulometria, sobretudo nos tratamentos T2 e T3, evidenciando relativa homogeneidade do material após o processamento.

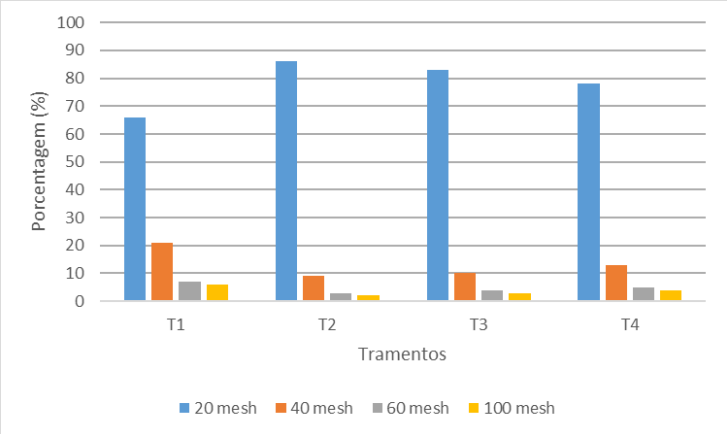


Figura 1. Distribuição granulométrica da biomassa residual de Guerobeira nos diferentes tratamentos: T1: folhas, T2: estipe, T3: demais resíduos da colheita, correspondentes às partes

não classificadas como folha ou estipe e T4: mistura dos três componentes em proporções iguais, com 33% de cada tratamento.

As características físicas da biomassa residual da Guerobeira variaram entre os tratamentos quanto à densidade a granel e ao teor de umidade (Tabela 1).

Tabela 1. Densidade a granel e umidade da biomassa residual de Guerobeira

Tratamentos	**Densidade a granel (kg m³)**	**Umidade (%)**
T1	172,75 a	4,05 a
T2	119,39 b	9,11 b
T3	122,63 b	9,73 b
T4	138,1 b	7,62 ab

A densidade a granel variou de 119,39 a 172,75 kg m^{-3}, com maior valor para o estipe (T1), que diferiu estatisticamente dos demais tratamentos. As folhas (T2), os resíduos (T3) e a mistura (T4) não diferiram entre si. A maior densidade a granel do estipe indica maior quantidade de biomassa por unidade de volume, característica relevante para o armazenamento e transporte do material e para sua utilização em processos de conversão energética.

O teor de umidade variou entre 4,05 e 9,73%. O estipe apresentou o menor valor, enquanto folhas e resíduos apresentaram os maiores teores, e a mistura apresentou comportamento intermediário. A umidade é uma característica importante para o aproveitamento energético da biomassa, uma vez que parte da energia liberada durante a combustão é utilizada para a evaporação da água presente no material (Sette Júnior et al., 2020). Nesse sentido, os baixos teores de umidade observados nos tratamentos representam uma condição favorável ao aproveitamento energético dos resíduos.

As propriedades energéticas dos tratamentos foram avaliadas a partir do Poder Calorífico Superior, do Poder Calorífico Inferior e da densidade energética a granel (Tabela 2).

Tabela 2. Propriedades energéticas da biomassa residual de Guerobeira

Tratamentos	PCSuperior (MJ kg^{-1})	PCInferior (MJ kg^{-1})	Densidade energética (MJ m^3)
T1	18,12 b	16,02 a	2763,93 a
T2	19,00 a	15,84 a	1891,72 bc
T3	16,56 c	13,52 b	1657,61 c

T4	18,00 b	15,22 a	2101,72 b

O PCS apresentou diferenças significativas entre os tratamentos. O T2 apresentou o maior valor, de 19,00 MJ kg^{-1}, seguido pelos tratamentos T1 e T4, com 18,12 e 18,00 MJ kg^{-1}, respectivamente, que não diferiram estatisticamente entre si. O T3 apresentou o menor PCS, de 16,56 MJ kg^{-1}. Para o PCI, o T3 também apresentou o menor valor, de 13,52 MJ kg^{-1}, diferindo dos demais tratamentos, cujos valores variaram entre 15,22 e 16,02 MJ kg^{-1}. Essas diferenças demonstram que a origem e a composição dos resíduos influenciam suas propriedades energéticas, uma vez que materiais lignocelulósicos distintos podem apresentar variações em sua composição química e, consequentemente, em seu poder calorífico (Vassilev et al., 2010).

A densidade energética a granel variou de 1.657,61 a 2.763,93 MJ m^{-3}, com maior valor para o T1 e menor para o T3. O T1 diferiu estatisticamente de T2, T3 e T4, enquanto o T4 apresentou valor intermediário. Embora o T2 tenha apresentado o maior PCS, o maior valor de densidade energética foi observado no T1, evidenciando que o potencial energético por unidade de volume não depende apenas do poder calorífico, mas também da quantidade de biomassa armazenada em determinado volume. Dessa forma, a avaliação conjunta das propriedades físicas e energéticas é necessária para determinar o potencial de aproveitamento dos diferentes resíduos.

De modo geral, os resultados demonstram que os componentes da biomassa residual da Guerobeira apresentam comportamentos energéticos distintos. O T3 apresentou os menores valores de PCS, PCI e densidade energética, enquanto T1, T2 e T4 apresentaram desempenho superior em diferentes propriedades. A mistura dos componentes (T4) apresentou valores intermediários de PCS, PCI e densidade energética, indicando que o aproveitamento conjunto dos resíduos pode constituir uma alternativa para utilização da biomassa gerada após a colheita do palmito, sem a necessidade de separação de todos os componentes.

4. Conclusões

Os resíduos provenientes da Guerobeira apresentaram características físicas e energéticas que indicam possibilidade de aproveitamento para geração de bioenergia. Os tratamentos diferiram quanto à densidade a granel, teor de umidade, PCS, PCI e densidade energética a granel, evidenciando que os diferentes componentes da biomassa residual apresentam comportamentos distintos. A mistura dos diferentes componentes apresentou valores intermediários para as propriedades energéticas avaliadas, indicando a possibilidade de

aproveitamento conjunto da biomassa residual gerada após a extração do palmito. Dessa forma, os resíduos da Guerobeira constituem uma alternativa potencial de biomassa para fins energéticos.

5. Referências bibliográficas

Empresa de Pesquisa Energética - EPE. (2021). Balanço Energético Nacional. Empresa de Pesquisa Energética. https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco- energetico-nacional-2021

Faria, W. S., Protásio, T. P.; Truguilho, P. F., Pereira, B. L. C.; Carneiro, A. C. O., Andrade, C. R. & Guimarães Júnior, J. B. (2016). Transformação dos resíduos lignocelulósicos da cafeicultura em pellets para geração de energia térmica. Coffee Science, 11(1). http://www.sbicafe.ufv.br/handle/123456789/8184

International Organization for Standardization – ISO (2015). ISO 17828: Solid biofuels - Determination of bulk density. International Organization for Standardization.

International Organization for Standardization – ISO (2016). ISO 17827-1: Solid biofuels - Determination of particle size distribution for uncompressed fuels — Part 1: Oscillating screen method using sieve apertures of 3,15 mm and above. International Organization for Standardization.

International Organization for Standardization – ISO (2017). ISO 18125: Solid biofuels - Determination of calorific value.

International Organization for Standardization – ISO (2022). ISO 18134-1: Solid biofuels - Determination of moisture content - Oven dry method - Part 1: Reference method. International Organization for Standardization.

Mendonça, C., Oliveira, J. P. J., Hiranobe, C. T., Santos, R. J. & Paim, L. L. (2021). Resíduos sólidos urbanos de poda de gramíneas como fonte alternativa de energia: um estudo de caso na

cidade de Rosana. Research, Society and Development, 10(13). http://dx.doi.org/10.33448/rsd-v10i13.20803

Ministério de Minas e Energia - MME. (2015). Balanço Energético Nacional 2015: Ano base 2014. Empresa de Pesquisa Energética.

Santos, G. H. F., Nascimento, R. S. & Alves, G. M. (2017). Biomassa como energia renovável no Brasil. Uningá Review, 29(2). https://revista.uninga.br/uningareviews/article/view/1966

Sette Júnior, C. R., Moraes, M. D. A., Coneglian, A., Ribeiro, R. M., Hansted, A. L. S. & Yamaji, F. M. (2020). Forest harvest byproducts: Use of waste as energy. Waste Management, 114(2020). https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.07.001.

Spanhol, E. E. S., Andrade, R. V., & Castro, J. A. A. (2015). Biomassa para energia: fundamentos e aplicações. Edgard Blücher.

Thiffault, E., Béchard, A., Paré, D. & Allen, D. (2014) Recovery rate of harvest residues for bioenergy in boreal and temperate forests: A review. WIREs Energy and Environment, 4(5). https://doi.org/10.1002/wene.157

Vassilev, S. V., Baxter, D., Andersen, L. K., & Vassileva, C. G. (2010). An overview of the chemical composition of biomass. Fuel, 89(5). https://doi.org/10.1016/j.fuel.2009.10.022

Van Loo, S., & Koppejan, J. (2002). The handbook of biomass combustion and co-firing. Twente University Press.

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Resíduos florestais da floresta de Miombo como matéria-prima para produção de carvão vegetal

Merlindo Jacinto Manjate[1,2]; Fabíola Martins Delatorre[1]; Jonas Zefanias Massuque[2]; Tayná Rebonato Oliveira[1]; Paulo Renato Souza de Oliveira[1]; Gabriela Fontes Mayrinck Cupertino[3]; Fernanda Aparecida Nazário de Carvalho[4]; Ananias Francisco Dias Júnior[1]

[1] Universidade Federal do Espírito Santo (UFES), Departamento de Ciências Florestais e da Madeira. CEP 29550-000, Jerônimo Monteiro, ES, Brasil.
[2] Universidade Lúrio (UniLúrio), Faculdade de Ciências Agrárias, CEP 3300, Campus Unango, Distrito de Sanga, Niassa, Moçambique.
[3] Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA), Divisão de Engenharia de Energia, CEP: 60415-513 – Fortaleza, CE – Brasil.
[4] Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo - USP, Avenida Pádua Dias, 11, Bairro Agronomia, CEP 13418-900, Piracicaba, SP.

Resumo: O aproveitamento de resíduos madeireiros para a produção de carvão vegetal representa uma alternativa para a valorização da biomassa residual e para o uso sustentável dos recursos florestais. Este estudo teve como objetivo avaliar a qualidade do carvão vegetal produzido a partir de resíduos madeireiros de *Brachystegia spiciformis Benth*., espécie nativa da floresta de Miombo, uma formação florestal tropical predominante na África Central e Austral, por meio da determinação do rendimento gravimétrico e da caracterização de suas propriedades físico-químicas e energéticas. Os resíduos foram submetidos ao processo de pirólise em forno mufla, com temperatura final de 450 °C, taxa de aquecimento de 5 °C min^{-1} e tempo de residência de 60 minutos. Foram avaliados os teores de umidade, materiais voláteis, carbono fixo, cinzas e poder calorífico superior do carvão produzido. O carvão vegetal apresentou 4,63% de umidade, 19,96% de materiais voláteis, 75,42% de carbono fixo, 4,62% de cinzas e poder calorífico superior de 29,83 MJ kg^{-1}. Esses resultados evidenciam a elevada qualidade energética do carvão produzido, atendendo aos requisitos para carvão vegetal destinado ao uso doméstico. Conclui-se que a conversão de resíduos madeireiros da floresta de Miombo em carvão vegetal constitui uma alternativa tecnicamente viável para o aproveitamento eficiente da biomassa residual, agregando valor aos resíduos contribuindo para a gestão sustentável dos recursos florestais.

Palavras-chave: Bioenergia; Carbonização; Sustentabilidade florestal

Miombo woodland forest residues as feedstock for charcoal production

Abstract: The utilization of wood residues for charcoal production represents an alternative for the valorization of residual biomass and the sustainable use of forest resources. This study aimed to evaluate the quality of charcoal produced from wood residues of *Brachystegia spiciformis* Benth., a native species of the Miombo woodland, a tropical forest formation predominant in Central and Southern Africa, through the determination of gravimetric yield and the characterization of its physicochemical and energetic properties. The residues were subjected to pyrolysis in a muffle furnace at a final temperature of 450 °C, with a heating rate of 5 °C min^{-1} and a residence time of 60 minutes. The moisture content, volatile matter, fixed carbon, ash content, and higher heating value of the produced charcoal were evaluated. The charcoal presented 4.63% moisture, 19.96% volatile matter, 75.42% fixed carbon, 4.62% ash,

and a higher heating value of 29.83 MJ kg^{-1}. These results demonstrate the high energy quality of the produced charcoal, meeting the requirements for charcoal intended for domestic use. It is concluded that the conversion of Miombo woodland wood residues into charcoal represents a technically feasible alternative for the efficient utilization of residual biomass, adding value to these materials and contributing to the sustainable management of forest resources.

Keywords: Bioenergy; Carbonization; Forest sustainability

1. Introdução

A biomassa florestal desempenha papel estratégico na transição para sistemas energéticos mais sustentáveis, contribuindo para a redução da dependência de combustíveis fósseis, a diversificação da matriz energética e o fortalecimento da segurança energética. Esse potencial torna-se ainda mais relevante diante da crescente demanda por fontes de energia de baixo impacto ambiental e dos desafios impostos pela atual crise energética (Kożuch et al., 2023). Entre os produtos energéticos derivados da biomassa, o carvão vegetal destaca-se pela ampla utilização, especialmente em países em desenvolvimento, onde representa uma das principais fontes de energia para uso doméstico (Tazebew et al., 2023).

O crescimento populacional, a rápida urbanização e o acesso limitado a fontes modernas de energia têm impulsionado continuamente a demanda por esse combustível (Smith et al., 2019). Na África Subsaariana, o carvão vegetal desempenha papel fundamental para milhões de pessoas, sendo amplamente utilizado para a cocção de alimentos e outras atividades domésticas (Tazebew et al., 2023).

Nessas aplicações, a qualidade do carvão vegetal exerce influência direta sobre o desempenho energético, a facilidade de ignição, o tempo de combustão, a emissão de fumaça e a geração de resíduos, características que impactam tanto a eficiência do combustível quanto o conforto e a segurança dos usuários. Entretanto, quando realizada sem práticas adequadas de manejo florestal, a produção de carvão vegetal está associada ao desmatamento, à degradação das florestas e à perda de biodiversidade (Smith et al., 2019).

Nesse contexto, as florestas de Miombo, uma formação de savana arbórea predominante na África Central e Austral., representam uma importante fonte de recursos florestais, fornecendo madeira para diferentes finalidades, incluindo a produção de carvão vegetal (Massuque et al., 2020). As atividades de exploração e processamento da madeira no ecossistema de Miombo geram quantidades consideráveis de resíduos madeireiros, que frequentemente permanecem sem aproveitamento (Nanvonamuquitxo et al., 2017). A utilização

desses resíduos para a produção de carvão vegetal representa uma alternativa para agregar valor à biomassa, reduzir desperdícios e contribuir para o uso mais sustentável dos recursos florestais.

A qualidade do carvão vegetal depende das características da matéria-prima e das condições de carbonização, sendo normalmente avaliada por parâmetros como rendimento gravimétrico, teor de umidade, materiais voláteis, teor de cinzas, carbono fixo, densidade e poder calorífico (Reis et al., 2022). Esses parâmetros são amplamente utilizados para verificar a conformidade do carvão vegetal com padrões internacionais de qualidade, como os estabelecidos pela norma europeia EN 1860-2, destinada ao carvão vegetal para uso doméstico.

Embora diferentes espécies florestais tenham sido estudadas para esse fim em Moçambique (Massuque et al., 2023), ainda são escassos os estudos sobre a qualidade do carvão vegetal produzido a partir de resíduos madeireiros de espécies da formação florestal de Miombo, especialmente de *Brachystegia spiciformis* Benth. Nesse contexto, o aproveitamento energético desses resíduos está alinhado aos princípios da economia circular, promovendo maior eficiência no uso da biomassa residual, agregação de valor aos resíduos lignocelulósicos e redução dos impactos ambientais associados ao seu descarte.

Diante desse cenário, a hipótese deste estudo é que a pirólise de resíduos madeireiros provenientes da savana arbórea do Miombo, produz um carvão vegetal apto para fins de cocção de alimentos, por meio da redução de compostos voláteis, concentração de carbono e incremento de energia disponível.

Assim, este estudo teve como objetivo avaliar a qualidade do carvão vegetal produzido a partir desses resíduos, por meio da determinação do rendimento gravimétrico e da caracterização de suas propriedades físico-químicas e energéticas, bem como verificar sua conformidade com os requisitos de qualidade estabelecidos pela norma europeia EN 1860-2 para carvão vegetal destinado ao uso doméstico. Espera-se que os resultados deste estudo forneçam subsídios para estratégias de valorização energética de resíduos madeireiros da formação florestal de Savana de Miombo, contribuindo para o aproveitamento sustentável da biomassa residual e para o desenvolvimento de sistemas de bioenergia na África Austral.

2. Material e métodos

Os resíduos madeireiros de *Brachystegia spiciformis*, espécie nativa da Savana de Miombo, foram coletados no distrito de Sanga, norte de Moçambique nas coordenadas 35°25′14,06″. Este e 12°52′34,84″ Sul (Figura 1). O material foi proveniente de resíduos lenhosos da exploração florestal para produção de carvão vegetal. A espécie foi selecionada

devido ao seu elevado índice de importância na área de estudo (Manjate & Massuque, 2019). Foram selecionados resíduos de madeira com diâmetro entre 15 e 20 cm, os quais foram seccionados em discos de aproximadamente 5 cm de espessura para a realização do experimento.

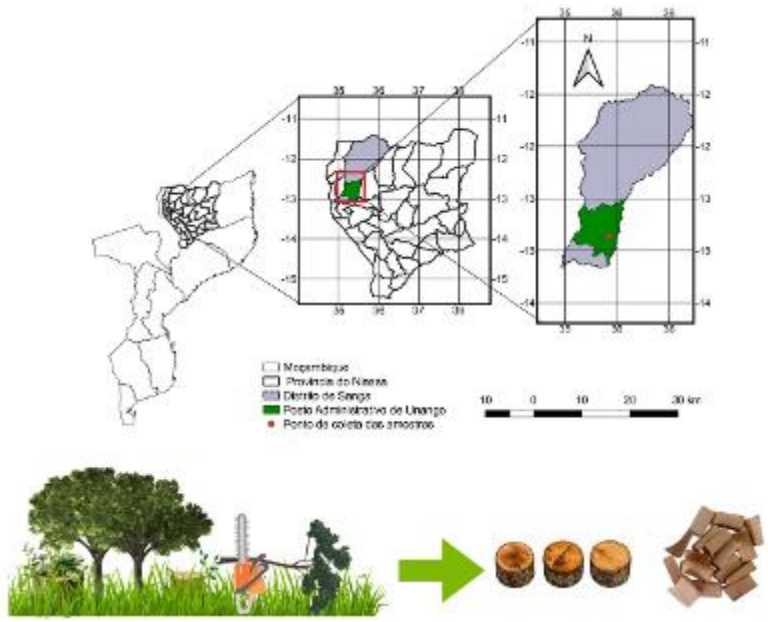


Figura 1 – Mapa de localização da área de estudo em Moçambique.

2.1. Caracterização imediata da biomassa

A biomassa residual foi caracterizada quanto à composição química imediata, incluindo a determinação dos teores de umidade (UM), material volátil (MV), cinzas (CZ) e carbono fixo (CF) usando as normas ASTM E871–82, ASTM D1102–84, ASTM E872–82 (Mensah et al., 2022). Esses parâmetros permitem avaliar as características iniciais da matéria-prima e sua influência no processo de conversão termoquímica. Para as análises, a biomassa residual foi moída em moinho de facas tipo Wiley, utilizando-se a fração retida entre as peneiras de 40 e 60 mesh.

2.2. Produção de carvão vegetal e caracterização

Para a produção de carvão vegetal, foram utilizadas amostras com dimensões de aproximadamente 2 × 2 × 5 cm, previamente submetidas à secagem em estufa a 103 ± 2 °C até a

remoção da umidade residual. As pirólises foram conduzidas em forno elétrico tipo mufla, equipado com sistema de condensação dos gases gerados durante o processo. O experimento foi realizado com três repetições, utilizando-se 300 g de biomassa por repetição, totalizando 900 g. O processo foi conduzido com taxa de aquecimento de 5 °C min^{-1} até temperatura final de 450 °C, mantendo-se tempo de residência de 1 h. Ao final de cada ensaio, foi determinado o rendimento gravimétrico do carvão vegetal (RGCV), conforme a Equação (1).

(1)

Em que:

- RGCV = rendimento gravimétrico do carvão vegetal (%);
- Mcv = massa seca do carvão vegetal obtido (g);
- Mms = massa seca da madeira utilizada na pirólise (g)

Após a pirólise, o carvão vegetal foi resfriado em temperatura ambiente, acondicionado em recipientes adequados e posteriormente submetido às análises de caracterização físico-química. Para a preparação das amostras, o carvão vegetal foi triturado manualmente com auxílio de pistilo e recipiente de cerâmica e, em seguida, peneirado, utilizando-se a fração retida entre as peneiras de 40 e 60 mesh. As análises foram realizadas conforme metodologia descrita na norma ASTM D1762-84 (ASTM, 2021) e determinados teores de umidade, material volátil, cinzas e carbono fixo.

O poder calorífico superior (PCS) do carvão vegetal foi determinado em 3 repetições usando uma bomba calorimétrica modelo IKA C200, utilizando amostras absolutamente secas de aproximadamente 0,30 g, conforme os procedimentos estabelecidos pela norma EN 14918 (DIN, 2010).

2.3. Análise de dados

Os resultados foram expressos em média ± desvio padrão para as variáveis analisadas: UM (%) – teor de umidade; CF (%) – teor de carbono fixo; MV (%) – teor de materiais voláteis; CZ (%) – teor de cinzas; e PCS (MJ kg^{-1}) – poder calorífico superior.

3. Resultados e discussão

3.1. Rendimento e características do carvão vegetal

O rendimento gravimétrico foi de 36,18 ± 0,98%, valor compatível com o relatado para madeiras carbonizadas em temperaturas de 450 °C, cujos rendimentos geralmente variam entre

33 e 35% (Carneiro et al., 2026; Massuque et al., 2021). As propriedades da análise imediata da biomassa residual e do carvão vegetal produzido por pirólise lenta são apresentadas na Figura 2.

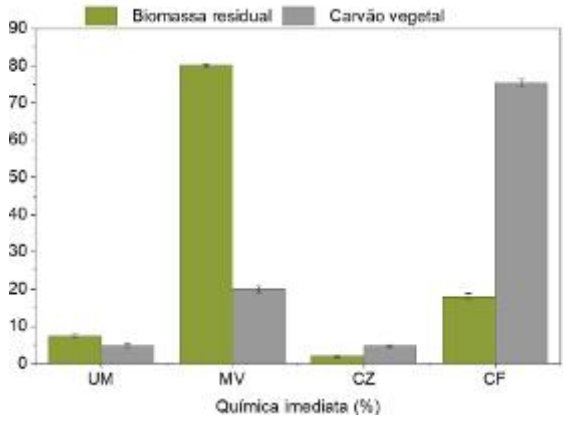


Figura 2 - Caracterização imediata da biomassa e do carvão vegetal de *Brachystegia spiciformis*. UM = umidade (%); MV = materiais voláteis (%); CZ = cinzas (%); CF = carbono fixo (%). As barras representam a média ± desvio padrão.

O teor de umidade foi de 7,45 ± 0,37% na biomassa e 4,63 ± 0,65% no carvão vegetal produzido por pirólise (Figura 2). A redução observada após a carbonização está relacionada à remoção da maior parte da água presente na biomassa durante o processo térmico. O baixo teor de umidade do carvão vegetal indica menor retenção de água após o resfriamento e acondicionamento das amostras, mantendo valores inferiores aos da matéria-prima de origem. Baixos teores de umidade são desejáveis em combustíveis sólidos, pois reduzem a energia necessária para a evaporação da água durante a combustão, favorecem a ignição e contribuem para maior eficiência energética do combustível (Carneiro et al., 2024; Lubwama et al., 2023). Esse rendimento demonstra que a conversão dos resíduos madeireiros em carvão vegetal ocorre com boa eficiência, favorecendo o aproveitamento da biomassa residual e aumentando o potencial de geração de energia por unidade de matéria-prima processada. Além disso, valores inferiores a 8% para o carvão vegetal são considerados adequados conforme a norma europeia EN 1860–2. Do ponto de vista prático, o baixo teor de umidade reduz perdas energéticas durante a ignição, melhora o armazenamento do combustível e favorece sua comercialização e utilização em sistemas domésticos de cocção e aquecimento.

O teor de materiais voláteis reduziu de 80,08±0,46% na biomassa para 19,96±0,86% no carvão vegetal. Esse valor foi inferior ao reportado por Massuque et al., (2023) para a mesma espécie (21,69%), obtido a 450 °C, com taxa de aquecimento de 1,6 °C min^{-1} e tempo de residência de 30 min. A menor concentração de materiais voláteis observada neste estudo pode

estar relacionada às condições de carbonização empregadas, particularmente ao maior tempo de residência (60 min) e à maior taxa de aquecimento (5 °C min^{-1}). Essas condições favoreceram a degradação térmica dos constituintes da madeira durante a pirólise. Como consequência, ocorreu maior liberação de compostos voláteis e concentração da fração carbonácea, elevando a qualidade energética do carvão vegetal (Dias Júnior et al., 2021; Lubwama et al., 2023). Baixos teores de materiais voláteis favorecem uma combustão mais limpa e estável, reduzindo a emissão de fumaça e a formação de alcatrão durante a coação de alimento, além de aumentar a eficiência energética do combustível (Lubwama et al., 2023). Além disso, essas características tornam o carvão vegetal mais adequado ao uso doméstico, proporcionando maior conforto ao usuário, menor exposição à fumaça e melhor desempenho durante a cocção dos alimentos.

O teor de carbono fixo variou de 17,97±0,28% na biomassa para 75,42±0,97% no carvão vegetal, refletindo a concentração da fração carbonácea após a remoção dos compostos voláteis durante a pirólise. Esse valor foi superior ao reportado por Massuque et al., (2023) para a mesma espécie (73,90%) e atende ao requisito mínimo estabelecido pela norma EN 1860-2, que especifica teor de carbono fixo mínimo de 75% em massa para carvão vegetal seco destinado ao uso doméstico. Elevados teores de carbono fixo estão associados ao aumento do poder calorífico e à maior duração da combustão, sendo considerados indicadores importantes da qualidade energética do carvão vegetal (Mencarelli et al., 2025). Assim, o elevado teor de carbono fixo demonstra que o carvão produzido possui elevado potencial energético, proporcionando maior autonomia durante o uso, menor consumo de combustível e maior eficiência em aplicações domésticas e comerciais.

O teor de cinzas aumentou de 1,95±0,24% na biomassa para 4,62±0,31% no carvão vegetal, em razão da concentração relativa dos constituintes minerais após a degradação e volatilização da fração orgânica durante a pirólise. Embora superior aos valores reportados para algumas espécies de *Eucalyptus spp*., que variam de 0,7 a 1,7% (Carneiro et al., 2026), o teor observado permanece abaixo do limite de 8% estabelecido pela norma EN 1860-2 para carvão vegetal destinado ao uso doméstico. Teores reduzidos de cinzas são desejáveis, pois diminuem a formação de resíduos durante a combustão, reduzem perdas energéticas e contribuem para melhor desempenho do carvão vegetal como combustível (Massuque et al., 2023; Mencarelli et al., 2022). Esse comportamento indica que o carvão vegetal apresenta menor tendência à formação excessiva de resíduos após a combustão, reduzindo a necessidade de limpeza dos equipamentos, aumentando a eficiência da combustão e melhorando a aceitação do combustível pelos consumidores.

O carvão vegetal apresentou poder calorífico superior de 29,83±0,13 MJ kg^{-1}, valor inserido na faixa de 27 a 32 MJ kg^{-1} normalmente reportada para carvões vegetais de elevada qualidade (Mencarelli et al., 2022). Esse resultado está associado ao alto teor de carbono fixo e ao baixo teor de materiais voláteis, indicando elevada densidade energética e bom desempenho para aplicações domésticas, como cocção de alimentos e aquecimento.

4. Conclusões

O aproveitamento de resíduos madeireiros provenientes de *Brachystegia spiciformis*, espécie nativa da formação florestal de Miombo, demonstrou potencial para a produção de carvão vegetal com elevada qualidade energética. O processo de pirólise resultou em um carvão vegetal com baixo teor de umidade e de materiais voláteis, elevado teor de carbono fixo, baixo teor de cinzas e alto poder calorífico superior, características que evidenciam seu potencial para aplicações energéticas. As propriedades obtidas atenderam aos requisitos estabelecidos pela norma EN 1860-2 para carvão vegetal destinado ao uso doméstico. Dessa forma, a conversão desses resíduos em carvão vegetal constitui uma estratégia tecnicamente viável para a valorização energética da biomassa residual, contribuindo para a redução de desperdícios, a agregação de valor aos resíduos madeireiros e a promoção da gestão sustentável dos recursos florestais.

5. Agradecimentos

Agradecimentos a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES – Código de financiamento 001), Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq - Chamada Universal nº. 18/2021, Chamada Bolsa de Produtividade em Desenvolvimento Tecnológico e Extensão Inovadora nº. 08/2022, Apoio a Projetos Internacionais de Pesquisa Científica, Tecnológica e de Inovação nº. 14/2023, Conhecimento Brasil – Rede de Colaboração nº. 22/2024, Apoio a Projetos Internacionais de Pesquisa Científica, Tecnológica e de Inovação nº. 16/2024).

6. Referências bibliográficas

Afonso, C. M. I., Gonçalves, T. A. P., De Muñiz, G. I. B., De Matos, J. L. M., & Nisgoski, S. (2015). Mozambique's charcoals—Energetic properties of nine native species. *European Journal of Wood and Wood Products*, *73*(1), 131–133. https://doi.org/10.1007/s00107-014-0855-z

ASTM. (2021). *Test Method for Chemical Analysis of Wood Charcoal*. ASTM International. https://doi.org/10.1520/D1762-84R21

Carneiro, A. D. C. O., Cardoso, M. T., Zanuncio, A. J. V., Pereira, E. G., Carvalho, A. M. M. L., Martins, M. A., Guimarães, D. P. D. S., Evangelista, E. L. C., Castro, V. R. D., Carvalho, A. G., & Araujo, S. D. O. (2024). Carbonization gases as an energy source for Eucalyptus logs drying of different diameter classes in metallic dryer. *Revista Árvore*, *48*(1), 1–17. https://doi.org/10.53661/1806-9088202448263784

Carneiro, A. D. C. O., Moretti, S. D. A., Zanuncio, A. J. V., Zanuncio, V., Lima, B. L. D., Melo, J. D. D., Jorge, F. D. J., Junqueira, M. S., Carvalho, A. M. M. L., Araújo, S. O., & Carvalho, A. G. (2026). Eucalyptus and Corymbia clones: Effects of harvest age on wood quality for sustainable charcoal production. *European Journal of Wood and Wood Products*, *84*(3), 79. https://doi.org/10.1007/s00107-026-02432-2

Dias Júnior, A. F., Suuchi, M. A., Sant'Anna Neto, A., Da Silva, J. G. M., Da Silva, Á. M., De Souza, N. D., Protásio, T. D. P., & Brito, J. O. (2021). Blends of charcoal fines and wood improve the combustibility and quality of the solid biofuels. *BioEnergy Research*, *14*(1), 344–354. https://doi.org/10.1007/s12155-020-10179-8

Deutsches Institut Für Normung (DIN) (2010) DIN EN 14918. Determination of Calorific Value. CEN, Berlin.

Kożuch, A., Cywicka, D., Adamowicz, K., Wieruszewski, M., Wysocka-Fijorek, E., & Kiełbasa, P. (2023). The Use of Forest Biomass for Energy Purposes in Selected European Countries. *Energies*, *16*(15), 5776. https://doi.org/10.3390/en16155776

Lubwama, M., Yiga, V. A., Ssempijja, I., & Lubwama, H. N. (2023). Thermal and mechanical characteristics of local firewood species and resulting charcoal produced by slow pyrolysis. *Biomass Conversion and Biorefinery*, *13*(8), 6689–6704. https://doi.org/10.1007/s13399-021-01840-z

Massuque, J., De Assis, M. R., Loureiro, B. A., Matavel, C. E., & Trugilho, P. F. (2021). Influence of lignin on wood carbonization and charcoal properties of Miombo woodland native species. *European Journal of Wood and Wood Products*, *79*(3), 527–535. https://doi.org/10.1007/s00107-021-01669-3

Massuque, J., De Assis, M. R., & Trugilho, P. F. (2020). Characterization of Miombo species used by rural communities as fuelwood in Northern Mozambique. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, *46*(1), 16175–16184. https://doi.org/10.1080/15567036.2020.1815910

Massuque, J., Matavel, C. E., de Paula Protásio, T., & Trugilho, P. F. (2023). Combustion performance of charcoal: A comparative study on Miombo woodland native

species and Eucalyptus grandis. *Biomass Conversion and Biorefinery*, *13*(17), 15789–15798. https://doi.org/10.1007/s13399-021-02109-1

Mencarelli, A., Cavalli, R., & Greco, R. (2022). Variability on the energy properties of charcoal and charcoal briquettes for barbecue. *Heliyon*, *8*(8), e10052. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e10052

Mencarelli, A., Greco, R., & Grigolato, S. (2025). Grilling and air pollution: How charcoal quality affects emissions. *Air Quality, Atmosphere & Health*, *18*(6), 1757–1770. https://doi.org/10.1007/s11869-025-01737-0

Mensah, I., Ahiekpor, J.C., Herold, N., Bensah, E.C., Pfriem, A., Antwi, E., Amponsem, B., 2022. Biomass and plastic co-pyrolysis for syngas production: Characterisation of Celtis mildbraedii sawdust as a potential feedstock. Scientific African 16, e01208. https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2022.e01208

Nanvonamuquitxo, S. J. A., Rojas, F. G., & Hofiço, N. D. S. A. (2017). Desperdício de madeira na concessão florestal da indústria Sotomane na província da Zambézia, Moçambique. *Nativa*, *5*(3), 208–211. https://doi.org/10.31413/nativa.v5i3.4380

Reis, S. A. R., Costa Gondim, M. D., Bilhalva Dos Santos, P. S., Rodrigues Soares, C., Venicio Souza, D., & Zanatta, P. (2022). The quality of artisanal charcoal sold for domestic use in Tucuruí municipality in the Brazilian Amazon. *International Wood Products Journal*, *13*(4), 211–218. https://doi.org/10.1080/20426445.2022.2094115

Smith, H. E., Jones, D., Vollmer, F., Baumert, S., Ryan, C. M., Woollen, E., Lisboa, S. N., Carvalho, M., Fisher, J. A., Luz, A. C., Grundy, I. M., & Patenaude, G. (2019). Urban energy transitions and rural income generation: Sustainable opportunities for rural development through charcoal production. *World Development*, *113*, 237–245. https://doi.org/10.1016/j.worlddev.2018.08.024

Tazebew, E., Sato, S., Addisu, S., Bekele, E., Alemu, A., & Belay, B. (2023). Improving traditional charcoal production system for sustainable charcoal income and environmental benefits in highlands of Ethiopia. *Heliyon*, *9*(9), e19787. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e19787

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Torrefação de Minicavacos de *Eucalyptus sp.* Para Fins Energéticos

Laís Gasparoni Gomes[1]; Fernanda Henriques Franco[1]; Angélica de Cássia Oliveira Carneiro[1]; Iara Fontes Demuner[1]; Antonio Zanuncio[1]; Paula Surdi[1]; Matheus Fernandes de Carvalho Reis[1]

[1] Universidade Federal de Viçosa

Resumo: A torrefação é uma alternativa promissora para melhorar a qualidade energética da biomassa florestal, reduzindo limitações da madeira "*in natura*", como elevada umidade e baixo desempenho energético. Neste estudo, avaliou-se o efeito da temperatura (250 e 300ºC), do tempo de residência (10,15 e 20 min) e da umidade inicial (~14% e ~0% b.s.) sobre o rendimento em massa e energia de "minicavacos" de *Eucalyptus sp.* torrificados em reator de fluxo semi-contínuo. Os resultados mostraram que o aumento da temperatura e do tempo de torrefação reduziu os rendimentos em massa e energia, com perdas mais acentuadas nas amostras previamente secas. Apesar disso, o rendimento energético foi menos afetado que o rendimento em massa, evidenciando a concentração de compostos de maior estabilidade térmica. Portanto a torrefação melhora a qualidade energética dos "minicavacos", sendo a temperatura a variável de maior influência sobre o processo.

Palavras-chave: Biomassa; Madeira; Reator.

Torrefaction of *Eucalyptus sp.* Wood Chips for Energy Applications

Abstract: Torrefaction is a promising technology for improving the energy quality of forest biomass by overcoming the limitations of raw wood, such as high moisture content and low energy performance. This study evaluated the effects of torrefaction temperature (250 and 300ºC), residence time (10, 15 and 20 min), and initial moisture content (~14% and ~0%, dry basis) on the mass and energy yields of *Eucalyptus sp.* Wood chips torrefied in a semi-continuous screw reactor. The results showed that increasing torrefaction temperature an residence time reduced both mass and energy yields, with greater losses observed in the previously dried samples. However, the reduction in energy yield was less pronounced than that in mass yield, indicating the concentration of thermally stable compounds. Therefore, torrefaction improves the energy quality of *Eucalyptus sp.* Wood chips, with temperature being the most influential process variable.

Keywords: Biomass; Wood; Reactor.

1. Introdução

A biomassa é utilizada para fins energéticos desde os primórdios da civilização humana, inicialmente como fonte de calor e luz (NASCIMENTO, 2010).

Embora sua participação na matriz energética mundial seja menor, a biomassa continua com maior expressividade em países em desenvolvimento. De forma geral, as fontes renováveis representam cerca de 14,2% da matriz energética mundial e 41,2% da brasileira, na qual aproximadamente 28,9% é referente à biocombustíveis, caracterizando como um dos países de maior utilização de biomassa para geração de energia (BRASIL, 2016).

Apesar desse cenário, o uso dos biocombustíveis é relativamente baixo quando comparada àquelas de energia não renovável (petróleo e seus derivados), que apresentam características energéticas superiores (COSTA, 2005). No entanto, estes combustíveis não são considerados ambientalmente amigáveis, havendo forte e crescente pressão para utilização de fontes menos agressivas ao meio ambiente.

A busca por fontes energeticamente compatíveis e viáveis de substituição à fonte dominante atual torna-se crucial. Portanto, fontes renováveis, como a biomassa florestal, ressurgem como excelentes alternativas (BERMANN, 2008; PROTÁSIO et al., 2013), pois são fontes de energia limpa e não influenciam no balanço térmico do planeta (PACHECO, 2006)

Os cavacos de madeira são empregados como combustíveis sólidos renováveis (MOSKALIK; GENDEK, 2019). A maior área superficial dos cavacos associados a menores dimensões dos mesmos (“minicavacos”) atua de forma positiva na eficiência do processo de queima e na qualidade final do produto (PIRRAGLIA et al., 2012).

Porém, a biomassa na condição “in natura” apresenta características como alto teor de umidade, baixo poder calorífico e caráter heterogêneo. Podendo reduzir a competitividade econômica desta fonte frente às outras e até mesmo inviabilizar seu uso (WANG et.al., 2013; POUDEL et al., 2015; ZANUNCIO et al., 2015).

Sendo assim, há buscas por tecnologias que aperfeiçoam as propriedades da biomassa e agregam valor energético ao produto final (MODES, 2010). Um um exemplo disto são os tratamentos térmicos, como a carbonização e a torrefação (WANNAPEERA et al. 2011).

A torrefação consiste em um pré-tratamento térmico, em ausência total ou parcial de oxigênio, em faixa de temperatura entre 200 e 300 ºC. Ele visa elevar as propriedades energéticas da biomassa e para se tornar mais atrativa perante o mercado (SHANG et al., 2014; VAN DER STEL et al., 2011; MEDIC et al., 2010). O processo produz um material com características intermediárias à madeira “in natura” e o carvão vegetal. No qual, oscilando variáveis de processo, como granulometria, tempo de residência e temperatura (MEDIC et al.,

2010), é possível obter produtos de diferentes propriedades químicas, físicas e energética, com padronização (FERRO et al., 2004).

Dentre as principais vantagens da torrefação, destacam-se o aumento do valor energético da biomassa e poder calorífico (LUENGO et al., 2008), acréscimo da hidrofobicidade, redução da umidade e higroscopicidade (LORA et al., 2013), além do aumento da friabilidade e moabilidade (ROUSSET & RODRIGUES, 2009).

Contudo, a utilização em escala comercial da torrefação ainda é muito pequena, sendo a maioria das instalações projetos experimentais ou adaptações de outros tratamentos térmicos (BATIDZIRAI,2013; WILÉN et al., 2013). No entanto, a tecnologia de produção da torrefação não é de alta complexidade, porém as variáveis do processo não são totalmente compreendidas. Evidenciando a importância de aprofundar as pesquisas quanto à tecnologia e metodologia de produção de biomassa torrificada, de modo a tornar economicamente viável e competitiva frente a outras fontes energéticas.

Dessa forma, esta pesquisa tem como objetivo avaliar as propriedades energéticas de "minicavacos" de Eucalyptus sp. submetidos à torrefação, analisando os efeitos da temperatura, do tempo de torrefação e da umidade inicial da madeira sobre os rendimentos em massa e energia do processo.

2. Material e métodos

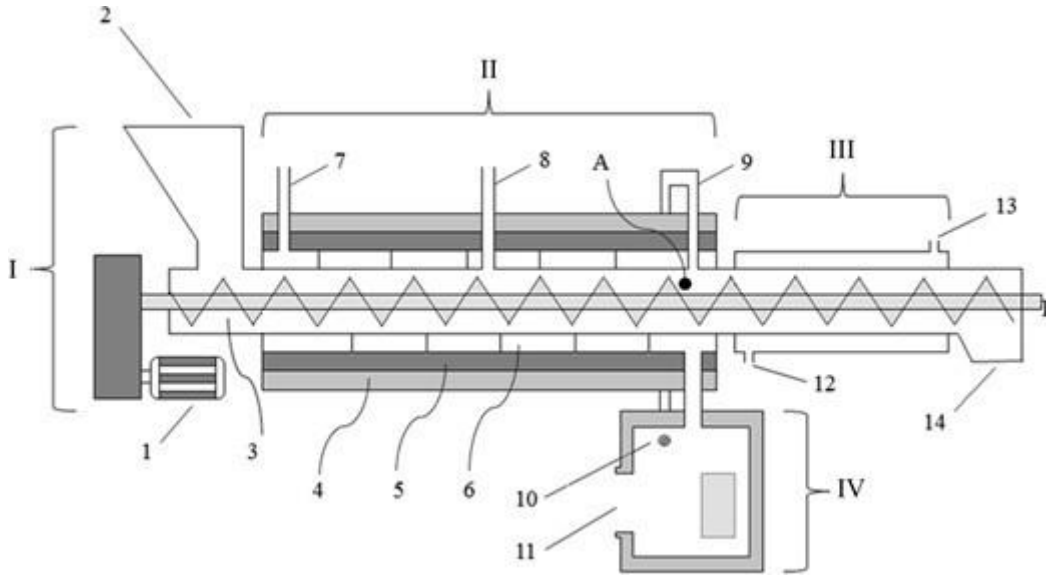
a. Matéria Prima e Torrefação da Madeira

O experimento foi desenvolvido no Laboratório de Painéis e Energia da Madeira (LAPEM), do Departamento de Engenharia Florestal da Universidade Federal de Viçosa (DEF/UFV), em Viçosa/MG. Foram utilizados aproximadamente 1,5 kg "minicavacos" de Eucalyptus sp., doados pela empresa Biofogo, com dimensões em média: 1,97 x 8,89 x 12,88 mm e granulometria média de 8,82 mm, para cada tratamento. Metade das amostras foram previamente secas em estufa a 103 ± 2 °C até 0% de umidade para eliminar o efeito da umidade inicial.

A torrefação foi realizada em um reator do tipo rosca sem fim de fluxo semi-contínuo (Figura 1), desenvolvido no LAPEM e patenteado junto ao Instituto Nacional de Propriedade Intelectual (INPI), sob o processo nº BR 10 2016 010484 0. O equipamento é constituído pelos sistemas de transporte por rosca sem fim, aquecimento indireto por queimador pirolítico, resfriamento indireto com água e exaustão dos gases e vapores gerados durante o tratamento

térmico. O controle de temperatura e tempo de residência foi realizado por meio de termômetro digital com oito termopares tipo J e temporizadores analógicos.

Figura 1 – Layout em vista lateral do reator para torrefação de biomassa em fluxo semi-contínuo. Fonte: SILVA (2016).



Sendo: I – Sistema de Transporte; II - Sistema de Aquecimento; III - Sistema de Resfriamento; IV – Sistema de Queima; 1 – Motor com redução; 2 – Silo/entrada de cavacos; 3 – Rosca-sem-fim; 4 – Camada Isolante; 5 – Camada Refratária; 6 – Fluxo do gás de aquecimento com barreiras (aletas); 7 – Exaustor Elétrico/Saída do gás de aquecimento; 8 – Primeira “chaminé”; 9 – Segunda “chaminé” conectada ao sistema de queima; 10 - Conexão da segunda “chaminé” com o sistema de Queima; 11 – Conexão do queimador na câmara quebra-chamas; 12 – Entrada de água; 13 – Saída de água; 14 – Saída dos cavacos torrificado; A – Local de coleta da temperatura final do tratamento.

b. Rendimento em Massa e Energia

Os rendimentos em massa e energia dos tratamentos foram obtidos conforme as equações a seguir.

$$Eq\,1: Rendimento\ em\ Massa\,(\%) = \frac{Massa\ Final\ Seca\ x\ 100}{Massa\ Inicial\ Seca}$$

$$Eq\,2: Rendimento\ em\ Energia\,(\%) = \frac{Rendimento\ em\ Massa\ x\ PCS\ Final}{PCS\ Inicial}$$

Os rendimentos em massa foram calculados com base na massa seca de “minicavacos”, enquanto os rendimentos em energia foram considerados o PCS (Poder Calorífico Superior) inicial dos “minicavacos” não tratados termicamente e o PCS dos “minicavacos” torrificados e seus respectivos rendimentos em massa.

c. Delineamento Experimental

O experimento foi realizado considerando-se três variáveis de processo: tempo de residência dos “minicavacos” no reator (10,15 e 20 minutos), temperatura máxima final de torrefação (250 e 300°C) e umidade inicial dos “minicavacos” em equilíbrio higroscópico com o ambiente (~14% b.s.) e seco em estufa (~0% b.s.). A combinação dos fatores resultou em 12 tratamentos, além da testemunha (não torrificados).

Os dados obtidos foram submetidos à Análise de Variância a 5% de significância . Quando obtidas diferenças significativas, aplicou-se o Teste de Médias Scott Knott (5%). Além disso, cada tratamento foi comparado com a testemunha através do Teste de Médias Dunnett, também a 5% de probabilidade.

Tabela 1 – Delineamento experimental

Tratamento	Temperatura (ºC)	Tempo (minutos)	Teor Umidade (%)
Testemunha	-	-	-
1	250	10	0
2	250	15	0
3	250	20	0
4	250	10	~14%
5	250	15	~14%
6	250	20	~14%
7	300	10	0
8	300	15	0

9	300	20	0
10	300	10	~14%
11	300	15	~14%
12	300	20	~14%

3. Resultados e Discussão

a. Rendimento em Massa e Energia

Na Figura 2 são apresentados os rendimentos em massa e em energia dos “minicavacos” submetidos a torrefação em diferentes condições de tratamento.

Rendimento em Massa	**250°C 14%**	**250°C 0%**	**300°C 14%**	**300°C 0%**
10 minutos	97,79	91,08	99,83	76,83
15 minutos	93,22	81,09	89,82	67,73
20 minutos	90,34	76,08	81,25	64,35

Rendimento em Energia	**250°C 14%**	**250°C 0%**	**300°C 14%**	**300°C 0%**
10 minutos	98,86	92,24	100	83,15
15 minutos	94,48	82,79	96,72	77,30
20 minutos	94,59	81,41	94,20	75,83

Figura 2 – Rendimento em massa e energia de “minicavacos” de eucalipto submetidos à torrefação em diferentes condições de tratamento.

Observa-se que tanto o rendimento em massa quanto o rendimento em energia reduziram com o aumento do tempo de exposição ao tratamento térmico, no qual, os “minicavacos” a 0% de umidade torrificados a 300°C foram os que apresentaram as maiores taxas de redução, sendo estas 35,65% e 24,17%, para perda em rendimento em massa e energia, respectivamente.

De forma geral, o decréscimo em rendimento é decorrente da perda de massa associada a degradação térmica da madeira durante o processo de torrefação. No caso das hemiceluloses, a degradação ocorre a partir de 200 ºC, formando subprodutos na forma de voláteis (WILD et al., 2009). Desta forma, o intervalo de temperatura de exposição onde acontece a degradação das hemiceluloses coincide com o intervalo de torrefação no qual os “minicavacos” foram torrificados.

Quando comparado o processo de torrefação das amostras secas (0% de umidade) com aquelas a 14% de umidade, observa-se que, os “minicavacos” úmidos precisaram passar pela fase de secagem dentro do reator, o que não aconteceu com as amostras secas previamente. Devido ao tempo e temperatura de exposição de todos os tratamentos serem os mesmos, aqueles “minicavacos” previamente secos tiveram maior degradação térmica, influenciando diretamente na maior perda de rendimento em massa e energia (BATES e GHONIEM, 2014; REZENDE, 2009).

Em relação às maiores taxas de redução de rendimento em massa e energia pertencerem a tratamentos submetidos à maiores temperaturas Bergman et al. (2005) e Wannapeera et al. (2011) explicam que a variável temperatura de processo tem maior influência nas propriedades resultantes da torrefação do que no tempo de exposição, e que, após 250°C o rendimento cai de forma mais rápida. Quando a biomassa atinge temperaturas próximas a 250ºC, a degradação das hemiceluloses encontra-se próxima ao máximo e da celulose está iniciando. Como juntas, elas perfazem mais de 2/3 da massa seca do material, há maiores perdas em rendimento em temperaturas mais elevadas. As taxas de reduções de rendimentos em massa e energia de todos os tratamentos foram condizentes com a literatura existente, onde cita que, em condições típicas de torrefação, a perda de rendimento em massa é maior que a perda de rendimento em energia. (BERGMAN et al., 2005; VAN DER STELT et al., 2011; AGAR e WIHERSAARI, 2012).

Sendo encontrado, variação de valores entre 64,35% a 90,34% e 75,83% a 94,59%, para rendimento em massa e energia, respectivamente.

Apesar da concentração de componentes de menor estabilidade térmica reduzir à medida que se aumenta a temperatura de exposição, tendo esse menor conteúdo energético. Logo, o rendimento em âmbito energético apresenta tendência de redução em menor proporção que o rendimento em massa. Desta forma, compostos mais estáveis e de caráter mais energéticos, como a lignina, não sofreram grandes alterações e contribuíram para aumentar o rendimento energético da biomassa torrificada (LUENGO et al., 2008).

4. Conclusões

Tanto o rendimento em massa, quanto em energia tiveram seus valores reduzidos à medida que se aumentou a temperatura e o tempo de torrefação. Sendo que, aquelas amostras que foram previamente submetidas à secagem em estufa apresentaram as maiores taxas de redução. E, em todos os tratamentos os incrementos em rendimento em massa foram inferiores ou iguais aos rendimentos em energia, mas de modo geral, é demostrado uma tendência que a torrefação promove maior redução no rendimento em massa do que no rendimento em energia.

A torrefação de “minicavacos” pode ser variável de acordo com as propriedades inerentes a própria biomassa e as condições de tratamento, evidenciando a importância de continuar no desenvolvimento de pesquisas e tecnologias focadas em torrefação de biomassas, já que os resultados se mostram promissores para “minicavacos” torrificados.

5. Agradecimentos

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES), à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG), à Universidade Federal de Viçosa (UFV), ao Departamento de Engenharia Florestal (DEF/UFV) e à Sociedade de Investigações Florestais (SIF).

6. Referências Bibliográficas

AGAR, D.; WIHERSAARI, M. Bio-coal, torrefied lignocellulosic resources – Key properties for its use in co-firing with fossil coal – Their status. Biomass and Bioenergy, v.44, p.107-111, 2012.

BATES, R. B.; GHONIEM, A. F. Modeling kinetics-transport interactions during biomass torrefaction: The effects of temperature, particle size, and moisture content. Fuel, v.137, p.216-229, 2014.

BATIDZIRAI, B.; MIGNOT, A. P. R.; SCHAKEL, W. B.; JUNGINGER, H.M.;

FAAIJ, A. P. C. Biomass torrefaction technology: Techno-economic status and future prospects. Energy, v. 62, p. 196 – 214, 2013.

BERGMAN, P. C. A.; BOERSMA, A. R.; KIEL, J. H. A.; PRINS, M. J.;

PTASINSKI, K. J.; JANSSEN, F. J. J. G. Torrefaction biomass for entrained- flow gasification of biomass. Petten: ECN, 2004. p. 679 - 682 (Report...)

BERMANN, C. Crise ambiental e as energias renováveis. Ciência e Cultura, v.60, n. 3, p.20-29, 2008.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Resenha Energética Brasileira: ano de exercício 2015. Brasília: MME, 2016. 29p.

COSTA, R. C. da. ; PRATES, C. P. T. O Papel das Fontes Renováveis de Energia no Desenvolvimento do Setor Energético e Barreiras à sua Penetração no Mercado. Rio Janeiro: BNDES Setorial, 2005. n. 21, p. 5-30.

FERRO, D. T.; VIGOUROUX, V.; GRIMM, A.; ZANI, R. Torrefaction of

agricultural and forest residues. CUBASOLAR. Guantánamo, Cuba, 2004.

LORA, E. E. S.; VENTURINI, O. J.; ANDRADE, R. V. Torrefação de madeira. In: SANTOS, F.; COLODETTE, J.; QUEIROZ, J. H. de. Bioenergia e

biorrefinaria: cana-de-açúcar & espécies florestais. Viçosa: Ed. UFV, 2013. p. 401–428.

LUENGO, C. A.; FELFLI, F. E. F.; BEZZON, G. Pirólise e torrefação de biomassa. In: CORTEZ, L. A. B.; LORA, E. S. Biomassa para energia. Campinas: Ed. UNICAMP, 2008. p.333-351.

MEDIC, D.; DARR, M.; SHAH, A.; POTTER, B.; ZIMMERMAN, J. Effect of

Torrefaction Process Parameters on Biomass Feedstock Upgrading, In: ASABE Annual International Meeting, 2010, Pittsburg. Anais... Pittsburg: Ed. ASABE, 2010. v. 1009316.

MODES, K. S. Efeito da retificação térmica nas propriedades dísico- mecânicas e biológica das madeiras de *Pinus taedae* e *Eucalyptus grandis*. 2010. 99p. Dissertação (mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria.

MOSALIK, T.; GENDEK, A. Production of chips from loggin residues and their quality for energy: A review of Europeans literature. *Forests,* Basel, v. 10, n. 3, art 262, 2019. DOI: https://doi.org/10.3390/f10030262

NASCIMENTO, M. D. do. ; BIAGGIONI, M. A. M. Avaliação energética do uso de lenha e cavaco de madeira para a produção de energia em agroindústria seropédica. Energia na Agricultura, v. 25, n. 03, p. 104-117, 2010.

PACHECO, F. Energias Renováveis: breves conceitos. Conjuntura e Planejamento, n.149, p.4-11, 2006.

PIRRAGLIA, A.; GONZALEZ, R.; DENIG, J.; SALONI, D.; WRIGHT, J.

Assessment of the most adequate pre-treatments and woody biomass sources intended for direct co-firing in the U.S. BioResources, v.7, n.4, p.4817-4842, 2012.

POUDEL, J. ; OHM, T. ; OH, S. C. A study on torrefaction of food waste. Fuel, v.140, p.275-281, 2015.

PROTÁSIO, T. P.; BUFALINO, L.; TONOLI, H. D., GUIMARÃES JUNIOR, M.;

TRUGILHO, P. F.; MENDES, L. M. Brazilian lignocellulosic wastes for bioenergy production: characterization and comparison with fossil fuels. BioResources, Railegh, v. 8, n. 1, p. 1166-1185, 2013.

REZENDE, R. N. Secagem de toras de clones de *eucalyptus* empregados na produção de carvão. 2009. 178 p. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia da Madeira) - Universidade Federal de Lavras, Lavras.

ROUSSET, P. L. A. ; RODRIGUES, T. O. Torrefação como pré- condicionamento da biomassa para fins energéticos: estado da arte. São José dos Campos, 2009. 9p.

SHANG, L.; AHRENFELDT, J.; HOLM, J. K.; BACH, L. S.; STELTE, W.;

HENRIKSEN, U. B. Kinetic model for torrefaction of wood chips in a pilot-scale continuous reactor. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, v. 108, p. 109-116, 2014.

SILVA, C. M. S. da. Torrefação de cavacos de eucalipto em reator de fluxo semi-contínuo. 2016. 54 f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal).
Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

VAN DER STELT, M. J. C.; KIEL, J. H. A.; PTASINKI, K. J. Biomass upgrading

by torrefaction for the production of biofuels: A review. Biomass and Bioenergy, v.35, p. 3748 - 3762, 2011.

WANG, C.; PENG, J.; LI, H.; BI, X. T.; LEGROS, R.; LIM, C. J.; SOKHANSANJ,

S. Oxidative torrefaction of biomass residues and densification of torrefied sawdust to pellets. Bioresource Technology. v. 127, p. 318 - 325, 2013.

WANNAPEERA, J. ; FUNGTAMMASAN, B. ; WORASUWANNARAK, N. Effects

of temperature and holding time during torrefaction on the pyrolysis behaviors of woody biomass. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, v. 92, p. 99- 105, 2011.

WILD, P. J.; UIL, H. D.; REITH, J. H.; KIEL, J. H. A.; HEERES, H. J. Biomass

valorisation by staged degasification: A new pyrolysis-based thermochemical conversion. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, v. 85, p. 124–133, 2009.

WILÉN, C.; JUKOLA, P.; JARVINEN, T.; SIPILA, K. Wood torrefaction – pilot tests and utilization prospects. VTT TECHNOLOGY 122, 73p, 2013.

ZANUNCIO, A. J. V.; CARVALHO, A. G, SILVA, E. M. G. C. S.; MONTEIRO, T.

C.; LIMA, J. T.; SILVA, J. R. M. da. Propriedades energéticas da madeira e carvão de *Corymbia* e *Eucalyptus* em diferentes condições de secagem.

Revista Brasileira de Ciências Agrárias. Recife, v. 10, n. 3, p. 432 - 436, 2015.

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Tratamento Alcalino do Resíduo Lignocelulósico do Pós Cultivo De Cogumelo *Lentinula edodes* para Fins Energéticos

Yuan Narcizo Frisso[1], Manuela Silva Andrade[1], Giovane Guimarães Farias[1], Maria Lucena Calixto[1], Carlos Augusto Cardoso Fernandes[1], Rickson Alves Marques de Oliveira[1], Juliana Lobo Paes[1], Natália Dias de Souza[1]

[1] Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro

Resumo: O composto pós-cultivo (CPC) de *Lentinula edodes*, comumente conhecido como resíduo lignocelulósico gerado durante a produção de cogumelos shiitake, representa um importante subproduto dotado de grande potencial de aproveitamento industrial e energético. No entanto, a sua valorização comercial e ambiental depende fundamentalmente da caracterização minuciosa de sua composição química estrutural. Nesse contexto, este estudo teve como objetivo principal avaliar detalhadamente o efeito proporcionado pelo tratamento alcalino sobre a composição química do CPC. Os resíduos lignocelulósicos investigados foram obtidos diretamente da empresa Senhor Cogumelo Biotecnologia e Agricultura Ltda, situada no município de Magé, no Estado do Rio de Janeiro. Para a condução da metodologia experimental, as amostras coletadas foram submetidas ao procedimento padrão de solubilidade utilizando uma solução de hidróxido de sódio (NaOH) a 1%. Em seguida, procedeu-se à determinação rigorosa dos teores percentuais de holocelulose e de lignina Klason. Os resultados analíticos obtidos permitiram quantificar os componentes e verificar que o tratamento alcalino aplicado não alterou de forma estatisticamente significativa o teor de lignina presente no material. Por outro lado, o processo promoveu um incremento expressivo e benéfico na fração de holocelulose. Desse modo, conclui-se que o tratamento químico com NaOH demonstrou alto potencial para modificar com eficiência a composição do CPC, ampliando de maneira relevante as perspectivas de aplicação tecnológica desse resíduo agroindustrial, sobretudo com foco na geração de energia sustentável.

Palavras-chave: hidróxido de sódio, holocelulose e lignina.

Alkaline Treatment of Lignocellulosic Residue from the Post-Cultivation of *Lentinula edodes* Mushroom for Energy Purposes

Abstract: *Lentinula edodes* spent mushroom substrate (SMS)—commonly known as the lignocellulosic residue generated during shiitake mushroom production—is a significant by-product with great potential for industrial and energy applications. However, its commercial and environmental valorization depends fundamentally on a detailed characterization of its structural chemical composition. In this context, the primary objective of this study was to evaluate in detail the effect of alkaline treatment on the chemical composition of the SMS. The lignocellulosic residues investigated were obtained directly from the company Senhor Cogumelo Biotecnologia e Agricultura Ltda., located in the municipality of Magé, Rio de Janeiro state. For the experimental methodology, the collected samples were subjected to a standard solubility procedure using a 1% sodium hydroxide (NaOH) solution. Subsequently, the percentage contents of holocellulose and Klason lignin were rigorously determined. The analytical results allowed for the quantification of these components and revealed that the applied alkaline treatment did not result in a statistically significant change in the material's lignin content. Conversely, the process brought about a significant and beneficial increase in the holocellulose fraction. Thus, it is concluded that chemical treatment with NaOH demonstrated high potential for efficiently modifying the SMS composition, thereby significantly expanding the prospects for the technological application of this agro-industrial residue, particularly regarding sustainable energy generation.

Keywords: sodium hydroxide, holocellulose and lignin.

1. Introdução

Os cogumelos são fungos macroscópicos compostos por um corpo frutífero, micélio e hifas e se desenvolvem em lugares úmidos ao redor de todo o mundo; seu consumo se dá há milênios, tendo sido vistos como presente dos deuses por grandes civilizações, fonte de energia, alucinógeno e utilizado em pratos culinários, classificado como uma especiaria nobre (RODRIGUES & OKURA, 2022; FURLANI & GODOY, 2007).

São conhecidas aproximadamente 2000 espécies comestíveis e cerca de 25 delas são cultivadas comercialmente. Dentre essas, existem 3 espécies mais comumente cultivadas e

consumidas no Brasil: *A. bisporus*, conhecido como champignon de Paris; *L. edodes*, como Shiitake; e *L. shimeji*, como shimeji (URBEN, et al., 2017).

Lentinula edodes (Berk.) Pegler, conhecido como cogumelo "shiitake", é um fungo basidiomiceto que apresenta propriedades nutricionais, medicinais e antibióticas, é a segunda mais importante espécie de cogumelo comestível cultivada no mundo, ficando atrás apenas do "champignon" de Paris (*Agaricus bisporus*). A produção mundial é crescente, sendo a China o principal país produtor. No Brasil, a produção de "shiitake" está se expandindo, principalmente nas regiões sul e sudeste, dadas as condições climáticas favoráveis (PICCININ, et al, 2010).

Ademais, há uma expectativa no aumento do consumo de cogumelos pelos brasileiros nos próximos anos pela Associação Nacional dos Produtores de Cogumelos (ANPC), principalmente por conta do marketing realizado com relação aos benefícios do seu consumo, além de uma maior popularidade da culinária asiática e o aumento de vegetarianos e veganos no país (GOMES, 2018).

No entanto, juntamente com a intensificação da produção de cogumelos, uma enorme quantidade de subprodutos têm sido gerada, incluindo o composto pós-cultivo de cogumelo (CPC), o rendimento do processo varia entre 20-25%. Apesar de ser um subproduto de excelente qualidade e versátil, ainda é tratado como rejeito e eliminado por incineração ou enviado para aterros sanitários (MOHD HANAFI et al., 2018; LEONG et al., 2022).

Para a valoração desse material (CPC), é importante conhecer a sua composição química. O conhecimento da natureza química de um material possibilita reconhecer o seu comportamento como matéria-prima para diversos usos. Materiais lignocelulósicos são fibrosos, formam matrizes complexas constituídas de celulose (um rígido polímero de glicose), hemiceluloses, pectinas e outras gomas. Estas são impregnadas com lignina, a qual pode ser considerada como uma cobertura de resina plástica (CASTRO, 2009).

A fim de ter uma definição para o potencial uso de um material lignocelulósico é necessário compreender a sua estrutura, composição e comportamento. Alguns tratamentos específicos podem ser utilizados, como tratamentos por oxidação usando peróxido de hidrogênio, ozônio, tratamento ácido e tratamento alcalino (SISTONS et al. 2022).

O tratamento com uma solução de hidróxido de sódio (NaOH) (alcalino) é um dos tratamentos mais antigos e economicamente viáveis para biomassa (ESMERALDO et al., 2010), amplamente utilizado para reduzir o teor de lignina, aumentar a produção de açúcares fermentáveis e melhorar a eficiência energética da biomassa (SISTONS et al. 2022).

Este estudo teve como objetivo avaliar o efeito do tratamento alcalino (NaOH)

do CPC de *Lentinula edodes* em relação à sua composição química.

2. Material e métodos

2.1. Material

Para este estudo foi obtida a biomassa do composto pós-cultivo de cogumelo L. edodes (CPC) da empresa Senhor Cogumelo Biotecnologia e Agricultura Ltda, localizada no Município de Magé, Estado do Rio de Janeiro.

Os CPC foram transportados para o Laboratório de Química da Madeira do Departamento de Produtos Florestais (IF-UFRRJ) e armazenados em sala climatizada a 25º C.

2.2. Umidade

O teor de umidade para o material lignocelulósico foi determinado pelo método da norma ABNT NBR 14929:2003, em que se aplica a seguinte equação:

$$\%\ Umidade = [(PU - PS)(Ps)] * 100$$

Em que:

PU = peso da massa úmida;

PS = Peso final da amostra seca e estabilizada;

2.3. Preparação da amostra livre de extrativos

O material foi moído em moinho tipo Willey. A fração utilizada foi aquela que ficou retida na peneira de malha 60 mesh. Foram colocados 93 g da amostra homogeneizada em cartuchos de papel filtro e em seguida submetida a três extrações sucessivas com ciclo hexano, acetato de etila e metanol por 12 horas em aparelho soxhlet, utilizando-se 1 L de cada solvente por extração (ABREU et al., 2006).

2.4. Análises Químicas

2.4.1 Solubilidade em hidróxido de sódio (NaOH)

As amostras da biomassa do composto pós-cultivo de cogumelo *L. edodes* foram submetidas ao procedimento de solubilidade em NaOH (ABREU et al., 2006), onde 5g de material seco foi colocado em erlenmeyer com 250 ml de solução de hidróxido de sódio 1%, agitando com bastão de vidro. As amostras reacionais foram cobertas com vidro de relógio e colocadas em banho-maria a aproximadamente 90ºC por 60 minutos, sendo agitadas com bastão de vidro nos primeiros 10, 15 e 20 minutos. As amostras foram transferidas para um funil e lavada com 500mL de água quente, e em seguida foram adicionados 125mL de ácido acético 10% e mantidas por 1 minuto antes da sua remoção. Após este procedimento, as amostras foram

lavadas com água destilada até ficarem completamente livre do ácido e colocada em estufa à 103ºC até peso constante e então pesadas.

2.4.2 Teor de Lignina de Klason

Para a determinação do teor de lignina, as amostras anteriormente solubilizadas em NaOH 1% e a amostra controle, foram submetidas ao procedimento de lignina de Klason. Sendo, desta forma, pesados, aproximadamente, 300mg de amostra seca e livre de extrativos e tratada com 3mL de ácido sulfúrico 72%. As amostras foram homogeneizadas durante 1 minuto e conservadas por 1 hora entre 25 e 30ºC em banho maria, sendo em seguida diluído em 84mL de água destilada, permanecendo em refluxo por 4 horas. Logo após, o material foi lavado com 500 mL de água destilada quente, em um funil de placa sinterizada, previamente tarado e identificado, em seguida levado à estufa a 103ºC durante 24 horas. Após este período foi realizada uma nova pesagem (ABREU et al., 2006). Foram realizadas duas repetições na amostra sem tratamento e três repetições na amostra com tratamento. O teor de lignina foi calculado por meio da equação:

Teor de Lignina (%) = (Peso da Lignina (g) * 100) / Peso da Amostra (g)

2.4.3 Teor de holocelulose por Cloração

Para a determinação de holocelulose por cloração, foram pesados 2,5g de cada amostra solubilizada em NaOH a 1%, adicionados 0,5mL de ácido acético, 1g de clorito de sódio e 80mL de água destilada, e coberta com vidro relógio. A mistura foi mantida em banho maria a 70ºC. A cada hora foram adicionados mais 0,5mL de ácido acético e 1g de clorito de sódio, até a completa separação das fibras da lignina. Após 6h horas as amostras foram mantidas em repouso, sem adição de qualquer reagente, por 24h. O material foi lavado em funil de placa sinterizada, sob vácuo, com água deionizada até a cor amarela e o odor de cloro desaparecer por completo, e depois colocado em estufa a 103ºC durante 24 horas (ABREU et al, 2006). A Determinação de holocelulose para cada amostra solubilizada com NaOH e a amostra controle foi realizada em duplicata no sem tratamento e triplicata no com tratamento. O teor de holocelulose foi calculado por meio da equação:

Teor de Holocelulose (%) = (Peso da Celulose (g) * 100) / Peso da Amostra (g)

2.5 Análise dos dados

A análise dos dados foi realizada com o auxílio do software Microsoft Excel (versão 365/2021). Para as variáveis estudadas (Teor de Holocelulose e Teor de Lignina), após a confirmação dos pressupostos de normalidade e homogeneidade de variâncias, os dados foram submetidos à Análise de Variância (ANOVA) simples, seguindo um delineamento inteiramente

casualizado em função dos níveis de concentração de hidróxido de sódio (NaOH). Para a comparação das médias, aplicou-se o teste de Tukey ao nível de 5% de significância ($p<0,05$), sendo os cálculos estruturados e executados diretamente em planilhas eletrônicas.

3. Resultados e discussão

Pode-se verificar a caracterização química do CPC de *Lentinula edodes* após o tratamento alcalino (Tabela 1), onde estão presentes os teores de holocelulose e de lignina (Figura 1).

Tabela 1 - Caracterização química do CPC de *Lentinula edodes.* T0 (sem tratamento) e T1 (com tratamento).

	Holocelulose %	**Lignina %**
T0	56,52 a	13,67 a
T1	66,57 b	13,32 a

Médias seguidas pela mesma letra, na coluna, não diferem entre si pelo Teste Tukey ($p \geq 0,05$).

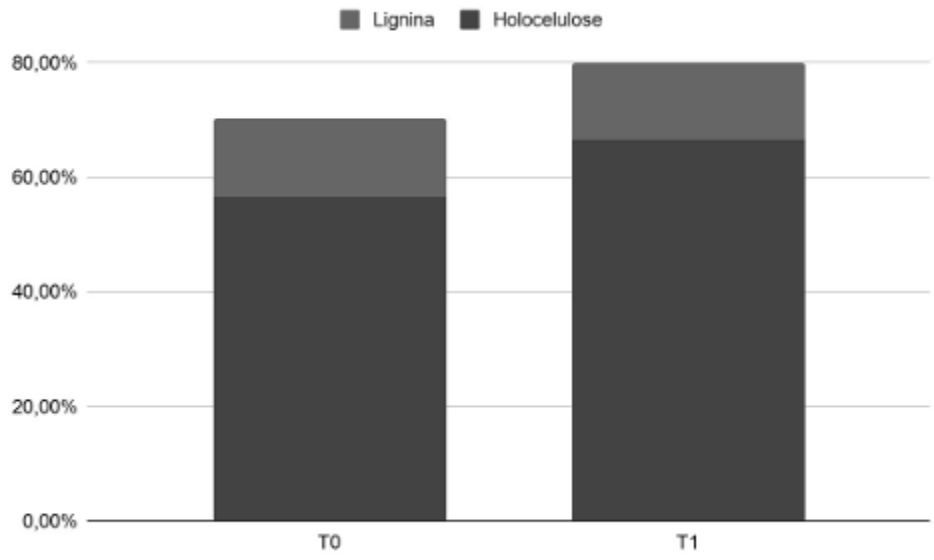


Figura 1: Teores de holocelulose e lignina do CPC de *Lentinula edodes* (T0) e (T1).

Observa-se que o teor de lignina não alterou estatisticamente em relação ao tratamento alcalino, sendo o menor valor para a amostra tratada. Já com relação à holocelulose, o teor aumentou à medida que efetuou-se o tratamento (Tabela 1 e Figura 1).

Esse resultado foi semelhante ao observado por TSEGAYE et al. (2019) para a palha de trigo, em que o tratamento com NaOH resultou em um aumento de aproximadamente 30% no teor de açúcares (holocelulose). Também foi semelhante aos resultados em SISTONS et al. (2022) para fibra de coco, onde foi observado aumento da holocelulose no tratamento com concentrações diferentes de NaOH (2%, 3%, 4%).

O pré-tratamento alcalino com hidróxido de sódio (NaOH) destaca-se como uma das metodologias mais tradicionais e de menor custo utilizadas no processamento de biomassa (ESMERALDO et al., 2010). Essa técnica é amplamente aplicada para promover a remoção da lignina, aumentar a disponibilidade de açúcares fermentáveis e otimizar o aproveitamento energético da biomassa (SISTONS et al., 2022).

O pré-tratamento alcalino é uma técnica utilizada na biomassa lignocelulósica para a extração de lignina e a solubilização parcial da hemicelulose, além de aumentar a acessibilidade da celulose. As soluções de hidróxido de sódio (NaOH) têm demonstrado grande eficácia nesse processo, devido à sua capacidade de romper as ligações éster e facilitar a separação dos componentes da biomassa (KOCABAS; KOLE; YAGCI, 2020).

Um pré-tratamento pode promover a melhoria da acessibilidade das fibras da celulose diminuindo sua recalcitrância, aumentando a acessibilidade à estrutura da celulose e dos monômeros. Portanto, a aplicação de um pré-tratamento à biomassa lignocelulósica, tem como finalidade disponibilizar os açúcares fermentescíveis presentes na celulose (glicose) e na hemicelulose (xilose, arabinose, glicose, manose e galactose), além de outras moléculas menores, permitindo que o material encontre-se atrativo para utilização em processos fermentativos, como a digestão anaeróbia. (COSTA et al. 2014)

4. Conclusões

Conclui-se que o tratamento alcalino com hidróxido de sódio (NaOH) promoveu alterações na composição química do CPC de *Lentinula edodes*, evidenciadas pelo aumento do teor de holocelulose. Esse resultado indica que o tratamento foi eficaz no enriquecimento da fração holocelulósica, característica desejável para aplicações que visam o aproveitamento da biomassa lignocelulósica, como a produção de energia.

5. Agradecimentos

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela concessão da bolsa de Iniciação Científica, que possibilitou o desenvolvimento desta pesquisa e ao Laboratórios de Pesquisas Multiusuários do Grupo de Energias Renováveis e Alternativas Rurais (LabGERAR), da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro.

6. Referências bibliográficas

- ABREU, H. S.; CARVALHO, A. M.; MONTEIRO, M. B. O.; PEREIRA, R. P. W.; SILVA, H. R.; SOUZA, K. C. A.; AMPARADO, K. F.; CHALITA, D. B. Métodos de Análise em Química da Madeira. **Floresta e Ambiente**, Série Técnica, p 01-20, 2006.
- CASTRO, H. F. **Apostila: Processos Químicos Industriais II** - PAPEL E CELULOSE. Eel - Usp, p. 30, 2009. Disponível em: <http://sistemas.eel.usp.br/docentes/arquivos/5840556/434/apostila4papelecelulose.pdf>.
- COSTA, A. G.; PINHEIRO, F. G. C.; PINHEIRO, G. C.; SANTOS, A. B. dos; SANTAELLA, S. T.; LEITÃO, R. C. Geração de metano a partir de resíduos lignocelulósicos oriundos da produção de biocombustível: revisão. **Revista DAE**, v. 194, n. 1, 2014.
- ESMERALDO, M. A., GOMES, A. C., FREITAS, J. E., FECHINE, P. B., SOMBRA, S., CORRADINI, E., MELE, G., MAFFEZZOLI, A., MAZZETO, S.E. Dwarf-green coconut fibers: a versatile natural renewable raw bioresource. Treatment, morphology, and physicochemical properties. **BioResources**, v. 5, n. 4, 2478-2501, 2010.
- FURLANI, R. P.; GODOY, H. T. Valor nutricional de cogumelos comestíveis. **Ciênc. Tecnol. Aliment.**, v. 27, n. 1, p 154-157, 2007.
- GOMES M. **Agronegócio: Consumo e produção de cogumelos cresce no Brasil [internet]**. Brasília; 2018. [Acesso em: 08 mar. 2021]. Disponível em: https://www.correiobraziliense.com.br/app/noticia/economia/2018/01/29/internas_economia,656318/consumo-e-producao-de-cogumelos-no-brasil.shtml
- KOCABAŞ, D. S.; KÖLE, M.; YAĞCI, S. Development and optimization of hemicellulose extraction bioprocess from poppy (Papaver somniferum L.) stalks

assisted by instant controlled pressure drop (DIC) pretreatment. **Biocatalysis and Agricultural Biotechnology**, v. 29, e101793, 2020.

- MOHD HANAFI, F.H.; REZANIA, S.M.T.; Md DIN, M. F.; YAMAUCHI, M.; SAKAMOTO, M.; HARA, H.; PARK, J.; EBRAHIMI, S.S. Environmentally sustainable applications of agro-based spent mushroom substrate (SMS): an overview. **Journal of Material Cycles and Waste Management**, v. 20, n. 3, p.1383-1396, 2018.
- PICCININ, E.; PIERO, R. M. D.; Sérgio Florentino PASCOHOTI, S. F. Cogumelo "shiitake" (Lentinula edodes) reduz o crescimento de fitopatógenos e a severidade de manchas foliares em sorgo. **Summa phytopathol**. v. 36, n. 1, 2010.
- RODRIGUES, G. M.; OKURA, M. H. Cogumelos comestíveis no Brasil: uma revisão bibliográfica. **Research, Society and Development**, v. 11, n. 8, e24711830830, 2022.
- SISTONS; R. D. CUPERTINO. G. F. M.; SAMPAIO, D. A.; JÚNIOR, A. J. S.; SOUZA, N. D.; JÚNIOR, A. F. D. Investigating the alkaline treatment of fiber coconut (Cocos nucifera L) for cellulosic ethanol Generation. **Adv. For. Sci**, v. 9, n. 4, p. 1893-1901, 2022. DOI: https://doi.org/10.34062/afs.v9i4.13219.
- Tsegaye B, Balomajumder C, Roy P. (2019). Optimization of microwave and NaOH pretreatments of wheat straw for enhancing biofuelyield. **Energy Conversion and Management**, 186:82-92. doi: https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.02.049
- URBEN, A. F. **Produção de cogumelos por meio de tecnologia chinesa modificada: biotecnologia e aplicações na agricultura e na saúde**. Brasília: Embrapa, 2017.

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Utilização da tecnologia LiDAR na determinação de madeira enfornada em fornos de carbonização

Isabella Santana Sampaio[1]; João Câncio de Andrade Araújo[2]; Luciano Junqueira Costa[2]; Carolina Maria Filardi Cimino Silva[1]; Bráulio da Silva de Oliveira[1]; Angélica de Cássia Oliveira Carneiro[1]

[1] Universidade Federal de Viçosa
[2] ASIFLOR

Resumo: Um dos principais desafios da produção de carvão vegetal é a quantificação precisa do volume de madeira enfornada. Este estudo avaliou a aplicação do software Pixlog, baseado em tecnologia LiDAR, na determinação do volume de madeira e no monitoramento da carbonização. Foram comparadas as medições de 632 toras obtidas por cubagem manual e pelo software. A cubagem manual demandou 153 minutos, enquanto o Pixlog realizou a medição em 5 minutos e 35 segundos. Os métodos apresentaram resultados semelhantes, com volumes de 8,186 e 8,188 m³, respectivamente, e diferenças inferiores a 0,1% nas variáveis diamétricas. O software foi aplicado em 25 boxes de madeira, registrando volume médio enfornado de 7,34 m³, aproximadamente 696 toras e diâmetro médio de 9,03 cm. O Pixlog apresentou precisão na mensuração da madeira e potencial para otimizar o controle de estoque, a quantificação de matéria-prima e o monitoramento operacional da produção de carvão vegetal.

Palavras-chave: Pixlog; cubagem; carvão vegetal.

Use of LiDAR Technology in the Determination of Wood Loaded into Carbonization Kilns

Abstract: One of the main challenges in charcoal production is the accurate quantification of the volume of wood loaded into kilns. This study evaluated the application of the Pixlog software, based on LiDAR technology, for determining wood volume and monitoring the carbonization process. Measurements of 632 logs obtained through manual scaling and LiDAR-based estimation were compared. Manual scaling required 153 minutes, whereas Pixlog performed the measurement in 5 minutes and 35 seconds. The methods showed similar results, with volumes of 8.186 and 8.188 m³, respectively, and differences below 0.1% in diameter-related variables. The software was applied to 25 wood storage units, recording an average loaded volume of 7.34 m³, approximately 696 logs, and an average log diameter of 9.03 cm. Pixlog demonstrated accuracy in wood measurement and potential to optimize inventory control, raw material quantification, and operational monitoring in charcoal production.

Keywords: Pixlog; Scaling; Charcoal.

1. Introdução

A mensuração precisa dos volumes de madeira destinados à carbonização constitui um dos principais desafios da produção de carvão vegetal. A determinação do

volume de madeira é essencial, pois fornece informações quantitativas e qualitativas indispensáveis ao controle do processo produtivo. Além de subsidiar a etapa de carbonização, a quantificação volumétrica desempenha papel estratégico em toda a cadeia florestal (Borz et al., 2022), sendo fundamental para o planejamento e a gestão das operações. A estimativa precisa do volume influencia diretamente a logística de transporte, o controle de estoques nas unidades de produção e a remuneração de serviços florestais, como as operações de colheita (Picchio et al., 2019; Proto et al., 2020).

Apesar dos avanços tecnológicos observados no setor florestal, a mensuração da madeira ainda é predominantemente realizada por métodos convencionais, destacando-se a determinação do volume estéreo e sua posterior conversão para volume sólido por meio de fatores de empilhamento. Entretanto, sob a perspectiva técnica, esse método apresenta limitações relacionadas às incertezas inerentes ao processo de medição, à elevada variabilidade operacional (Gejdoš et al., 2025), ao tempo necessário para sua execução (Berendt et al., 2021) e aos elevados custos operacionais. Adicionalmente, a irregularidade da seção transversal das toras representa outra importante fonte de erro, reduzindo a precisão das estimativas obtidas por métodos manuais.

Nesse contexto, a incorporação da tecnologia Light Detection and Ranging (LiDAR) em smartphones e tablets surge como uma alternativa promissora para a mensuração de pilhas de madeira. Os sensores LiDAR de amostragem terrestre podem ser do tipo *Terrestrial Laser Scanner* (TLS – *Terrestrial Laser Scanner*) ou *Personal Laser Scanner* (PLS – *Personal Laser Scanner*), que fornecem nuvens de pontos densas e precisas das árvores. Os sensores LiDAR operam por meio da emissão de pulsos de laser e da captação dos sinais refletidos, permitindo determinar com elevada precisão a distância entre o sensor e a superfície dos objetos (Behroozpour et al., 2017). A integração dessa tecnologia a dispositivos móveis tornou sua utilização mais acessível e economicamente viável, ampliando seu potencial de aplicação em atividades operacionais do setor florestal.

Outra vantagem dos sensores LiDAR em relação aos sistemas baseados exclusivamente em câmeras está relacionada à menor dependência das condições de iluminação ambiente, uma vez que esses sensores realizam a aquisição tridimensional por meio da emissão e recepção de pulsos laser, caracterizando-se como sensores ativos (Purfürst et al., 2023). Em comparação com sistemas monoculares, os sensores LiDAR também apresentam a vantagem de dispensar medições auxiliares de distância e o

alinhamento rigoroso do dispositivo em relação à face da pilha, contribuindo para a obtenção de estimativas mais robustas e confiáveis. Entre as soluções desenvolvidas com base nessa tecnologia, destaca-se o Pixlog, um software de mensuração florestal que utiliza sensores LiDAR do tipo PLS, embarcados em dispositivos móveis para realizar a reconstrução tridimensional de pilhas de madeira e estimar seus volumes de forma rápida e automatizada.

Considerando que a aplicação da tecnologia LiDAR na mensuração de pilhas de madeira ainda é relativamente recente e que seu desempenho na cadeia produtiva do carvão vegetal permanece pouco explorado, torna-se necessária a avaliação de sua precisão e aplicabilidade nesse contexto. Assim, o presente estudo teve como objetivo comparar os volumes de madeira obtidos por meio da cubagem manual com aqueles estimados pelo software Pixlog, baseado em tecnologia LiDAR, avaliando seu potencial na determinação do volume de madeira enfornada e monitoramento da produção de carvão vegetal.

2. Material e métodos

O estudo foi conduzido em uma área sob regime de arrendamento pertencente à Associação das Siderúrgicas para Fomento Florestal (ASIFLOR), localizada no município de Francisco Dumont, Minas Gerais, Brasil. As medições foram realizadas em boxes de madeira destinados ao abastecimento de fornos para a produção de carvão vegetal. A madeira utilizada era proveniente de plantios clonais de *Eucalyptus* sp., com aproximadamente 65 meses de idade.

A determinação manual do volume de madeira foi realizada por meio da mensuração individual das toras presentes no box de madeira. Para cada tora, foram medidos o maior e o menor diâmetro da seção transversal de uma das extremidades, utilizando-se uma trena métrica. O diâmetro médio de cada tora foi obtido pela média aritmética entre os dois valores mensurados, visando reduzir os efeitos da irregularidade geométrica da seção transversal. Ao todo, foram mensurados os diâmetros de 632 toras, sendo o comprimento médio determinado a partir da medição de 50 toretes selecionados na pilha de madeira. Posteriormente, utilizando-se os valores médios de diâmetro e comprimento, foi estimado o volume individual das toras. O volume sólido total da pilha foi obtido pelo somatório dos volumes individuais de todas as toras mensuradas.

A mensuração automatizada do volume de madeira foi realizada utilizando-se o software Pixlog, desenvolvido pela empresa Pixlog, que utiliza sensores LiDAR integrados ao iPad para a aquisição de dados tridimensionais das pilhas de madeira. As medições foram realizadas utilizando-se a função específica de mensuração de pilhas do software Pixlog. Essa ferramenta permite a identificação individual das toras, fornecendo informações referentes ao volume total de madeira, à distribuição diamétrica, à identificação individual das toras e aos dados coletados.

O software Pixlog também foi utilizado para determinar o volume de madeira efetivamente destinado ao processo de carbonização. Para essa avaliação, foram mensurados 25 boxes de madeira antes do carregamento dos fornos. Após a medição inicial, realizou-se o carregamento dos fornos conforme o procedimento operacional adotado pela unidade de produção. Nos casos em que houve sobra de madeira após o carregamento, o volume remanescente foi novamente mensurado e descontado do volume inicialmente determinado. Dessa forma, foi possível estimar o volume real de madeira enfornada, bem como obter informações complementares, como a quantidade de toras utilizadas e o diâmetro médio da madeira destinada à carbonização.

As carbonizações foram realizadas em fornos de alvenaria do tipo circular de superfície, com diâmetro de 3,0 m, altura da camisa de 1,5 m e altura máxima na região da copa de 2,06 m. O volume útil médio dos fornos foi estimado em 12,68 m³. Após o término do processo de carbonização, os fornos foram descarregados, e o carvão vegetal produzido foi quantificado utilizando-se caixotes volumétricos com capacidade individual de 1 m³. O rendimento volumétrico da carbonização foi determinado a partir da relação entre o volume de carvão vegetal produzido e o volume de madeira efetivamente enfornado.

3. Resultados e discussão

Na Tabela 1 são apresentados os resultados obtidos na cubagem manual da madeira e nos resultados obtidos com o aplicativo da Pixlog. Foram comparados a quantidade de toras medidas, volume total cubado (m³).

Tabela 1 – Comparação entre os resultados obtido pela cubagem manual e os resultados obtidos com o software da Pixlog.

Parâmetros	Cubagem Manual	Pixlog
Quantidade de toras medidas	632	632
Volume Cubagem (m³)	**8,186**	**8,188**
Volume médio das toras (m³)	0,01295	0,0130
Volume máximo (m³)	0,0562	0,0559
Volume mínimo (m³)	0,00165	0,00152
Diâmetro Médio (cm)	9,93	9,99
Diâmetro máximo (cm)	21,85	21,79
Diâmetro mínimo (cm)	3,75	3,52

Para a realização da cubagem manual das 632 toras, foram necessários 153 minutos, enquanto o tempo total para o escaneamento da pilha de madeira utilizando o software Pixlog foi de 5 minutos e 35 segundos. Esse resultado evidencia uma redução no tempo de aquisição dos dados quando comparado ao método convencional, reforçando o potencial da tecnologia LiDAR para aumentar a eficiência operacional em atividades de mensuração de madeira.

A pilha analisada continha 632 toras, todas corretamente identificadas pelo algoritmo, o que demonstra sua elevada capacidade de segmentação individual mesmo em uma pilha contendo toras de diferentes classes diamétricas, aspecto fundamental para a obtenção de estimativas confiáveis de diâmetro e volume.

Em relação à estimativa volumétrica, o volume calculado pelo software foi apenas 0,0244% superior ao obtido pela cubagem manual. Essa diferença é pequena e indica concordância entre os métodos, sugerindo que a tecnologia é capaz de fornecer estimativas de volume compatíveis com o procedimento convencional.

A comparação dos diâmetros médios também demonstrou precisão do método. O diâmetro médio estimado pelo software Pixlog foi apenas 0,06 cm (aproximadamente 0,60%) superior ao obtido pela cubagem manual, evidenciando que o sistema reproduz com fidelidade as dimensões das toras. Da mesma forma, as diferenças observadas para os valores extremos foram reduzidas: o maior diâmetro medido manualmente excedeu em apenas 0,06 cm o maior diâmetro estimado pelo software, enquanto o menor diâmetro obtido na cubagem manual foi 0,23 cm superior ao menor diâmetro identificado pelo sistema.

Na Tabela 2 são apresentados os volumes de madeira enfornados, medidos com o software da Pixlog. Pode-se observar que além da quantificação volumétrica, o Software da Pixlog gerou, também, a quantidade de toras e o diâmetro médio da madeira medida.

Tabela 2. Volume de madeira enfornada e volume de carvão vegetal obtido, após o processo de carbonização

Nº Fornos	Volume enfornado (m³)	Quantidade de toras enfornadas	Diâmetro médio (cm)	Volume de carvão vegetal (mst)	Fator de conversão
1	7,69	675	9,37	6,00	1,282
2	7,74	723	8,97	6,00	1,290
3	6,93	624	9,23	6,00	1,155
4	8,08	755	9,10	6,50	1,243
5	7,89	750	9,00	6,00	1,315
6	7,24	741	8,66	5,50	1,316
7	7,31	726	8,86	6,50	1,125
8	8,04	796	8,81	6,00	1,340
9	6,63	666	8,83	5,50	1,205
10	7,57	786	8,71	5,50	1,376
11	6,73	669	8,87	6,00	1,122
12	7,50	694	9,22	5,50	1,364
13	6,54	659	8,76	5,50	1,189
14	7,28	638	9,33	6,00	1,213
15	6,40	637	8,89	5,50	1,164
16	6,98	610	9,46	6,00	1,163
17	8,09	730	9,30	6,50	1,245
18	7,10	612	9,35	5,50	1,291
19	6,78	657	8,85	6,00	1,130
20	7,60	726	9,02	5,50	1,382
21	7,85	716	9,23	5,50	1,427
22	7,56	699	9,12	6,00	1,260
23	7,99	698	9,26	6,50	1,229
24	7,21	722	8,77	6,00	1,202
25	6,83	679	8,83	6,00	1,138

O volume médio de madeira enfornada foi de 7,34 m³ por forno, resultando em um volume útil médio de aproximadamente 12,06 m³. Dessa forma, o fator médio de ocupação dos

fornos foi de 0,5789. O volume médio de madeira enfornada correspondeu a aproximadamente 57,89% do volume útil dos fornos, indicando que mais da metade do volume útil foi efetivamente preenchida com madeira.

O fator de ocupação do forno constitui um importante indicador operacional, uma vez que influencia diretamente a eficiência térmica do processo de carbonização. Baixos níveis de ocupação do forno tendem, também, a aumentar as perdas de calor para o ambiente, reduzindo a eficiência energética do sistema e comprometendo a produtividade do forno. Por outro lado, taxas inadequadas de ocupação podem alterar as condições de

transferência de calor no interior da carga, ocasionando heterogeneidade na carbonização e maior variabilidade na qualidade do carvão produzido (Oliveira et al., 2010; Protásio et al., 2014).

A quantidade média de toras enfornadas foi de 696 unidades, tendo um diâmetro médio da madeira de 9,03 cm. O conhecimento dessas variáveis é essencial para o controle do processo de carbonização, uma vez que as características dimensionais da madeira influenciam a transferência de calor no interior das toras e o tempo necessário para a carbonização completa. Além disso, características intrínsecas da madeira, como densidade básica e composição química, também exercem papel determinante na eficiência da conversão e na qualidade do carvão produzido (Assis et al., 2012; Protásio et al., 2014; Donato et al., 2020).

Nos sistemas de carbonização que utilizam controle operacional baseado em curvas de temperatura, o conhecimento prévio das características dimensionais da madeira, especialmente o diâmetro médio das toras, permite adequar as condições do processo às características da matéria-prima, contribuindo para a definição de ciclos de carbonização mais eficientes. A variação do diâmetro da madeira influencia a transferência de calor no interior das toras e pode afetar a evolução da carbonização, o rendimento do processo e as propriedades do carvão vegetal produzido (Donato et al., 2020; Oliveira et al., 2021).

A produção média de carvão vegetal foi de 5,90 m.d.c., resultando em um índice médio de conversão de madeira para carvão de 1,24 m^3 de madeira por metro de carvão (m.d.c.). O índice de conversão representa um dos principais indicadores técnicos da eficiência da carbonização, pois expressa o volume de madeira necessário para produzir uma unidade de carvão vegetal. Quanto menor esse índice, maior é o aproveitamento da matéria-prima e, consequentemente, maior a eficiência do processo.

A variação observada entre os fornos evidencia que fatores operacionais, como a uniformidade do carregamento, a distribuição diamétrica da madeira, o controle da entrada de ar, o tempo de residência e a condução da carbonização, podem influenciar significativamente o rendimento do processo. Além disso, características intrínsecas da madeira, como densidade básica, teor de umidade e composição química, também exercem papel determinante na eficiência da conversão e na qualidade do carvão produzido (Donato et al., 2020; Oliveira et al., 2021; Protásio et al., 2014)

Assim, o monitoramento contínuo dessas variáveis constitui uma ferramenta importante para reduzir a variabilidade operacional, aumentar a produtividade e melhorar o desempenho dos sistemas de produção de carvão vegetal.

4. Conclusões

Os resultados obtidos pela cubagem manual e pelo software Pixlog foram similares, não sendo encontradas divergências em relação à quantidade de toras captadas e ao diâmetro médio das toras. O software mostrou-se eficiente na captura das faces transversais das toras e, posteriormente, na determinação do volume da pilha. Tendo como base a comparação com a cubagem manual, constatou-se que o software Pixlog é preciso na determinação do volume de madeira e pode ser utilizado na quantificação de estoques de lenha. A utilização do software Pixlog na quantificação do volume de madeira enfornada mostrou-se prática e rápida, podendo ser empregada na determinação do volume de madeira enfornada e como ferramenta de auxílio à gestão operacional do processo de carbonização.

Por meio do uso do software, constatou-se que o volume médio de madeira enfornada nos fornos foi de 7,34 m³. Com base no resultado da produção de carvão, foi encontrado um fator médio de conversão de 1,24. A análise do fator de conversão de madeira em carvão vegetal constitui um importante indicador que deve ser monitorado para a melhoria do processo de carbonização.

De maneira geral, as diferenças entre os valores observados na mensuração manual e aqueles obtidos pelo software foram inferiores a 0,1%, tanto para a estimativa dos diâmetros quanto para o volume da pilha, e estiveram associadas à significativa redução no tempo de aquisição dos dados. Portanto, essa precisão evidencia o potencial do uso de sensores LiDAR embarcados em dispositivos móveis como uma alternativa eficiente para a mensuração de pilhas

de madeira, contribuindo para aumentar a produtividade das operações e reduzir a influência de erros associados às medições manuais.

Entre as dificuldades observadas na utilização do sistema Pixlog, destaca-se a representação da face de toras que apresentam a seção transversal em formato de bisel. A detecção e a segmentação de toras inseridas no interior da pilha devem ser direcionadas ao sensor LiDAR, pois para a detecção da tora, é necessário realizar o seu mapeamento e captar completamente a face da madeira, de modo a evitar a subestimação do diâmetro.

5. Agradecimentos

Os autores agradecem a Pixlog e ASIFLOR pela oportunidade de realização da pesquisa.

6. Referências bibliográficas

Assis, M. R., Protásio, T. P., Assis, C. O., Trugilho, P. F., & Santana, W. M. S. (2012). Qualidade e rendimento do carvão vegetal de um clone híbrido de *Eucalyptus grandis* × *Eucalyptus urophylla*. *Pesquisa Florestal Brasileira, 32*(71), 291–302. https://doi.org/10.4336/2012.pfb.32.71.291.

Behroozpour, B.; Sandborn, P. A. M.; WU, M. C.; Boser, B. E. Lidar system architectures and circuits. IEEE Communications Magazine, v. 55, n. 10, p. 135-142, 2017. https://doi.org/10.1109/MCOM.2017.1700030

Berendt, F.; Wolfgramm, F.; Cremer, T. Reliability of photo-optical measurements of log stack gross volume. *Silva Fennica,* v. 55, n. 3, art. 10555, 2021. https://doi.org/10.14214/sf.10555.

Borz, S. A.; Proto, A. R. Application and accuracy of smart technologies for measurements of roundwood: evaluation of time consumption and efficiency. Computers and Electronics in Agriculture, v. 197, art. 106990, 2022. https://doi.org/10.1016/j.compag.2022.106990.

Oliveira, A. C., Ramos, D. C., Pereira, B. L. C., & Carneiro, A. C. O. (2021). Temperatura de carbonização e propriedades do carvão vegetal ao longo de um forno retangular. *Agrária - Revista Brasileira de Ciências Agrárias*, *15*(4), 1–8. https://doi.org/10.5039/agraria.v15i4a8493.

Donato, D. B., Carneiro, A. C. O., Carvalho, A. M. L. M., Vital, B. R., Milagres, E. G., & Canal, W. D. (2020). Influência do diâmetro da madeira de eucalipto na produtividade e propriedades do carvão vegetal. *Ciência da Madeira (Brazilian Journal of Wood Science)*, *11*(2), 63–73. https://doi.org/10.12953/2177-6830/rcm.v11n2p63-73.

Gejdoš, M.; Lieskovský, M.; Ferenčík, M. Analysis and comparison of methods for determining small piles of wood chips using laser scanning technology. *BioResources*, v. 20, n. 1, p. 1807–1819, 2025. https://doi.org/10.15376/biores.20.1.1807-1819.

Oliveira, A. C.; Carneiro, A. C. O.; Vital, B. R.; Almeida, W.; Pereira, B. L. C.; Cardoso, M. T. Parâmetros de qualidade da madeira e do carvão vegetal de *Eucalyptus pellita* F. Muell. *Scientia Forestalis*, v. 38, n. 87, p. 431–439, 2010.

Picchio, R.; Proto, A. R.; Civitarese, V.; Di Marzio, N.; Latterini, F. Recent contributions of some fields of the electronics in development of forest operations technologies. *Electronics*, v. 8, n. 12, 1465, 2019. https://doi.org/10.3390/electronics8121465.

Protásio, T. P.; Goulart, S. L.; Neves, T. A.; Trugilho, P. F.; Ramalho, F. M. G.; Queiroz, L. M. R. S. B. Qualidade da madeira e do carvão vegetal oriundos de floresta plantada em Minas Gerais. *Pesquisa Florestal Brasileira*, v. 34, n. 78, p. 111–123, 2014. https://doi.org/10.4336/2014.pfb.34.78.657

Protásio, T. P.; Trugilho, P. F.; Napoli, A.; Silva, M. G.; Couto, A. M. Mass and energy balance of the carbonization of babassu nutshell as affected by temperature. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 49, n. 3, p. 189–196, 2014.

Proto, A. R.; Bernardini, V.; Cataldo, M. F.; Zimbalatti, G. Whole tree system evaluation of thinning a pine plantation in southern Italy. *Annals of Silvicultural Research*, v. 45, n. 1, p. 44-52, 2020. https://doi.org/10.12899/asr-1849.

Purfürst, T.; De Miguel-Díez, F.; Berendt, F.; Engler, B.; Cremer, T. Comparison of wood stack volume determination between manual, photo-optical, iPad-LiDAR and handheld-LiDAR based measurement methods. *iForest – Biogeosciences and Forestry*, v. 16, n. 4, p. 243-252, 2023. https://doi.org/10.3832/ifor4153-016.

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Valorização de resíduos agroindustriais de Minas Gerais para produção de pellets: Avaliação das propriedades físicas e químicas

Douglas Lamounier Faria [1]; Thiago de Paula Protásio [1]

[1] Departamento de Ciências Florestais, Universidade Federal de Lavras - UFLA, Av. Perimetral, 37200-900, Lavras, MG, Brasil; douglas.faria3@ufla.br

Resumo: Resíduos agroindustriais representam uma matéria-prima subutilizada com potencial valorização para produção de biocombustíveis sólidos. Desta forma, este trabalho avaliou as propriedades de pellets produzidos com resíduos de três culturas agrícolas do estado de Minas Gerais, especificamente bagaço de cana-de-açúcar, casca de arroz e casca de café. Anteriormente a produção dos pellets, as biomassas foram avaliadas pelos teores de umidade e massa específica aparente. Os pellets foram produzidos com diâmetro nominal de 6 mm utilizando uma peletizadora plana horizontal Eng-Maq® 0200v. A qualidade dos pellets foi analisada pelas propriedades físicas (umidade, densidade unitária e densidade a granel) e químicas (materiais voláteis, carbono fixo e cinzas). Pellets produzidos com resíduos de bagaço de cana-de-açúcar e casca de café apresentaram os maiores teores de carbono fixo (19,28 e 21,50%, respectivamente), classificados como A de acordo com a norma de comercialização ISO 17225-6. Assim, os pellets deste estudo são alternativas sustentáveis visando à redução das emissões de CO_2.

Palavras-chave: Densificação; Biocombustíveis sólidos; Resíduos lignocelulósicos.

Valorization of agro-industrial wastes from Minas Gerais for pellet production: Evaluation of physical and chemical properties

Abstract: Agro-industrial wastes represent an underutilized feedstock with considerable potential for valorization in the production of solid biofuels. In this context, the present study evaluated the properties of pellets produced from wastes of three agricultural crops from the state of Minas Gerais, Brazil, namely sugarcane bagasse, rice husk, and coffee husk. Prior to pellet production, the biomass feedstocks were characterized in terms of moisture content and bulk density. The pellets were produced with a nominal diameter of 6 mm using an Eng-Maq® 0200v horizontal flat-die pellet mill. Pellet quality was assessed based on physical properties (moisture content, unit density, and bulk density) and chemical properties (volatile matter, fixed carbon, and ash content). Pellets produced from sugarcane bagasse and coffee husk exhibited the highest fixed carbon contents (19.28% and 21.50%, respectively) and were classified as grade A according to the ISO 17225-6 commercial specification. Thus, the pellets in this study are sustainable alternatives aimed at reducing CO_2 emissions.

Keywords: Densification; Solid biofuels; Lignocellulosic waste.

1. Introdução

A transição para uma matriz energética de baixo carbono tem impulsionado a expansão da bioenergia como estratégia para diversificar as fontes de energia, aumentar a segurança

energética e promover o aproveitamento sustentável de resíduos agroindustriais. No Brasil, a elevada disponibilidade de biomassa lignocelulósica proveniente das cadeias florestal e agrícola confere ao país posição estratégica no desenvolvimento de sistemas energéticos descentralizados (Adeoye et al., 2026). Nesse cenário, Minas Gerais destaca-se pela expressiva produção agropecuária e florestal, pela ampla disponibilidade de resíduos lignocelulósicos e pelo elevado consumo de energia térmica, reunindo condições favoráveis para a valorização energética desses subprodutos. Além de diversificar a matriz energética, o aproveitamento desses resíduos está alinhado aos princípios da bioeconomia e da economia circular, promovendo a redução das emissões de gases de efeito estufa, a mitigação de passivos ambientais e a agregação de valor a materiais tradicionalmente subutilizados (Adeoye et al., 2026).

Entre as alternativas para o aproveitamento energético da biomassa, os pellets destacam-se como um dos biocombustíveis sólidos mais promissores devido à elevada densidade energética, baixa umidade, uniformidade dimensional e facilidade de armazenamento, transporte e alimentação automatizada de sistemas de combustão (Whittaker & Shield, 2017). A peletização promove a densificação da biomassa, aumentando sua densidade a granel e, consequentemente, a eficiência logística e energética. Embora a produção brasileira de pellets ainda seja predominantemente baseada em resíduos da indústria florestal, especialmente serragem e maravalha de *Pinus* e *Eucalyptus*, observa-se crescente interesse na utilização de resíduos agroindustriais como matérias-primas alternativas, ampliando as possibilidades de diversificação da cadeia produtiva e fortalecimento da bioeconomia (Whittaker & Shield, 2017).

Nesse contexto, resíduos como bagaço de cana-de-açúcar, casca de arroz e casca de café apresentam elevado potencial para a produção de pellets em razão de sua ampla disponibilidade e de suas características lignocelulósicas. Entretanto, a qualidade do biocombustível depende de fatores como teor de umidade, granulometria, massa específica aparente, composição química e conteúdo de cinzas, que influenciam diretamente a compactação da biomassa, a formação das ligações interpartículas e o desempenho energético dos pellets (Gilvari et al., 2020). Embora diversos estudos tenham investigado a utilização de resíduos agrícolas para esse fim, ainda são escassas avaliações comparativas envolvendo essas três biomassas produzidas sob as mesmas condições experimentais e considerando simultaneamente suas propriedades físicas e químicas de acordo com os requisitos da série ISO 17225 (Gilvari et al., 2020).

Em Minas Gerais, a elevada concentração de usinas sucroenergéticas, cooperativas cafeeiras, beneficiadoras de arroz e outras agroindústrias resulta na geração de grandes volumes de resíduos lignocelulósicos, muitos dos quais ainda apresentam baixo valor agregado (CONAB, 2026). A conversão desses materiais em pellets representa uma alternativa tecnicamente viável para suprir parte da demanda energética de indústrias e empreendimentos agroindustriais do próprio estado, reduzindo a disposição inadequada de resíduos, diminuindo a dependência de combustíveis fósseis e promovendo cadeias produtivas regionais baseadas nos princípios da economia circular (Gilvari et al., 2020; EPE, 2025). Nesse sentido, a avaliação do potencial energético dessas biomassas constitui importante ferramenta para ampliar sua inserção na matriz bioenergética brasileira.

Diante desse cenário, este estudo propõe uma avaliação comparativa do potencial de valorização energética de três importantes resíduos agroindustriais gerados em Minas Gerais: bagaço de cana-de-açúcar, casca de arroz e casca de café para a produção de pellets. Para isso, foram avaliadas as propriedades das biomassas antes da peletização, bem como as propriedades físicas (teor de umidade, densidade unitária e densidade a granel) e químicas (materiais voláteis, carbono fixo e teor de cinzas) dos pellets produzidos, visando identificar o potencial de cada resíduo como matéria-prima para biocombustíveis sólidos de elevada qualidade e contribuir para a valorização sustentável de resíduos agroindustriais no contexto da bioeconomia e da economia circular.

2. Material e métodos

2.1 Obtenção e preparo da matéria-prima

O bagaço de cana-de-açúcar e a casca de arroz foram obtidos no setor de grandes culturas, enquanto a casca de café no setor de cafeicultura, ambos pertencentes ao campus-sede da Universidade Federal de Lavras (UFLA). As amostras de biomassa lignocelulósica foram moídas para produzir partículas utilizando um moinho de facas Willey (SL 31, Solab; 1750 rpm e 736 W) equipado com uma peneira de 2,0 mm de abertura, visando melhorar a qualidade da compactação dos pellets.

O teor de umidade (base seca) foi determinado de acordo com a norma EN 14774-1 (2010a). A massa específica aparente foi determinada conforme a norma EN 15103 (2010b), utilizando um béquer de vidro de 2,0 L. Todas as análises foram realizadas em triplicata, e os valores apresentados representam a média de três medições. Posteriormente, os resíduos lignocelulósicos foram secos ao ar em temperatura ambiente (~25 °C) até atingirem o teor de umidade de equilíbrio (~12%).

2.2 Produção dos pellets em escala laboratorial

Os resíduos agroindustriais bagaço de cana-de-açúcar, casca de arroz e casca de café foram peletizados, separadamente, utilizando uma peletizadora Eng-Maq® 0200v (capacidade de produção de 110 kg h^{-1}) equipada com matriz plana horizontal de 6 mm de diâmetro e 20 mm de espessura, resultando em uma razão de compressão de 3,33. A peletização foi realizada em temperaturas variando de 80 a 95 °C e sob pressão de 29,42 MPa. Para cada composição, foram produzidos 2 kg de pellets. A Figura 1 ilustra o processo de produção dos pellets.



Figura 1 – Diagrama esquemático do processo de produção dos pellets.

2.3 Caracterização física e química dos pellets

O teor de umidade (base seca) e a densidade a granel foram determinados utilizando procedimentos análogos aos aplicados à biomassa antes da peletização, com três repetições por tipo de pellet, conforme descrito anteriormente. A razão de compactação foi calculada como a relação entre a densidade a granel do pellet e a massa específica aparente da biomassa.

O diâmetro e o comprimento dos pellets foram determinados de acordo com a norma EN 16127 (2012), utilizando 100 pellets de cada composição. A densidade unitária foi calculada pelo método estereométrico com base no diâmetro, no comprimento e na massa de 100 pellets individuais selecionados aleatoriamente de cada composição.

A análise química imediata dos pellets foi realizada para determinar os teores de matéria volátil (MV), cinzas e carbono fixo (CF), de acordo com a norma ASTM D1762-84 (2021). O teor de carbono fixo foi calculado pela diferença (CF = 100 − MV − Cinzas). Para as análises, utilizaram-se três subamostras moídas de cada tipo de pellet, secas em estufa (103 ± 2 °C) e retidas entre as peneiras de 40 mesh (0,420 mm) e 60 mesh (0,250 mm).

2.4 Análise estatística

Os dados foram analisados considerando um delineamento inteiramente casualizado e submetidos à análise de variância (ANOVA), com teste LSD a 5% de significância, para avaliar o efeito das diferentes biomassas residuais nas propriedades físicas e químicas dos pellets. Os dados foram processados utilizando o software Sisvar 5.6.

3. Resultados e discussão

3.1 Caracterização das biomassas

As propriedades físicas dos resíduos agroindustriais utilizados para produção dos pellets são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 – Propriedades físicas das biomassas lignocelulósicas

Biomassa	Umidade (%)*	Massa específica aparente (kg m^{-3})
Bagaço de cana-de-açúcar	12,87 ± 0,23** b	119 ± 11,65 a
Casca de arroz	9,90 ± 0,20 a	212,83 ± 5,68 b
Casca de café	15,19 ± 0,68 c	441,16 ± 21,07 c

* base seca. ** desvio padrão. Médias seguidas pela mesma letra na coluna não diferem significativamente (teste LSD, $p > 0,05$).

Conforme verificado na Tabela 1, os resíduos lignocelulósicos provenientes do agronegócio mineiro diferiram estatisticamente para as propriedades de umidade e massa específica aparente. Os resíduos de casca de café apresentaram o maior teor de umidade (15,19%), diferindo estatisticamente das demais biomassa avaliadas. Por outro lado, o material proveniente do beneficiamento do arroz resultou em menor teor de umidade (9,90%). O teor de umidade da biomassa influencia fortemente a sua densificação durante a peletização e a durabilidade mecânica dos pellets resultantes (Sá et al., 2024).

Em relação à massa específica aparente dos resíduos em estudo, observa-se que a casca de café resultou nos maiores valores médios (441,16 kg m^{-3}). Os valores verificados no presente estudo são inferiores aos reportados por Winter et al. (2025), sendo verificada massa específica aparente de 215,4 kg m^{-3}. Biomassas com massa específica aparente variando de baixa a moderada são geralmente preferidas para a produção de pellets, pois favorecem a densificação, resultando em pellets com maior densidade, resistência mecânica, densidade energética e valor comercial (Fernandez et al., 2017).

3.2 Caracterização dos pellets

As propriedades físicas e químicas dos pellets são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 – Propriedades físicas e químicas dos pellets de resíduos agroindustriais

Propriedade	Bagaço de cana-de-açúcar	Casca de arroz	Casca de café
Umidade (%)*	6,54 ± 0,33** a	8,83 ± 0,30 b	10,64 ± 1,88 c
Densidade à granel (kg m^{-3})	763,83 ± 16,16 a	781,17 ± 45,23 a	786,0 ± 16,11 a
Razão de compactação	6,46 ± 0,66 c	3,67 ± 0,30 b	1,78 ± 0,06 a
Diâmetro (mm)	6,30 ± 0,27 c	6,23 ± 0,12 b	6,03 ± 0,13 a
Comprimento (mm)	22,79 ± 2,21 c	16,98 ± 1,34 a	20,78 ± 2,02 b
Densidade unitária (kg m^{-3})	1185,46 ± 174,81 b	1084,80 ± 62,93 a	1207,29 ± 52,06 b
Materiais voláteis (%)	78,78 ± 0,65 b	72,40 ± 0,70 a	73,62 ± 2,36 a
Carbono fixo (%)	19,28 ± 0,63 ab	17,82 ± 0,63 a	21,50 ± 2,32 b
Cinzas (%)	1,93 ± 0,02 a	9,78 ± 0,32 c	4,88 ± 0,19 b

* base seca. ** desvio padrão. Médias seguidas pela mesma letra na linha não diferem significativamente (teste LSD, $p > 0,05$).

Conforme observa-se na Tabela 2, o teor de umidade dos pellets diferiu estatisticamente, com destaque para aqueles produzidos com casca de café que apresentaram o maior valor entre as composições avaliadas (10,64%). Os teores de umidade dos pellets em estudo encontram-se próximos aos verificados para pellets de resíduos de soja (10,58%), bagaço de cana-de-açúcar (9.89%) e de pellets comerciais de madeira (8.23%) (Scatolino et al. 2018). De acordo com a ISO 17225-6 (2021) todas composições avaliadas são classificadas na classe de qualidade A para uso industrial por apresentarem teor de umidade ≤ 12,0%.

A densidade à granel dos pellets não foi influenciada pelo tipo de biomassa lignocelulósica selecionada, com ausência de diferenças significativas entre os diferentes tipos de pellets produzidos. Como mostrado na Tabela 2, todas composições apresentaram densidade à granel ≥ 600,0 kg m^{-3}, atendendo ao limite mínimo estabelecido pela ISO 17225-6 (2021). Os resultados reportados neste trabalho encontram-se próximos aos verificados para biomassas agrícolas, como trigo – 628 kg m^{-3} (Stolarski et al., 2025), sabugo de milho – 600 kg m^{-3} (Dagobeth et al., 2025) e casca de arroz – 675 kg m^{-3} (Dao et al., 2022).

Apesar dos valores próximos de densidade à granel, a razão de compactação dos pellets foi significativamente afetada pela massa específica aparente das biomassas, em que os pellets produzidos com resíduos de bagaço de cana-de-açúcar resultaram no maior valor para esta propriedade (6,46), sendo esta biomassa a de menor massa específica aparente (Tabela 1). Assim, esse alto índice expressa o aumento da densidade do material obtido durante a peletização e, portanto, representa um indicador da eficiência de densificação. Além disso, a

alta razão de compactação para os pellets de bagaço de cana proporciona outras vantagens como redução do volume necessário para transporte e armazenamento e aumento da densidade energética volumétrica (He et al., 2024).

Em relação às dimensões dos pellets, é possível observar na Tabela 2 que todas composições avaliadas apresentaram diâmetro ≥ 6,0 mm, limite preconizado pela ISO 17225-6 (2021). Comportamento similar verifica-se para o comprimento dos pellets, em que, independente do tipo de biomassa empregada, estes apresentaram valores de comprimento no intervalo entre 3,15 e 40,0 mm, sendo, portanto, classificados como A para aplicações industriais. Esses resultados proporcionaram a produção de pellets com densidade unitária superior a 1000 kg/m³, próxima ao verificado por Scatolino et al. (2018) para biomassas agroindustriais. Os maiores valores de densidade unitária em relação à densidade a granel podem ser justificados uma vez que a primeira apenas leva em consideração a massa de um pellet individual e seu volume geométrico, portanto, não considera os espaços vazios entre os pellets, ao contrário da densidade a granel. A densidade unitária influencia o comportamento da combustão e o tempo de queima completa, uma vez que a presença de vazios controla o movimento do oxigênio no interior do pellet (Said et al., 2015).

Os resultados da análise química imediata (Tabela 2) mostraram que os pellets de bagaço de cana-de-açúcar apresentaram os maiores valores médios de materiais voláteis (78,78%), diferindo significativamente daqueles produzidos com as outras biomassas agroindustriais. Esses maiores teores indicam que tais pellets apresentam ignição mais rápida e maior velocidade durante a devolatilização, favorecendo uma combustão mais eficiente (Rupasinghe et al., 2024).

A fração de carbono fixo para os pellets em estudo variou entre 17,82 e 21,50% para aqueles produzidos com resíduos de casca de arroz e casca de café, respectivamente. Maiores teores são desejados uma vez que essa fração é responsável principalmente pela combustão do carvão, influenciando o tempo de queima, a taxa de liberação de calor, a estabilidade da combustão e o aproveitamento energético do combustível. A literatura reporta teores de carbono fixo variando entre 17,66 e 24.18% para resíduos de bagaço de maçã e bagaço de caju, respectivamente (Alves et al., 2020), posicionando as biomassas em estudo dentro deste intervalo.

Ao contrário do efeito benéfico do carbono fixo na combustão dos pellets, as cinzas reduzem a energia útil, podendo diminuir a temperatura média da chama. Conforme Tabela 2, os pellets produzidos com casca de arroz apresentaram alto teor de cinzas (9,78%), diferindo

estatisticamente das outras composições estudadas. Conforme classificação de qualidade para aplicações industriais, os pellets de bagaço de cana-de-açúcar e de casca de café podem ser enquadrados na classe A de acordo com a ISO 17225-6 (2021), enquanto aqueles de casca de arroz situam-se na classe B, por apresentarem teor de cinzas entre 6,0 e ≤ 10,0%. Os altos teores de cinzas evidenciados para os pellets de casca de arroz podem alterar a combustão uma vez que implica em menor fração orgânica disponível para combustão e, consequentemente, menores valores de poder calorífico (Kamperidou 2022).

4. Conclusões

A peletização de resíduos agroindustriais das culturas da cana-de-açúcar, arroz e café mostrou-se tecnicamente viável para a produção de biocombustíveis sólidos. As características intrínsecas das matérias-primas resultaram em pellets com propriedades distintas. Os pellets produzidos a partir dos resíduos de bagaço de cana-de-açúcar e casca de café atenderam à norma ISO 17225-6 (2021) na categoria de classificação mais elevada, enquanto aqueles produzidos com resíduos de casca de arroz foram classificados na categoria B devido aos elevados teores de cinzas. Desta forma, as biomassas residuais em estudo demonstraram potencial de valorização por meio da peletização, sendo, portanto, alternativa às tradicionais fontes energéticas à base do petróleo, bem como ao carvão e lenha.

5. Agradecimentos

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES). Agradecemos também à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) pela bolsa de pós-doutorado (códigos financeiros: APQ-05431-24, bolsa ID FAPEMIG/DPE nº. 103658065/2024, e APD-00296-25).

6. Referências bibliográficas

Adeoye, O. O., Lora, E. E. S., Pupo, L. P., et al. (2026). Strategic integration of biomass in Brazil's future energy mix: Implications for electricity generation and sustainability. Biomass and Bioenergy, 109147. https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2026.109147

Alves, J. J. F., Trindade, E. O., Silva, J. C. G., et al. (2020). Lignocellulosic wastes from the Brazilian juice processing industry as novel sustainable sources for bioenergy production: Preliminary assessment using physicochemical characteristics. Journal of Brazilian Chemical Society, 31(9), 1939-1948. https://dx.doi.org/10.21577/0103-5053.20200094

American Society for Testing Materials. (2021). D1762-84: Standard test method for chemical analysis of wood charcoal. https://store.astm.org/d1762-84r21.html

CONAB – Companhia Nacional de Abastecimento. (2026). 10° Levantamento da Safra de Grãos 2025/2026. https://www.gov.br/conab/pt-br

Dagobeth, E. D. A., Meza, D. D. O., Eras, J. J. C., Rodríguez, J. L. M., Mendoza, J. G. S. (2025). Co-pelletization of rice husk and corncob wastes: Evaluation of physicochemical properties and combustion performance. Recycling, 10(173). https://doi.org/10.3390/recycling10050173

Dao, C. N., Salam, A., Oanh, N. T. K., Tabil, L. G. (2022). Effects of length-to-diameter ratio, pinewood sawdust, and sodium lignosulfonate on quality of rice straw pellets produced via a flat die pellet mill. Renewable Energy, 181, 1140-1154. https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.09.088

Deutsches Institut Für Normung. (2010a). DIN EN 14774-1: Determination of moisture content – oven dry method –part 1: total moisture – reference method.

Deutsches Institut Für Normung. (2010b). DIN EN 15103: Determination of bulk density.

Deutsches Institut Für Normung. (2012). DIN EN 16127: Determination of length and diameter of pellets.

Empresa de Pesquisa Energética (EPE). (2025). Balanço Energético Nacional 2025. https://www.epe.gov.br/pt

Fernandez, B. O., Gonçalves, B. F., Pereira, A. C. C., et al. (2017). Características mecânicas e energéticas de briquetes produzidos a partir de diferentes tipos de biomassa. Revista Virtual de Química, 9(1), 29-38. http://dx.doi.org/10.21577/1984-6835.20170005

Gilvari, H., de Jong, W., Schott, D. L., & Berghel, J. (2020).
The effect of biomass pellet properties on combustion performance: A review.
Fuel Processing Technology, 199, 106244. https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2019.106244

He, H., Wang, Y., Sun, Y., Sun, W., Wu, K. (2024). From raw material powder to solid fuel pellet: A state-of-the-art review of biomass densification. Biomass and Bioenergy, 186, 107271. https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2024.107271

International Standards Organization. ISO 17225-6:2021: Solid biofuels - Fuel specifications and classes - Part 6: Graded non-woody pellets. https://www.iso.org/standard/76093.html

Kamperidou, V. (2022). Quality analysis of commercially available wood pellets and correlations between pellets characteristics. Energies, 15(8). https://doi.org/10.3390/en15082865

Rupasinghe, R. L., Perera, P., Bandara, R., Amarasekera, H., & Vlosky, R. (2024). Insights into properties of biomass energy pellets made from mixtures of woody and non-woody biomass: A meta-analysis. Energies, 17(1). https://doi.org/10.3390/en17010054

Sá, I. A., Macedo, L. A., Chaves, B. S., Galvão, L. G. O., Vale, A. T., Ghesti, G. F. et al. (2024). Evaluating the quality of wood waste pellets and environmental impact mitigation for decentralized energy recovery in the Amazon. Renewable Energy, 231. https://doi.org/10.1016/j.renene.2024.120929

Said, N., Daiem, M. M. A., García-Maraver, A., Zamorano, M. (2015). Influence of densification parameters on quality properties of rice straw pellets. Fuel Processing Technology, 138, 56–64. https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2015.05.011

Scatolino, M.V., Neto, L.F.C., Protásio, T.d.P. et al. (2018). Options for generation of sustainable energy: Production of pellets based on combinations between lignocellulosic biomasses. Waste Biomass Valorization, 9, 479–489. https://doi.org/10.1007/s12649-017-0010-2

Stolarski, M. J., Krzyzaniak, M., Olba-Ziety, E. (2025). Properties of pellets from forest and agricultural biomass and their mixtures. Energies, 18(3137). https://doi.org/10.3390/en18123137

Whittaker, C., & Shield, I. (2017). Factors affecting wood, energy grass and straw pellet durability – A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 71, 1–11. https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.12.119

Winter, S. G., Zanuncio, A. J. V., Carvalho, A. G., et al. (2025). Sustainable solid biofuel production from coffee byproducts: Characterization and pelletization of husk and parchment. Resources, 14(188). https://doi.org/10.3390/resources14120188

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Valorização de subprodutos vitivinícolas: caracterização energética do engaço e do bagaço de uva

Luiza Catarina Lobo de Godoi[1]; Arthur Pedro Alves Fernandes[1]; Carlos Eduardo Barbosa da Silva[1]; William Jerônimo Araújo Nascimento[2]; Ademilson Coneglian[2]; Jhonatan Willian Moreira[1]; Macksuel Fernandes da Silva[1]; Carlos Roberto Sette Junior[1]

[1] Universidade Federal de Goiás – UFG
[2] Universidade Estadual de Goiás – UEG

Resumo: O engaço e o bagaço de uva são subprodutos vitivinícolas com elevado potencial para geração de energia térmica. Visando a caracterização energética dessas biomassas foram determinados os teores de umidade, materiais voláteis, cinzas, carbono fixo, densidade a granel, poder calorífico e densidade energética. O engaço apresentou menores teores de umidade (15,78%) e cinzas (5,80%) quando comparado ao bagaço, que reteve 56,82% de umidade e 12,53% de cinzas. O poder calorífico superior (PCS) foi semelhante para o engaço (19,37 MJ kg^{-1}) e o bagaço (19,36 MJ kg^{-1}). No entanto, a densidade energética do bagaço de uva (1.587 MJ m^{-3}) foi superior à do engaço (731 MJ m^{-3}) em função de sua densidade a granel, que se mostrou cerca de cinco vezes maior (247,79 kg m^{-3} em comparação a 49,38 kg.m^{-3}). Os resultados indicam que a conversão térmica do bagaço e engaço da uva pode contribuir para atender às demandas energéticas da própria indústria vitivinícola e de outros setores que utilizam fontes renováveis.

Palavras-chave: Biomassa; Resíduo; Energia renovável.

Valorization of winemaking byproducts: energy characterization of grape stalks and grape pomace

Abstract: Grape stalks and grape pomace are winemaking byproducts with high potential for thermal energy generation. Aiming at the energy characterization of these biomasses, moisture content, volatile matter, ash, fixed carbon, bulk density, heating value, and energy density were determined. Grape stalks showed lower moisture (15.78%) and ash (5.80%) contents compared to grape pomace, which retained 56.82% moisture and 12.53% ash. The higher heating value (HHV) was similar for grape stalks (19.37 MJ kg^{-1}) and grape pomace (19.36 MJ kg^{-1}). However, the energy density of grape pomace (1.587 MJ m^{-3}) was higher than that of stalks (731 MJ m^{-3}) due to its bulk density, which was approximately five times greater (247.79 kg m^{-3}

compared to 49.38 kg m^{-3}). Results indicate that the thermal conversion of grape pomace and stalks can contribute to meeting the energy demands of the winemaking industry itself and other sectors utilizing renewable sources.

Keywords: Biomass; Residue; Renewable Energy.

1. Introdução

A indústria vitivinícola, apesar de ser altamente produtiva em nível global, ainda deixa de aproveitar grande parte de seus principais resíduos, dentre eles o bagaço e o engaço de uva, que poderiam ser incluídos no contexto da economia circular (Jesus et al., 2022; Machado et al., 2025).

Caracterizado como um resíduo lignocelulósico, o engaço consiste na estrutura física do cacho (Machado et al., 2025) e é gerado na etapa do desengace, sendo separado no início do processo e correspondendo a uma média de 3,5 kg por hectolitro de vinho produzido (Prozil et al., 2013). Após as etapas de esmagamento e prensagem, é gerado o bagaço de uva, material composto predominantemente por cascas, sementes e polpa residual (González-Centeno et al., 2010; Jesus et al., 2022; Machado et al., 2025), que corresponde a uma média de 14 kg por hectolitro de vinho produzido (Prozil et al., 2013).

A destinação adequada e a utilização dessa biomassa lignocelulósica beneficiam economicamente os produtores e atuam mitigando os impactos ambientais gerados pelo setor (Jesus et al., 2022). Considerando que a etapa de vinificação apresenta seu principal impacto ambiental concentrado na expressiva demanda energética, o aproveitamento do engaço e do bagaço de uva configura-se como uma medida mitigadora para atender às necessidades térmicas e de redução das emissões de carbono da própria indústria vitivinícola (Pinto da Silva & Esteves da Silva, 2022).

Neste contexto, a recuperação integral dos resíduos da indústria do vinho apresenta-se como uma estratégia promissora para a produção de biocombustíveis, o que permite a redução de custos operacionais, e prevenção de desperdícios e o fomento da gestão sustentável e economia circular no setor (Jesus et al., 2022; Oliveira et al., 2025).

Tendo em vista que o bagaço e o engaço da uva estão entre os principais resíduos gerados na indústria vinícola (Machado et al., 2025), o presente estudo teve como objetivo principal determinar as suas propriedades energéticas, visando avaliar o potencial energético destes subprodutos para a geração de energia térmica.

2. Material e métodos

As biomassas do engaço e do bagaço de uva foram obtidas do processamento industrial do vinho no estado de Goiás e transportadas para o Laboratório de Qualidade da Madeira e Bioenergia - LQMBio do Departamento de Engenharia Florestal da Universidade Federal de Goiás, Goiânia, Goiás, Brasil, para análise.

O teor de umidade foi obtido de acordo com a norma ISO 18134-1:2022. A classificação granulométrica foi realizada mecanicamente em peneiras de 7, 20, 40, 60 e 100 *mesh*, utilizando-se um agitador de peneiras com batidas intermitentes de acordo com a norma ISO 17827-1:2024.

Em seguida, foi realizada a análise imediata das amostras. Os teores de material volátil e cinzas foram determinados em triplicata, em conformidade com as normas internacionais ISO 18123:2023 e ISO 18122:2022, respectivamente.

O teor de carbono fixo foi calculado pela diferença entre a massa inicial da amostra e a soma dos teores de material volátil e cinzas, conforme a Equação 1.

$$CF = 100 - (CZ + MV) \qquad Eq.\ 1$$

Onde: CF= Teor de Carbono Fixo (%); CZ = Teor de Cinzas (%); MV = Teor de Material Volátil (%).

A densidade a granel foi determinada com a norma ISO 17828:2025, considerando a relação entre a massa e o volume conhecido de um recipiente, conforme Equação 2.

$$DG = Ma / Vc \qquad Eq.\ 2$$

Onde: DG = Densidade a granel (kg m^{-3}); Ma = Massa da amostra (kg); Vc = Volume do contentor (m^3).

O Poder Calorífico Superior - PCS ($MJ.kg^{-1}$) foi determinado utilizando-se um calorímetro IKA WORKS C-200, conforme a norma ISO 18125:2017.

O Poder Calorífico Inferior – PCI (MJ kg^{-1}) foi calculado de acordo com a Equação 3, conforme a teoria do poder calorífico líquido (*Net Calorific Value*) proposta por Van Loo e Koppejan (2002), considerando o teor de umidade e o teor de hidrogênio na biomassa.

$$PCI = PCS\left(1 - \frac{u}{100}\right) - 2{,}447\,\frac{u}{100} - 2{,}447 \times 9{,}01 \times \frac{H}{100}\left(1 - \frac{u}{100}\right) \qquad Eq.\ 3$$

Onde: PCI = poder calorífico inferior (MJ kg^{-1}, base úmida); PCS = poder calorífico superior (MJ kg^{-1}, base seca); u = teor de umidade da biomassa (% base úmida); H = teor de hidrogênio da biomassa (% base seca); 2,447 MJ kg^{-1} = calor latente de vaporização da água a 25 °C; 9,01 = fator estequiométrico correspondente à massa de água formada pela combustão do hidrogênio.

A densidade energética (DE) foi calculada pelo produto do poder calorífico inferior (PCI) e a densidade a granel (DG), conforme a Equação 4.

$$DE = PCI \times DG \qquad Eq.\ 4$$

Onde: DE = Densidade Energética (MJ m^{-3}); PCI = Poder Calorífico Inferior (MJ.kg^{-1}); DG = Densidade a granel (kg m^{-3}).

Os dados foram submetidos à análise de variância de fator único (ANOVA), considerando o tipo de biomassa como fator de tratamento, com dois níveis: engaço de uva e bagaço de uva. Para cada variável analisada, as médias dos tratamentos foram comparadas pelo teste F da ANOVA, adotando-se nível de significância de 5%. As análises foram realizadas considerando três repetições por tratamento.

3. Resultados e discussão

Na sua condição *in natura*, o engaço de uva avaliado apresentou um teor de umidade de 15,78%. Em contrapartida, o bagaço de uva apresentou um elevado teor de umidade, atingindo 56,82%.

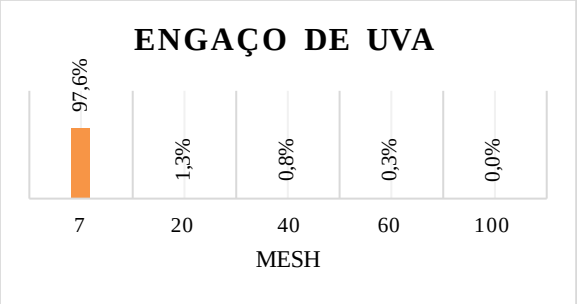
Essa expressiva diferença do teor de umidade entre os subprodutos está relacionada com as características intrínsecas dos materiais e com as etapas do processo de vinificação. O engaço é separado no início do processamento, durante a etapa de desengace, sem adição de líquidos, enquanto o bagaço passa por um processo de prensagem e

maceração em contato direto com o mosto, fato que justifica sua elevada umidade residual na saída do processo (González-Centeno et al., 2010; Jesus et al., 2022).

Resultados semelhantes são encontrados na literatura, em que amostras *in natura* de bagaço apresentam umidade superior a 60%, em base úmida (Kraiem et al., 2016) e amplas variações entre 50,2% e 72,2% (González-Centeno et al., 2010). É importante ressaltar que a manutenção desse elevado teor de umidade afeta diretamente o rendimento térmico durante a combustão, reduzindo o seu Poder Calorífico Inferior (PCI).

3.1 Perfil Granulométrico

O resultado da análise granulométrica revelou que 97,6% do engaço de uva ficou retido na peneira de 7 *mesh*, enquanto a fração remanescente distribuiu-se nas malhas de 20 *mesh* ou inferiores (Figura 1).



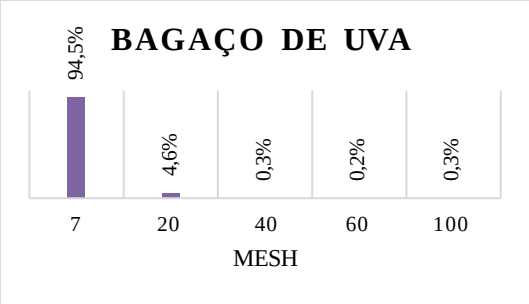


Figura 1 – Perfil granulométrico do engaço de uva. **Figura 2** – Perfil granulométrico do bagaço de uva.

A distribuição granulométrica do bagaço de uva revelou um perfil predominantemente “grosso”, tendo em vista que 94,5% ficou retido na peneira de 7 *mesh* e o restante ficou retido nas peneiras inferiores e/ou de 20 *mesh* (Figura 2).

Dessa forma, a análise granulométrica revelou que tanto o engaço quanto o bagaço de uva apresentaram um perfil predominantemente “grosso”, em seu estado original, com a maior porcentagem das partículas retidas na peneira de malha 7 (2,8 mm).

Este perfil granulométrico da biomassa, em sua forma original, evidencia a necessidade de um processamento físico prévio se este material for destinado a compactação, como para produção de pellets e briquetes, tendo em vista que nos estudos desenvolvidos por Oliveira et al. (2025) foi constatado que a redução de partículas de engaço de uva para tamanhos menores ou iguais a 2 mm garante uma acomodação mais efetiva, o que confere maior adesão do material, que quando submetido à densificação, apresenta maior resistência mecânica e densidade aparente.

A exigência de uma granulometria fina para otimizar a densificação energética é fortemente corroborada por Kraiem et al. (2016), que utilizaram partículas do bagaço de uva com dimensões inferiores a 0,6 mm para garantir a viabilidade operacional e melhorar a eficiência na produção de *pellets*.

3.2 Análise imediata

A avaliação do engaço de uva revelou um perfil de queima promissor, com 68,27% de materiais voláteis e 25,93% de carbono fixo (Tabela 1).

Tabela 1 – Análise imediata das amostras de biomassas de engaço e bagaço de uva

Biomassa	U (%)	Cinzas (%)	MV (%)	CF (%)
Engaço de uva	15,78[b]	5,80[b]	68,27[a]	25,93[a]
Bagaço de uva	56,82[a]	12,53[a]	69,76[a]	17,71[b]

Nota: médias seguidas pela mesma letra na coluna não diferem entre si pelo teste F da ANOVA a 5% de significância.

Este comportamento é relevante quando comparado aos resultados de Battaglia et al. (2026), que caracterizaram o engaço previamente lavado e moído para a faixa de 1 a 2 mm, e reportaram os valores de 80,11% de voláteis e 16,44% de carbono fixo. A alta volatilidade deste material favorece a sua ignição e o alto teor de carbono fixo favorece o tempo de residência nos fornos.

A análise de variância indicou diferença significativa entre as biomassas para os teores de umidade, cinzas e carbono fixo. O bagaço de uva apresentou maiores teores de umidade e cinzas, enquanto o engaço de uva apresentou maior teor de carbono fixo. Para os materiais voláteis, embora o bagaço tenha apresentado média numericamente superior, com 69,76%, não houve diferença significativa entre os tratamentos a 5% de probabilidade. Em relação ao bagaço de uva, os valores observados para materiais voláteis e carbono fixo foram de 69,76% e 17,71%, respectivamente, enquanto Kraiem et al. (2016) reportaram proporções distintas, de 50% e 28%. Essa variação pode estar associada às diferentes metodologias de quantificação empregadas, uma vez que os referidos autores utilizaram análises termogravimétricas (TGA). Além disso, é importante ressaltar que a composição química destes resíduos lignocelulósicos é afetada por fatores externos, que vão desde práticas de cultivo e condições edafoclimáticas até os processos específicos adotados no processamento da uva (Jesus et al., 2022).

O valor encontrado para o teor de cinzas do bagaço de uva foi de 12,53%, valor este que corrobora fortemente a literatura, tendo em vista que Kraiem et al. (2016) obtiveram exatamente 12% na análise imediata para esse mesmo tipo de biomassa.

Por outro lado, o engaço de uva apresentou um teor de cinzas estatisticamente menor que o bagaço, pois variou entre 5,65% e 6,07%. Estes resultados apresentam-se ligeiramente inferiores ao valor descrito por Prozil et al. (2013), que reportaram uma fração de 7,0% de cinzas na caracterização bioquímica desse resíduo, e de Machado et al. (2025), que encontraram um valor de 7,67%. Esse baixo teor de cinzas do engaço de uva quando comparado com o teor do bagaço representa uma vantagem expressiva, uma vez que as cinzas constituem na parte da biomassa que não participa da combustão. No entanto, nos estudos de Battaglia et al. (2026) o teor de cinzas encontrado para o engaço de uva foi de 3,45%, resultado inferior ao obtido neste estudo, porém este valor é justificado em função das condições *in natura* em que o material deste estudo foi avaliado, em contraste com o processo de lavagem laboratorial utilizado pelos autores.

3.3 Densidade a Granel (DG), Poder Calorífico Superior e Inferior (PCS e PCI) e Densidade Energética (DE)

Os valores de densidade a granel encontrados para o engaço e para o bagaço de uva foram 49,38 kg m^{-3} e 247,79 kg m^{-3}, respectivamente (Tabela 2). Embora a densidade a granel do bagaço não seja considerada baixa para biomassas residuais, o valor do engaço é reduzido, o que

sinaliza limitações quanto à sua eficiência energética para uso em sua forma original. Sendo assim, a baixa densidade natural do engaço compromete o aproveitamento energético por unidade de volume, o que tende a aumentar os custos logísticos relacionados ao transporte e ao armazenamento da biomassa.

Tabela 2 – Conteúdo energético das amostras de biomassas de engaço e bagaço de uva

Biomassa	DG (kg m^{-3})	U (%)	PCS (MJ kg^{-1})	PCI (MJ kg^{-1})	DE (MJ m^{-3})
Engaço de uva	49,38[b]	15,78[b]	19,37[a]	14,81[a]	731[b]
Bagaço de uva	247,79[a]	56,82[a]	19,36[a]	6,40[b]	1.587[a]

Nota: Médias seguidas pela mesma letra na coluna não diferem entre si pelo teste F da ANOVA a 5% de significância.

A análise de variância indicou diferença significativa entre as biomassas para a densidade a granel, umidade, Poder Calorífico Inferior (PCI) e densidade energética (DE), enquanto o Poder Calorífico Superior (PCS) não diferiu estatisticamente entre os tratamentos. O bagaço de uva apresentou maior densidade a granel e, consequentemente, maior densidade energética, mesmo com PCI inferior em razão do elevado teor de umidade. Por outro lado, o engaço de uva apresentou maior PCI, associado à sua menor umidade, mas sua baixa densidade a granel limitou a densidade energética por unidade de volume.

Esses resultados indicam que ambas as biomassas apresentam potencial para aproveitamento energético, embora o uso em sua forma original ainda possua limitações físicas, especialmente pela baixa compactação natural. A baixa densidade a granel observada está relacionada à presença de espaços vazios decorrentes do perfil granulométrico grosseiro desses materiais. Contudo, o aproveitamento energético de ambas as biomassas pode ser otimizado e aumentado por processos de densificação, sendo esta intervenção ainda mais crítica e necessária para o engaço. Nesse sentido, Oliveira et al. (2025) demonstraram que a moagem prévia do engaço de uva, com umidade de 11%, para a granulometria fina de 2 mm otimiza a acomodação do material solto e eleva sua densidade a granel para a ordem de 450 kg m^{-3}.

De forma complementar, Kraiem et al. (2016) indicam que a aplicação de processos de densificação pode elevar a densidade energética desses materiais, contribuindo para que atendam aos requisitos exigidos pelo mercado de combustíveis sólidos.

O engaço de uva, neste estudo, apresentou o valor médio de Poder Calorífico Superior de 19,37 MJ kg^{-1}, ou seja, um valor elevado quando comparado com o desempenho energético de outras biomassas da viticultura que já são destinadas à conversão energética em caldeiras, como os resíduos de poda da videira, cujo poder calorífico reportado na literatura é de 18 MJ kg^{-1} (Giorio et al., 2019).

O bagaço de uva também apresentou um alto valor de PCS (19,36 MJ kg^{-1}). A relevância do PCS de ambos subprodutos se torna mais evidente quando comparada a biomassas florestais reconhecidas para uso energético. Em um estudo com clones de *Eucalyptus* spp., Silva et al. (2022) obtiveram valores de PCS variando de 19,6 a 20,1 MJ kg^{-1}. O fato de o engaço e o bagaço alcançarem índices próximos aos da madeira de eucalipto comprova a alta competitividade energética desses materiais.

No entanto, no caso específico do bagaço, o PCI foi reduzido a 6,40 MJ kg^{-1} em decorrência da alta umidade da amostra (56,82%), e este impacto negativo da presença de alta umidade na biomassa é corroborado por Kraiem et al. (2016) que, ao avaliarem amostras de bagaço de uva previamente secas a 10%, obtiveram um rendimento energético consideravelmente superior, que alcançou o valor de 16,2 MJ kg^{-1}.

Dessa forma, a associação entre o reduzido Poder Calorífico Inferior (PCI) e a densidade a granel do bagaço de uva refletiu-se diretamente em sua densidade energética, que se mostrou limitada a 1.587 MJ m^{-3}.

Embora Kraiem et al. (2016) tenham utilizado amostras secas e moídas, que alcançaram uma densidade energética (7.306 MJ m^{-3}) superior à observada no presente estudo (1.587 MJ m^{-3}), tais valores ainda são considerados baixos, o que reforça a necessidade de processos de densificação da biomassa, como a peletização ou a briquetagem, para viabilizar o uso do bagaço de uva em escala industrial.

Nesse sentido, a literatura demonstra que a densificação não apenas contorna as limitações físicas da biomassa *in natura*, mas também viabiliza seu aproveitamento térmico com eficiência de combustão comparável à de biocombustíveis sólidos comerciais (Kraiem et al., 2016). Além disso, a adoção dessa estratégia está em consonância com estudos recentes focados na valorização e densificação de diferentes biomassas residuais para fins energéticos (Lima et al., 2026; Moreira et al., 2024; Ribaski et al., 2023; Sette Jr. et al., 2018; Sette Jr. et al., 2020).

4. Conclusões

A caracterização energética evidenciou que o engaço e o bagaço de uva apresentam elevado Poder Calorífico Superior (PCS), confirmando sua viabilidade para a geração de energia térmica.

Ao avaliar os parâmetros individuais, o engaço de uva destacou-se por apresentar baixo teor de umidade. Esta característica confere ao engaço um elevado Poder Calorífico Inferior (PCI), representando uma vantagem operacional importante para a eficiência da queima da biomassa.

Dessa forma, conclui-se que tanto o engaço quanto o bagaço possuem elevado potencial para a geração de energia térmica. Contudo, para a otimização do uso desses subprodutos sugere-se a aplicação de processos de densificação.

Assim, o aproveitamento térmico e a valorização destes subprodutos podem contribuir para atender às demandas energéticas da própria indústria vitivinícola e de outros setores que utilizam fontes renováveis de baixo carbono, fortalecendo a economia circular.

5. Referências bibliográficas

Battaglia, D., Mastellone, M. L., & Zaccariello, L. (2026). Valorization of winery waste through hydrothermal carbonization: A sustainable route to solid biofuel production. *Biomass and Bioenergy*, *207*, 108780. https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2025.108780

Giorio, C., Pizzini, S., Marchiori, E., Piazza, R., Grigolato, S., Zanetti, M., Cavalli, R., Simoncin, M., Soldà, L., Badocco, D., & Tapparo, A. (2019). Sustainability of using vineyard pruning residues as an energy source: Combustion performances and environmental impact. *Fuel*, *243*, 371–380. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.01.128

González-Centeno, M. R., Rosselló, C., Simal, S., Garau, M. C., López, F., & Femenia, A. (2010). Physico-chemical properties of cell wall materials obtained from ten grape varieties and their byproducts: grape pomaces and stems. *LWT - Food Science and Technology*, *43*(10), 1580–1586. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2010.06.024

International Organization for Standardization. (2015). *ISO 17828:2015: Solid biofuels—Determination of bulk density*. International Organization for Standardization. https://www.iso.org/standard/44395.html

International Organization for Standardization. (2016). *ISO 17827-1:2016. Solid biofuels — Determination of particle size distribution for uncompressed fuels — Part 1: Oscillating*

screen method using sieve apertures of 3,15 mm and above. International Organization for Standardization. https://www.iso.org/standard/84596.html

International Organization for Standardization. (2017). *ISO 18125:2017: Solid biofuels—Determination of calorific value* (1st ed.). International Organization for Standardization. https://www.iso.org/standard/61517.html

International Organization for Standardization. (2022). *ISO 18122:2022: Solid biofuels—Determination of ash content* (2nd ed.). International Organization for Standardization. https://www.iso.org/standard/83190.html

International Organization for Standardization. (2022). *ISO 18134-1:2022: Solid biofuels—Determination of moisture content—Part 1: Reference method* (2nd ed.). International Organization for Standardization. https://www.iso.org/standard/83191.html

International Organization for Standardization. (2023). *ISO 18123:2023: Solid biofuels—Determination of volatile matter* (2nd ed.). International Organization for Standardization. https://www.iso.org/standard/83192.html

Jesus, M., Romaní, A., Mata, F., & Domingues, L. (2022). Current Options in the Valorisation of Vine Pruning Residue for the Production of Biofuels, Biopolymers, Antioxidants, and Bio-Composites following the Concept of Biorefinery: A Review. *Polymers*, *14*(9), 1640. https://doi.org/10.3390/polym14091640

Kraiem, N., Lajili, M., Limousy, L., Said, R., & Jeguirim, M. (2016). Energy recovery from Tunisian agri-food wastes: Evaluation of combustion performance and emissions characteristics of green pellets prepared from tomato residues and grape marc. *Energy*, *107*, 409–418. https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.04.037

Lima, P. A. F., de Paiva, N. S., da Silva, M. F., Santos, A. C., Alves de Moraes, M. D., Pereira, G. S. J., Barbosa Silva, C. E., & Sette Jr., C. R. (2026). Energy recovery of solid agro-industrial waste: byproduct in the form of briquettes. *Biomass and Bioenergy*, *205*, 108520. https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2025.108520

Machado, A. R., Voss, G. B., Machado, M., Paiva, J. A. P., Nunes, J., & Pintado, M. (2025). Exploring the chemical potential of 'Vinhão' grape stalks for circular economy applications. *Food and Bioproducts Processing*, *152*, 98–106. https://doi.org/10.1016/j.fbp.2025.04.015

Moreira, J. W., Milagres, V. A. C., Godoi, L. C. L. de, Ribeiro, R. S., Nogueira, J. C. R. G., Lemes, L. T. e, Silva, M. F. da, & Sette Jr., C. R. (2024). Assessing Energy Potential in Maize and Paper Agroindustrial Waste Through Recycling and Bioenergy Transformation. *TreeDimensional*, *12*(33), 1–8. https://doi.org/10.55746/treed.2024.12.033

Oliveira, L. H. de, Baldin, T., Valcorte, G., Lima, B. L. de, Roubuste, R. R., & Baraúna, E. E. P. (2025). Influence of grain size on the energy properties of briquettes made from grape stalks: a sustainable approach for Brazilian viticulture. *Ciência Florestal*, *35*, e87793. https://doi.org/10.5902/1980509887793

Pinto da Silva, L., & Esteves da Silva, J. C. G. (2022). Evaluation of the carbon footprint of the life cycle of wine production: A review. *Cleaner and Circular Bioeconomy*, *2*, 100021. https://doi.org/10.1016/j.clcb.2022.100021

Prozil, S., Mendes, J., Evtuguin, D., & Cruz-Lopes, L. (2013). Caracterização química e estrutural do engaço da uva e avaliação do seu potencial como matéria-prima lenho celulósica. *Millenium*, *44*, 23–40. https://www.researchgate.net/publication/262698072

Ribaski, N. G., Belini, U. L., Sette Jr., C. R., Ribeiro, A. C. C., Keinert, A. C., & Brito e Cunha, E. A. B. de. (2023). Fabricação de briquetes com resíduos de poda urbana. *MIX Sustentável*, *9*(5), 41–50. https://doi.org/10.29183/2447-3073.mix2023.v9.n5.41-50

Sette Jr., C. R., de Moraes, M. D. A., Coneglian, A., Ribeiro, R. M., Hansted, A. L. S., & Yamaji, F. M. (2020). Forest harvest byproducts: Use of waste as energy. *Waste Management*, *114*, 196–201. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.07.001

Sette Jr., C. R., Hansted, A. L. S., Novaes, E., Lima, P. A. F. e, Rodrigues, A. C., Santos, D. R. de S., & Yamaji, F. M. (2018). Energy enhancement of the eucalyptus bark by briquette production. *Industrial Crops and Products*, *122*, 209–213. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2018.05.057

Silva, M. F. da, Lima, P. A. F., Novaes, E., Sette, C. R., & Vale, A. T. do. (2022). Wood energy quality of Eucalyptus spp. clones established under different soil types in the Brazilian Cerrado. Canadian Journal of Forest Research, 52(5), 743–750. https://doi.org/10.1139/cjfr-2021-0234

Van Loo, S., & Koppejan, J. (Eds.). (2002). *Handbook of biomass combustion and co-firing*. Twente University Press.

Valorização energética de resíduos amazônicos via briquetes de dendê e castanha-do-Brasil

Sabrina Soares da Silva[1]; Fabíola Martins Delatorre[1]; Iara Nobre Carmonar[1]; Allana Katiussya Silva Pereira[2]; Samara Teixeira da Silva[3]; Ananias Francisco Dias Júnior[1]; João Gilberto Meza Ucella Filho Souza[4]; Elias Costa de Souza[5]

[1] Universidade Federal do Espírito Santo
[2] Universidade Federal do Recôncavo da Bahia
[3] Universidade Federal Rural da Amazônia
[4] Universidade Federal de Viçosa
[5] Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará

Resumo: A valorização de resíduos lignocelulósicos constitui uma estratégia relevante para o fortalecimento da bioeconomia amazônica e para a produção de biocombustíveis sólidos renováveis. Neste contexto, o presente estudo teve como objetivo produzir e avaliar briquetes elaborados com diferentes proporções de casca de castanha-do-Brasil (*Bertholletia excelsa*) e casca de dendê (*Elaeis guineensis*). Foram produzidos briquetes em quatro proporções de mistura (100:0; 75:25; 50:50; 25:75), submetidos à compactação a 130 °C, pressão de 125 bar e tempo de prensagem de 10 minutos. Avaliaram-se densidade aparente, expansão volumétrica, higroscopicidade e resistência mecânica, com os dados submetidos à análise de variância e regressão. Os resultados indicaram que a densidade aparente, a higroscopicidade e a resistência mecânica inicial não foram significativamente influenciadas pela composição das biomassas. Em contrapartida, a expansão volumétrica e a resistência mecânica após estabilização apresentaram diferenças significativas entre os tratamentos, evidenciando a influência da proporção dos resíduos sobre a estabilidade dimensional e estrutural dos briquetes. Conclui-se que a casca de castanha-do-Brasil e a casca de dendê apresentam potencial para a produção de briquetes com propriedades físicas e mecânicas adequadas, constituindo uma alternativa promissora para o aproveitamento energético de resíduos e para a agregação de valor às cadeias produtivas da bioeconomia.

Palavras-chave: Biocombustível sólido; Densificação energética; Caracterização físico-mecânica.

Energy recovery from Amazonian waste through palm oil and Brazil nut briquettes

Abstract: The valorization of lignocellulosic waste is an important strategy for strengthening the Amazonian bioeconomy and producing renewable solid biofuels. In this context, the present study aimed to produce and evaluate briquettes made with different proportions of Brazil nut shell (Bertholletia excelsa) and palm oil shell (Elaeis guineensis). Briquettes were made in four mixture ratios (100:0; 75:25; 50:50; 25:75), subjected to compression at 130 °C, 125 bar pressure, and a pressing time of 10 minutes. The study evaluated apparent density, volumetric expansion, hygroscopicity, and mechanical strength, with the data analyzed using variance and regression analysis. The results showed that apparent density, hygroscopicity, and initial mechanical strength were not significantly affected by the composition of the biomasses. On the

other hand, volumetric expansion and mechanical strength after stabilization showed significant differences between the treatments, highlighting the influence of the proportion of residues on the dimensional and structural stability of the briquettes. It can be concluded that Brazil nut shells and palm oil shells have potential for producing briquettes with suitable physical and mechanical properties, making them a promising option for the energy use of waste and for adding value to bioeconomy production chains.

Keywords: Solid biofuel; Energy densification; Physical-mechanical characterization.

1. Introdução

A transição para uma economia de base biológica tem impulsionado o aproveitamento sustentável de recursos naturais e a valorização de resíduos. Na Amazônia, esse processo está diretamente ligado à bioeconomia, que busca conciliar conservação ambiental e geração de renda. Entre os produtos da sociobiodiversidade, a castanha-do-brasil (*Bertholletia excelsa* Bonpl.) destaca-se por sua relevância econômica, social e ecológica, sendo uma das principais espécies florestais não madeireiras exploradas de forma sustentável na região amazônica (Torres et al., 2022).

O beneficiamento da castanha-do-Brasil, frequentemente realizado por cooperativas e associações, contribui para a geração de renda e agregação de valor à produção extrativista. Entretanto, durante o processamento são geradas quantidades expressivas de resíduos lignocelulósicos, principalmente ouriços e cascas, que podem representar aproximadamente 85% da massa do fruto. Embora esses materiais apresentem potencial para aproveitamento energético, sua utilização ainda é limitada, evidenciando a necessidade de alternativas tecnológicas que favoreçam sua valorização em cadeias produtivas (Colpani et al., 2022).

Entre as alternativas disponíveis, a briquetagem permite transformar biomassas residuais de baixa densidade em biocombustíveis sólidos densificados, favorecendo seu manuseio, armazenamento e transporte. A casca da castanha-do-Brasil apresenta potencial para essa finalidade e pode ser empregada isoladamente ou em associação com outras biomassas lignocelulósicas. Dias et al. (2019), ao avaliarem briquetes produzidos com casca de castanha-do-Brasil e serragem de madeira, demonstraram a viabilidade da utilização desse resíduo na obtenção de combustíveis sólidos.

Outro resíduo com potencial para densificação é a casca de dendê (*Elaeis guineensis*), proveniente do processamento agroindustrial do óleo de palma. Sua utilização na produção de briquetes constitui uma alternativa para agregar valor a esse subproduto e ampliar seu aproveitamento energético. Estudos recentes demonstram a viabilidade da conversão de

resíduos do processamento do dendê em briquetes, com propriedades físico-químicas e características de combustão compatíveis com sua utilização como biocombustível sólido (Alfian et al., 2026).

Assim, a associação da casca de castanha-do-brasil com a casca de dendê representa uma alternativa para valorizar resíduos lignocelulósicos e fortalecer a bioeconomia, ao mesmo tempo em que promove a produção de combustíveis sólidos renováveis. Diante disso, este estudo teve como objetivo produzir e avaliar briquetes constituídos por diferentes proporções de casca de castanha-do-brasil e casca de dendê, analisando suas propriedades físicas e mecânicas e identificando o efeito da composição das biomassas sobre a qualidade dos produtos densificados.

2. Material e métodos

2.1 Matéria-prima e produção dos briquetes

Foram utilizados dois resíduos lignocelulósicos para a produção dos briquetes: casca de castanha-do-Brasil (*Bertholletia excelsa*), proveniente da Cooperativa CAMPAX, localizada em São Félix do Xingu, Pará, e casca de dendê (*Elaeis guineensis*), proveniente de uma agroindústria localizada no município de Tailândia, Pará. As principais etapas metodológicas do estudo estão apresentadas na Figura 1.

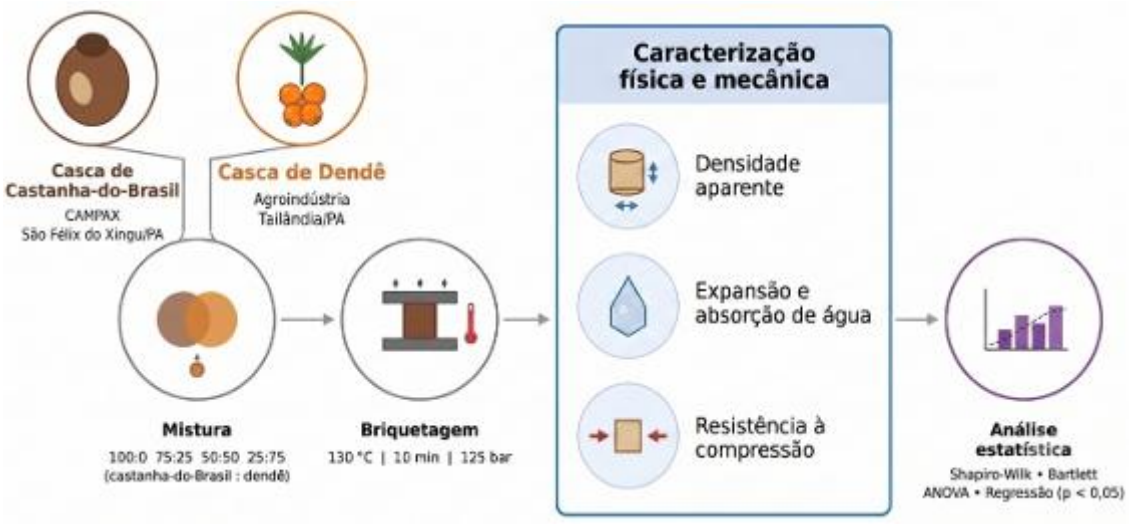


Figura 1 – Fluxograma das etapas metodológicas do estudo.

Previamente os materiais foram secos e triturados, a secagem foi conduzida ao longo de 2 horas, a uma temperatura de 100 °C. Após a secagem, a biomassa foi triturada em um moinho de facas, posteriormente os materiais foram combinados em quatro proporções de massa (100:0;

75:25; 50:50; 25:75; castanha-do-Brasil:dendê), constituindo os tratamentos do experimento, conduzido em delineamento inteiramente casualizado (DIC). A compactação foi realizada em briquetadeira, sob temperatura de 130 °C, tempo de prensagem de 10 minutos e pressão de 125 bar.

2.2 Caracterização física e mecânica

Os briquetes foram avaliados quanto à densidade aparente (ρ), calculada a partir do volume (V), determinado admitindo-se geometria cilíndrica em função do diâmetro (D) e da altura (H), e da massa (m) do corpo de prova (cinco repetições); quanto à expansão volumétrica (EXP) e à absorção de água (ABS), monitoradas aos 0, 5, 10, 15 e 20 dias após a fabricação (cinco repetições); e quanto à resistência mecânica à compressão (σ), obtida em máquina universal de ensaios a partir da força máxima de ruptura (Fmáx) e da área da seção transversal (A) do corpo de prova (três repetições), avaliada no primeiro e no vigésimo dia após a fabricação. A estabilização dimensional dos briquetes foi definida a partir do monitoramento da expansão volumétrica ao longo do período de armazenamento, sendo considerada atingida quando duas avaliações consecutivas não apresentaram variação nas dimensões medidas (International Organization for Standardization, 2016). As propriedades foram determinadas conforme as Equações 1 a 5:

$$(1)\quad V = \pi\,(D/2)^2\,H$$

$$(2)\quad \rho = m / V$$

$$(3)\quad EXP\ (\%) = [(Vf - V0) / V0] \times 100$$

$$(4)\quad ABS\ (\%) = [(Mf - M0) / M0] \times 100$$

$$(5)\quad \sigma\ (MPa) = (Fmáx / A) \times 0{,}098$$

2.3 Análise estatística

Os dados foram submetidos aos testes de normalidade (Shapiro-Wilk) e de homocedasticidade (Bartlett), seguidos de análise de variância (ANOVA), conforme o DIC. Para os parâmetros com efeito significativo dos tratamentos ($p < 0{,}05$), foram ajustados modelos de regressão (linear, quadrático e cúbico), selecionados com base na significância dos coeficientes e no coeficiente de determinação (R^2). Todas as análises foram realizadas a 95% de probabilidade, com o auxílio do software R (R Core Team).

3. Resultados e discussão

A expansão volumétrica foi significativamente influenciada pela proporção dos resíduos ($p < 0{,}05$), evidenciando que a composição da mistura interferiu na estabilidade dimensional

dos briquetes após a compactação (Figura 2A). O modelo cúbico ajustado apresentou $R^2 = 0,85$, confirmando a influência da proporção dos resíduos sobre a recuperação elástica das biomassas. Esse resultado pode estar relacionado às diferenças estruturais entre as biomassas utilizadas, uma vez que materiais lignocelulósicos apresentam distintos comportamentos de recuperação elástica após a prensagem. (Luna Guide et al., 2025) observaram que alterações na composição de briquetes produzidos a partir de resíduos agrícolas influenciaram significativamente a expansão volumétrica do material, enquanto Celestino et al. (2023) destacaram que mudanças na formulação podem modificar propriedades físicas associadas à estabilidade estrutural dos briquetes. Considerando que menores níveis de expansão favorecem a manutenção da integridade física do produto durante o armazenamento, os resultados indicam que a proporção dos resíduos é um fator relevante para a qualidade final dos briquetes.

Por outro lado, a higroscopicidade não apresentou diferenças significativas entre os tratamentos ($p > 0,05$), indicando que a incorporação de diferentes proporções de resíduo de dendê e casca de castanha-do-Brasil não alterou substancialmente a interação dos briquetes com a umidade (Figura 2B). Esse comportamento sugere que as formulações avaliadas apresentaram características superficiais e estruturais semelhantes quanto à capacidade de retenção de água. Resultados comparáveis foram relatados por Luna Guide et al. (2025), que observaram comportamento semelhante para propriedades físicas relacionadas à umidade em briquetes produzidos com diferentes biomassas, e por Celestino et al. (2023), que verificaram estabilidade de determinadas propriedades físicas mesmo diante de alterações na composição da matéria-prima. A manutenção dessa característica é importante para a conservação da qualidade dos briquetes durante o armazenamento.

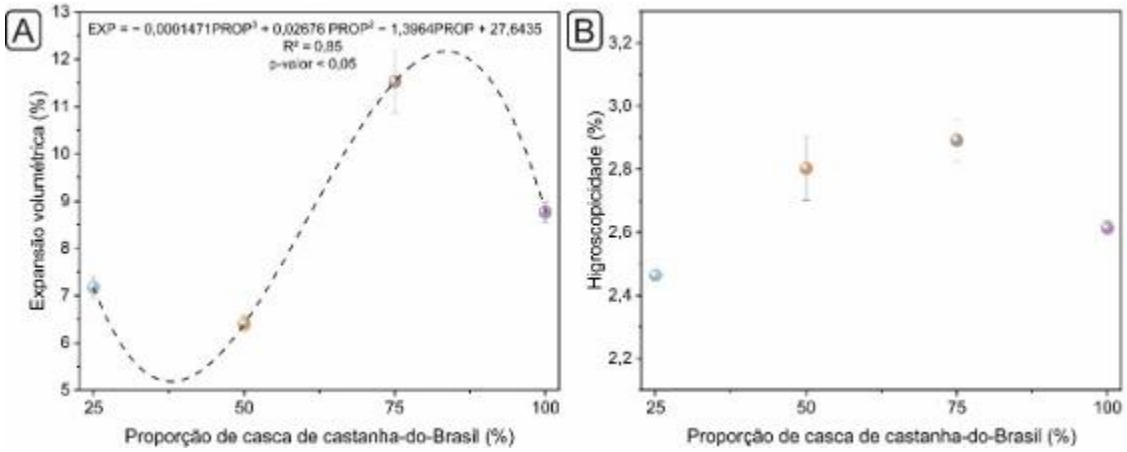


Figura 2 - Propriedades físico-higroscópicas dos briquetes (A) Expansão volumétrica

dos briquetes em função da proporção de casca de castanha-do-Brasil, ajustada por modelo cúbico ($R^2 = 0,85$; $p < 0,05$). (B) Higroscopicidade dos briquetes produzidos com diferentes proporções de casca de castanha-do-Brasil e casca de dendê.

A densidade aparente dos briquetes não apresentou diferença significativa entre os tratamentos ($p > 0,05$), indicando que a variação nas proporções de casca de castanha-do-Brasil e casca de dendê não alterou significativamente essa propriedade (Figura 3A). Esse comportamento sugere que ambas as biomassas apresentam características favoráveis à densificação, possibilitando a obtenção de produtos com estrutura física relativamente homogênea. Resultados semelhantes foram observados por Setter & Oliveira (2022), que verificaram baixa variação da densidade aparente em briquetes produzidos com resíduos lignocelulósicos de diferentes composições, e por Silva et al. (2022), que relataram que a densidade está fortemente relacionada às condições de compactação e às características físicas da biomassa. A manutenção dessa propriedade é desejável, pois está diretamente associada à eficiência logística e ao desempenho energético dos biocombustíveis sólidos.

A resistência mecânica avaliada no primeiro dia também não apresentou diferenças significativas entre os tratamentos ($p > 0,05$), indicando que as diferentes formulações foram capazes de produzir briquetes com resistência inicial semelhante (Figura 3B). Esse resultado sugere que a mistura dos resíduos proporcionou adequada coesão entre as partículas durante o processo de compactação, independentemente da proporção utilizada. Resultados semelhantes foram observados por Silva et al. (2022), que verificaram comportamento mecânico inicial semelhante em briquetes produzidos com diferentes composições de biomassa, e por Setter & Oliveira (2022), que destacaram a importância das características físicas da matéria-prima na formação das ligações interpartículas durante a briquetagem. Dessa forma, os resultados demonstram que a substituição parcial entre os resíduos não comprometeu a resistência mecânica imediatamente após a fabricação.

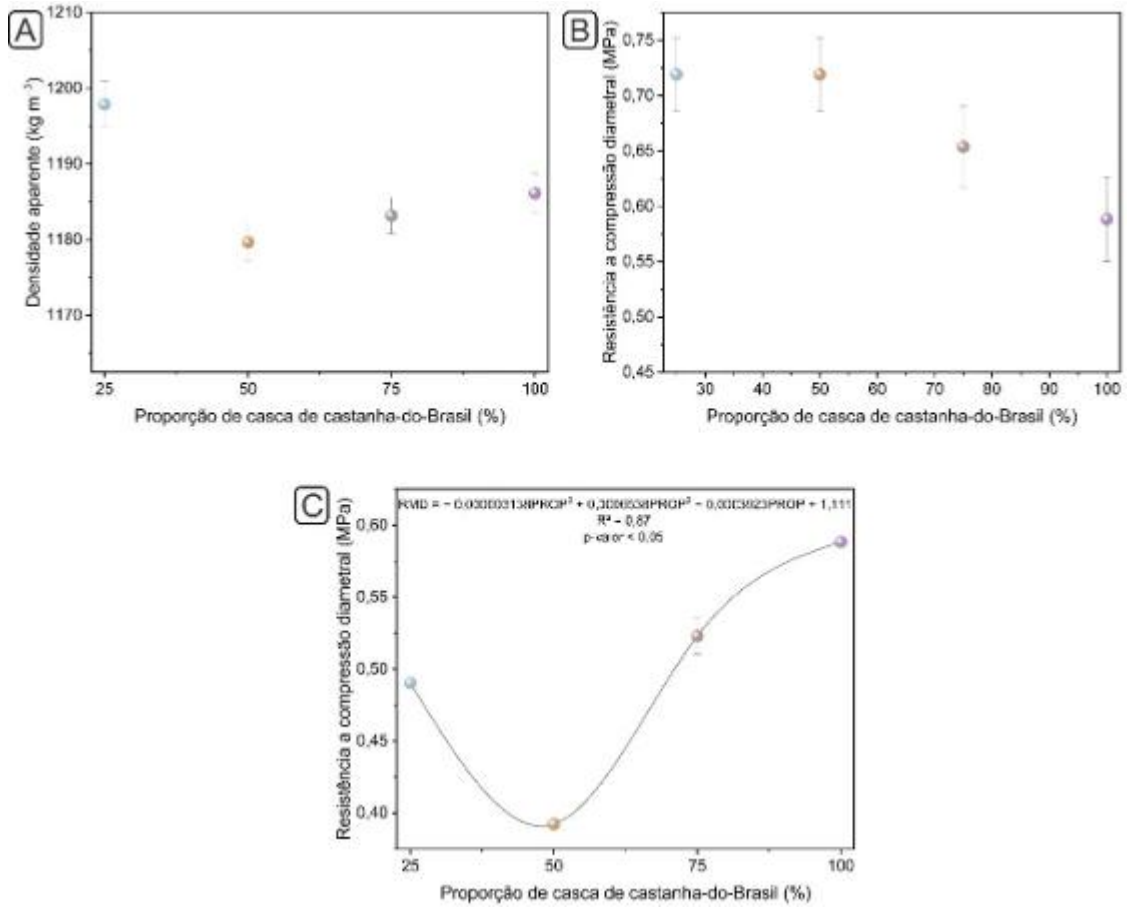


Figura 3 - Propriedades físicas e mecânicas dos briquetes (A) Densidade aparente dos briquetes produzidos com diferentes proporções de casca de castanha-do-Brasil e casca de dendê. (B) Resistência à compressão diametral dos briquetes no primeiro dia após a fabricação. (C) Resistência à compressão diametral dos briquetes após estabilização, ajustada por modelo cúbico ($R^2 = 0,87$; $p < 0,05$).

A resistência mecânica após estabilização foi significativamente influenciada pelos tratamentos ($p < 0,05$), evidenciando que a proporção dos resíduos interfere na consolidação estrutural dos briquetes ao longo do tempo (Figura 3C). O modelo cúbico ajustado apresentou $R^2 = 0,87$, confirmando que determinadas proporções de casca de dendê e castanha-do-Brasil proporcionam maior estabilidade estrutural. Esse comportamento pode estar associado à reorganização interna das partículas e à redistribuição da umidade após a compactação, fatores que influenciam a resistência final do material. (Setter & Oliveira, 2022) observaram que alterações na composição da biomassa afetaram significativamente as propriedades mecânicas de briquetes produzidos com resíduos de café, enquanto Aniszewska et al. (2025) verificaram mudanças nas propriedades físicas e mecânicas de materiais densificados durante o

armazenamento. Considerando que a resistência mecânica é um parâmetro fundamental para o transporte e manuseio dos briquetes, os resultados indicam que determinadas proporções de resíduo de dendê e casca de castanha-do-Brasil podem proporcionar maior estabilidade estrutural ao produto.

Em conjunto, os resultados demonstram que a incorporação de diferentes proporções de casca de dendê à casca de castanha-do-Brasil não alterou significativamente a densidade aparente, a higroscopicidade e a resistência mecânica inicial dos briquetes. Entretanto, a composição das misturas influenciou a expansão volumétrica e a resistência mecânica após a estabilização, indicando que essas propriedades foram mais sensíveis às proporções das biomassas utilizadas.

4. Conclusões

Os resultados demonstraram que os resíduos de dendê e casca de castanha-do-Brasil apresentam potencial para a produção de briquetes com propriedades físicas e mecânicas adequadas. A densidade aparente, a higroscopicidade e a resistência mecânica inicial não foram significativamente influenciadas pelas diferentes formulações, indicando desempenho semelhante entre os tratamentos para essas características. Em contrapartida, a proporção dos resíduos afetou significativamente a expansão volumétrica e a resistência mecânica após estabilização, evidenciando maior sensibilidade dessas propriedades à composição da biomassa. Embora a expansão volumétrica tenha apresentado valores máximos em proporções intermediárias a elevadas de casca de castanha-do-Brasil, as formulações com maior teor desse resíduo apresentaram maior resistência mecânica após estabilização, sem prejuízo às demais propriedades avaliadas. Assim, dentre as proporções estudadas, a formulação com 100% de casca de castanha-do-Brasil mostrou o desempenho mais promissor para a produção de briquetes.

5. Agradecimentos

Os autores agradecem ao Laboratório Multiusuário de Energia da Biomassa (LEB/UFES), à Universidade Federal do Espírito Santo (UFES) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), bem como à empresa Belém Bioenergia e à Cooperativa CAMPAX, pela disponibilização do material, pelo suporte prestado e pela contribuição fundamental para a realização deste trabalho.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

6. Referências bibliográficas

Alfian, D. G. C., Supriyadi, D., Rinovian, A., Nugraha, A. T., Huda, M., & Silitonga, D. J. (2026). Valorization of palm kernel shell waste into briquettes: Assessing physicochemical properties and combustion characteristics. *Green Technologies and Sustainability*, 4(2), 100320. https://doi.org/10.1016/j.grets.2025.100320

Aniszewska, M., Gendek, A., Tamelová, B., Malaťák, J., Velebil, J., Krilek, J., Čabalová, I., Výbohová, E., & Bubeníková, T. (2025). Changes in the physical, mechanical, chemical and energy parameters of coffee husk pellets during short-term storage. *Fuel*, 386, 134191. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2024.134191

Celestino, J. M. T., Lating, P. O., Nabuuma, B., & Yiga, V. A. (2023). Effects of clay, gum Arabic and hybrid binders on the properties of rice and coffee HUSK briquettes. *Results in Engineering*, 20, 101488. https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.101488

Colpani, D., Santos, V. O., Araujo, R. O., Lima, V. M. R., Tenório, J. A. S., Coleti, J., Chaar, J. S., & de Souza, L. K. C. (2022). Bioenergy potential analysis of Brazil nut biomass residues through pyrolysis: Gas emission, kinetics, and thermodynamic parameters. *Cleaner Chemical Engineering*, 1, 100002. https://doi.org/10.1016/j.clce.2022.100002

Dias, J. B., Carvalho, C. E. G., Amorim, P. G. R., Souza, E. M., Kunrath, N. F., & Marques, D. D. (2019). Avaliação de briquetes produzidos a partir da mistura de resíduos de casca da castanha-do-Brasil (Bertholletia excelsa) e da serragem de jacarandá (Dalbergia sp.) para fins energéticos. *Brazilian Journal of Development*, 5(10), 19841–19869. https://doi.org/10.34117/bjdv5n10-192

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). ISO 18847:2016: Solid biofuels — Determination of particle density of pellets and briquettes. Geneva: International Organization for Standardization, 2016.

Luna Guide, Q. J. A. de, Beber, R. C., Turini, C. da S., Beber, V. C., Nogueira, R. M., & Martins Pires, E. (2025). NON-CONVENTIONAL BIOMASSES FOR BRIQUETTE MANUFACTURING: DENSIFICATION PARAMETERS AND QUALITY. *Nativa*, 13(1), 114–120. https://doi.org/10.31413/nat.v13i1.18732

Setter, C., & Oliveira, T. J. P. (2022). Evaluation of the physical-mechanical and energy properties of coffee husk briquettes with kraft lignin during slow pyrolysis. *Renewable Energy*, 189, 1007–1019. https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.03.077

Silva, C. E. S. da, Batalha, L. A. R., Carvalho, A. M. de, Oliveira, V. B. L. G. de, Carvalho, A. M. M. L., Carneiro, A. de C. O., & Gomes, F. J. B. (2022). Evaluation of kraft lignin and residues of sawmill for producing briquettes. *Pesquisa Florestal Brasileira*, 42. https://doi.org/10.4336/2022.pfb.42e202102186

Torres, F. G., Gonzales, K. N., Troncoso, O. P., Chávez, J., & De-la-Torre, G. E. (2022). Sustainable applications of lignocellulosic residues from the production of Brazil nut in the Peruvian Amazon. *Environmental Quality Management*, 31(4), 291–300. https://doi.org/10.1002/tqem.21812

Variação da área superficial de Biochar produzidos a partir de resíduos madeireiros amazônicos em função da temperatura de pirólise

Ariane Mateus De Souza[1]; Camila Juliana Sampaio Pereira[1]; Luís Henrique Cabral Barral[2]; Renata Pereira Lopes Moreira[3]; Antonio Machado Netto[3]; João Gilberto Meza Ucella Filho[1]; Angelica De Cassia Oliveira Carneiro[1]; Ana Márcia Macedo Ladeira Carvalho [2]

[1] Departamento de Engenharia Florestal/UFV
[2] Departamento de Engenharia Ambiental/UFV
[3] Departamento de Química /UFV

Resumo: Este estudo teve como objetivo avaliar a influência da temperatura de pirólise na área superficial específica e nas características morfológicas de biochars produzidos com resíduos amazônicos madeireiros. A biomassa submetida à pirólise lenta nas temperaturas de 450, 550 e 650 °C, com tempo de residência de 45 minutos. A área superficial específica foi determinada pelo método de Brunauer Emmett Teller (BET), enquanto as características morfológicas foram avaliadas por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV). Os resultados demonstraram que o aumento da temperatura promoveu o desenvolvimento da estrutura porosa dos biochars, aumentando a área superficial específica de 0,541 m²/g (BC450) para 160,711 m²/g (BC550) e 269,324 m²/g (BC650). As micrografias obtidas por MEV corroboraram os resultados do BET, evidenciando que o BC450 apresentou estrutura mais preservada e baixa porosidade, enquanto os biochars produzidos a 550 e 650 °C exibiram maior desenvolvimento da porosidade e poros bem definidos, em decorrência da desvolatilização da biomassa e da reorganização da matriz carbonosa. Conclui-se que o aumento da temperatura de pirólise favorece o desenvolvimento da estrutura porosa e da área superficial específica dos biochars, evidenciando o potencial dos resíduos madeireiros amazônicos para a produção de materiais de maior valor agregado com aplicações ambientais e tecnológicas.

Palavras-chave: espécies amazônicas; porosidade; pirólise lenta.

Variation in the surface area of biochar produced from Amazonian wood waste as a function of pyrolysis temperature.

Abstract: This study aimed to evaluate the influence of pyrolysis temperature on the specific surface area and morphological characteristics of biochars produced from Amazonian wood waste. The biomass was subjected to slow pyrolysis at temperatures of 450, 550, and 650 °C, with a residence time of 45 minutes. The specific surface area was determined using the Brunauer-Emmet Teller (BET) method, While the morphological characteristics were evaluated by Scanning Electron Microscopy (SEM). The results demonstrated that the increase in temperature promoted the development of the porous structure of the biochars, increasing the specific surface area from 0.541 m²/g (BC450) to 160.711 m²/g (BC550) and 269.324 m²/g (BC650). The micrographs obtained by SEM corroborated the BET results, showing that BC450 presented a more preserved structure and low porosity, while the biochars produced at 550 and 650 °C exhibited greater development of porosity and well-defined pores, due to the

devolatilization of the biomass and the reorganization of the carbonaceous matrix. It is concluded that increasing the pyrolysis temperature favors the development of the porous structure and specific surface area of biochars, highlighting the potential of Amazonian wood waste for the production of higher value-added materials with environmental and technological applications.

Keywords: Amazonian species; porosity; slow pyrolysis.

1. Introdução

O Brasil lidera mundialmente a produção de carvão vegetal, com 6,6 milhões de toneladas. Etiópia e Nigéria seguem na sequência com 5 milhões e 4,9 milhões de toneladas, respectivamente, também com consumo predominantemente para o mercado interno (IBÁ,2025). Cerca de 70% da madeira processada no Estado do Pará, Brasil, é ilegal. Portanto, a atividade madeireira pode ser associada à degradação da floresta amazônica tanto pela ilegalidade quanto pela ineficiência das indústrias madeireiras, que apresentam baixo rendimento de madeira serrada, levando a uma demanda insustentável por madeira florestal (Silva *et al*., 2023).

Em 2024, a Amazônia Legal transacionou 6.571.030,88 m³ de madeira em tora de florestas nativas; Pará, Mato Grosso e Rondônia seguem no topo, com o Pará em lide nacional em 2024 (Imaflora, 2025).

Com o aumento significativo na produção de resíduos florestais, a produção de biochar no Brasil tem duas origens básicas; a primeira está ligada às florestas plantadas, que no Brasil, em sua grande maioria, são espécies dos gêneros *Eucalyptus* e *Corymbia*, e a segunda está relacionada ao beneficiamento da madeira de origem de florestas nativas, como os resíduos de serraria e da exploração florestal (Carvalho *et al.,* 2017). A estrutura aromática condensada do biochar pode apresentar diversas formas, incluindo carbono amorfo, que predomina em temperaturas de pirólise mais baixas (TOMCZYK, A *et al* 2020).

O biochar é um material rico em carbono e tipicamente produzido por meio da pirólise da biomassa a temperaturas relativamente baixas (300–700 °C) em condições de oxigênio limitado (IPPOLITO *et al* 2020). A diferença química mais pronunciada entre o biochar e outras matérias orgânicas é a proporção muito maior de carbono aromático e estruturas aromáticas condensadas, em contraste com outras estruturas aromáticas da matéria orgânica do solo, como a lignina (TOMCZYK, A *et al* 2020). A produção do biochar a partir desses produtos transforma o carbono em uma forma recalcitrante que pode durar centenas ou milhares de anos, sugerindo que o biochar pode auxiliar na mitigação das mudanças climáticas, sendo uma das poucas

tecnologias com emissão negativa de gases de efeito estufa e benefícios colaterais para o desenvolvimento sustentável (SMITH *et al.* 2019).

A temperatura de pirólise é uma das variáveis que influencia na produção de biochars. Especificamente, com o aumento da temperatura de pirólise, observa-se tipicamente um aumento no teor de C, P, K, Ca e cinzas do biochar, bem como no pH e na área superficial específica (WEBER e QUICKER 2018). Ao escolher o tipo de pirólise, em geral, a pirólise lenta tende a produzir biochars com maior teor de N, S, P disponível, Ca, Mg, maior área superficial e capacidade de troca catiônica (CTC) em comparação com a pirólise rápida (IPPOLITO, J.A *et al* 2020). Logo, este estudo tem como objetivo avaliar a variação da área superficial e as alterações estruturais morfológicas de biochars produzidos a partir de resíduos madeireiros amazônicos em função da temperatura de pirólise.

2. Material e métodos

2.1 Coleta do material

As biomassas utilizadas foram coletadas em uma serraria localizada no município de São Miguel do Guamá, Pará (Figura 1), região de intensa atividade madeireira e elevada geração de resíduos florestais. Os resíduos em formato de sarrafos provenientes de 12 espécies madeireiras amazônicas incluídas na composição da amostra. Após a coleta, os resíduos foram cavaqueados.

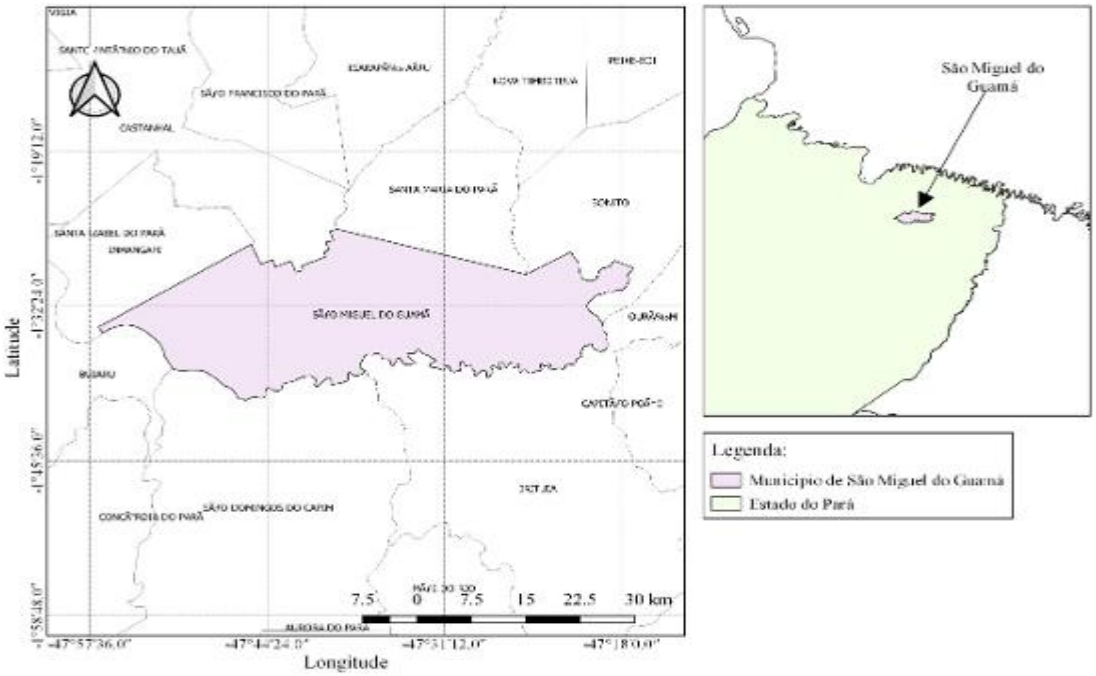


Figura 1: Mapa de localização do município de São Miguel do Guamá (PA).

2.2 Produção do biochars

A produção dos biochars (BC) foi realizada a partir de um mix de biomassa residual na forma de cavacos. Inicialmente, a biomassa foi submetida à secagem em estufa com temperatura controlada de 60 °C até atingir massa constante, com o objetivo de reduzir o teor de umidade (base seca) para valores próximos de 0% (Figura 2). Para o processo de carbonização, a biomassa seca foi acondicionada em um contêiner metálico com dimensões nominais de 0,430 m x 0,160 m x 0,160 m, preenchendo aproximadamente 80% do seu volume útil, de forma a evitar a compactação do material e favorecer a circulação dos gases gerados durante a pirólise. Em seguida, o contêiner foi inserido em um reator elétrico do tipo mufla, modelo GP-Científica 2000**.** Os biochars foram produzidos por meio de pirólise lenta em atmosfera com disponibilidade limitada de oxigênio, empregando três temperaturas finais de carbonização (450, 550 e 650 °C) e tempo de residência de 45 minutos na temperatura final. Após a conclusão do processo, os materiais permaneceram no interior do reator até o resfriamento. Os biochars obtidos foram identificados como BC450**,** BC550 **e** BC650**,** de acordo com a respectiva temperatura final de carbonização.

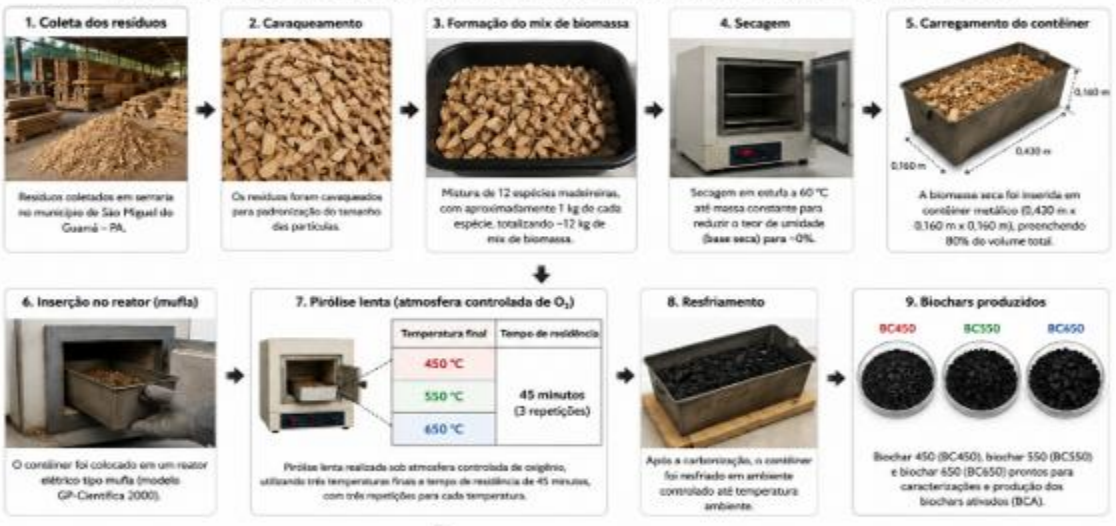


Figura 2: esquema ilustrativo mostrando o processo de produção do biochar.

2.3 Análise da área superficial dos biochars

Para determinar a área superficial específica, o volume e o diâmetro dos porosRe, utilizaram-se 10 mg de amostra, tratadas a 150 °C, sob fluxo de N_2 por um período de 4 horas, por meio do analisador de área superficial e poros – NOVA 800 (Anton Paar). A área superficial específica foi estimada usando a equação BET SMB= 1000.SMB°.qm, enquanto o volume e o

diâmetro dos poros foram calculados utilizando o método BJH, conforme descrito por Barrett, Joyner e Halenda (1951).

2.4 Análise Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

Foi realizada a análise de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) utilizando um equipamento JEOL-JSJ-6010LA, equipado com um detector de Si-li (EDAX). As amostras suportadas em uma fina fita de carbono previamente fixas em um *stub* de latão e metalizadas com ouro antes da análise, em um metalizador Quorum Q150R S. Para tratar as imagens obtidas, foi utilizado o software ImageJ.

3. Resultados e discussão

O aumento da temperatura de pirólise promoveu um aumento significativo da área superficial específica dos biochars (Tabela 1). O BC450 apresentou área superficial específica bastante reduzida, indicando que essa temperatura não foi suficiente para promover a desvolatilização completa da biomassa e a formação de uma estrutura porosa bem desenvolvida. Segundo Ippolito *et al.* (2020), a área superficial específica do biochar tende a aumentar conforme o aumento da temperatura de pirólise. Os autores observaram um aumento expressivo da área superficial à medida que a temperatura aumentou de 300 para 800 °C, passando de 27,1 para 208 $m^2 g^{-1}$, confirmando que o aumento da temperatura influencia diretamente no aumento da área superficial.

Assim, parte dos poros permaneceu pouco desenvolvida ou parcialmente obstruída. Para o biochar produzido a 550 °C (BC550), observou-se um aumento expressivo da área superficial específica. Já o biochar produzido a 650 °C (BC650) apresentou a maior área superficial específica, caracterizando um material altamente poroso.

Amostra	Área superficial
BC450	0,541 m²/g
BC550	160,711 m²/g
BC650	269,324 m²/g

Tabela1; área superficial de cada biochars produzido em diferentes temperaturas.

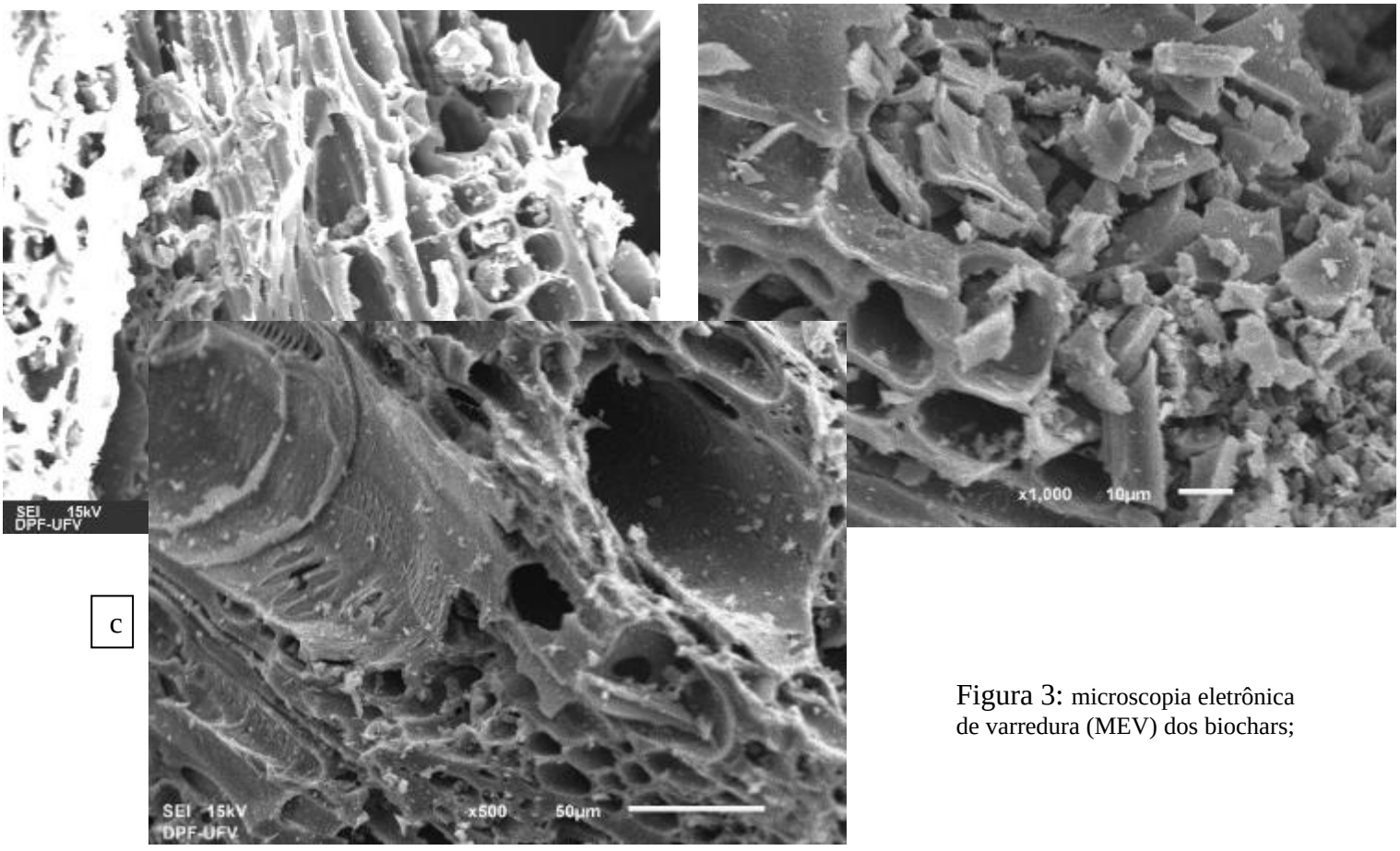
Literatura mostra que temperaturas mais elevadas intensificam a carbonização da biomassa e a reorganização estrutural, resultando em uma matriz mais aromática e com maior área superficial específica. Segundo Domingues *et al.* (2017), o aumento da temperatura de pirólise está diretamente relacionado ao desenvolvimento da porosidade e da área superficial dos biochars, especialmente em materiais produzidos a partir de biomassas lenhosas. Assim, os resultados do trabalho estão coerentes com a literatura.

Segundo Zhao *et al.* (2017), biochars produzidos entre 550 e 700 °C apresentam maior desenvolvimento da área superficial devido à intensificação da devolatilização da biomassa e à formação de microporos. A literatura corrobora com os dados apresentados, pois essa tendência descreve que a temperatura de pirólise é um dos principais fatores responsáveis pela formação da estrutura porosa dos biochars (LENG *et al.*, 2021). De forma semelhante, Tomczyk *et al*. (2020) relatam que temperaturas mais elevadas favorecem o aumento da área superficial específica e do volume de poros, embora reduzam a quantidade de grupos funcionais oxigenados presentes na superfície do biochar.

A microscopia eletrônica de varredura (MEV) evidenciou alterações morfológicas significativas nos biochars em função da temperatura de pirólise (Figura 3). O BC450 apresentou estrutura mais preservada, com canais longitudinais característicos da biomassa lignocelulósica e baixa área superficial específica. No BC550, observou-se o início do desenvolvimento da porosidade, acompanhado pelo aumento da área superficial para 160,711 m²/g. Já o BC650 exibiu estrutura mais desorganizada, com maior quantidade de cavidades e poros bem desenvolvidos, resultando na maior área superficial específica (269,324 m²/g).

a

b



c

Figura 3: microscopia eletrônica de varredura (MEV) dos biochars;

(a) biochar produzido a 450° (BC450), (b) biochar produzido a 550° (BC550), (c) biochar produzido a 650° (BC650).

Dessa forma, a associação entre as análises de BET e MEV confirma que a elevação da temperatura de pirólise favorece o desenvolvimento da estrutura porosa dos biochars. Os resultados obtidos evidenciam que a temperatura de pirólise exerce papel determinante na qualidade estrutural dos biochars produzidos, influenciando diretamente o desenvolvimento da porosidade e da área superficial específica.

4. Conclusão

A produção de biochars a partir de resíduos madeireiros amazônicos em diferentes temperaturas de pirólise demonstrou que a temperatura influencia diretamente o desenvolvimento da estrutura porosa do material. O biochar que apresentou melhores características foi obtido a 650°C, apresentou a maior área superficial específica (269,324 m^2/g), indicando uma estrutura altamente porosa. As análises de BET e MEV apresentaram resultados complementares, confirmando que a elevação da temperatura de pirólise favorece o desenvolvimento da porosidade dos biochars. Conclui-se que, a temperatura de pirólise é um dos principais fatores que determinam as propriedades estruturais do biochar, sendo que o BC produzido a 650°C proporcionou o material com maior área superficial e potencial para aplicações que requerem elevada capacidade adsortiva.

Agradecimentos

Ao Departamento de Engenharia Florestal (DEF) da Universidade Federal de Viçosa (UFV) e ao Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal (PPGCF/UFV). À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) pelo apoio financeiro. Ao Laboratório de Painéis e Energia da Madeira (LAPEM), ao Laboratório de Resíduos da Indústria Florestal (LABRIF) ao Laboratório de Celulose e Papel (LCP) e ao Laboratório de Nanomateriais e Química Ambiental (LaNaQua).

Referência

Carvalho, A. F., Brand, M. A., Nisgoski, S., Muñiz, G. I. B., Friederichs, G., Kuster, L. C., & Santos, T. S. (2017). Anatomia do carvão originário de cinco espécies comercializadas no

estado de Santa Catarina. *Ciência da Madeira (Brazilian Journal of Wood Science)*, *8*(3), 158–167.

Domingues, R. R., Trugilho, P. F., Silva, C. A., de Melo, I. C. N. A., Melo, L. C. A., Magriotis, Z. M., & Sánchez-Monedero, M. A. (2017). Propriedades do biochar derivado de madeira e biomassas ricas em nutrientes com o objetivo de benefícios agronômicos e ambientais. *PLOS ONE*, *12*, e0176884.

Elliott P. Barrett, Leslie G. Joyner, Paul P. Halenda; The Determination of Pore Volume and Area Distributions in Porous Substances. I. Computations from Nitrogen Isotherms. *Journal American Chemical Society* 1 January 1951; 73 (1): 373–380. https://doi.org/10.1021/ja01145a126

Indústria Brasileira de Árvores. (2025). *Relatório anual 2025*. https://iba.org/wp-content/uploads/2025/10/IBA_relatorio_digital_POR.pdf

Instituto de Manejo e Certificação Florestal e Agrícola. (2025). *Anuário Timberflow: diagnóstico da madeira nativa na Amazônia Legal em 2024*. Imaflora. https://admin.imaflora.org/public/media/biblioteca/anuario_timberflow_2025_vf.pdf

Ippolito, J. A., Cui, L., Kammann, C., et al. (2020). A escolha da matéria-prima, a temperatura e o tipo de pirólise influenciam as características do biochar: uma revisão abrangente de análise de metadados. *Biochar, 2*, 421–438. https://doi.org/10.1007/s42773-020-00067-x

Ippolito, J.A., Cui, L., Kammann, C. *et al.* Feedstock choice, pyrolysis temperature and type influence biochar characteristics: a comprehensive meta-data analysis review. *Biochar* **2**, 421–438 (2020). https://doi.org/10.1007/s42773-020-00067-x

Jindo, K., Mizumoto, H., Sawada, Y., Sanchez-Monedero, M. A., & Sonoki, T. (2014). Caracterização física e química de biochars derivados de diferentes resíduos agrícolas. *Biogeosciences, 11*, 6613–6621.

Leng, L., Xiong, Q., Yang, L., Li, H., Zhou, Y., Zhang, W., Jiang, S., Li, H., & Huang, H. (2021). An overview on engineering the surface area and porosity of biochar. *Science of the Total Environment, 763*, 144204. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144204

Silva, E. F. F., Brasil, A. C. de M., & Blanco, C. J. C. (2023). Wood production and its correlation with socioeconomic and environmental indicators in the Amazon region. *Sustainability*, *15*(15), 11932. https://doi.org/10.3390/su151511932

Smith, P., Adams, J., Beerling, D. J., Beringer, T., Calvin, K. V., Fuss, S., Griscom, B., Hagemann, N., Kammann, C., Kraxner, F., Minx, J. C., Popp, A., Renforth, P., Vicente, J. L. V., & Keesstra, S. (2019). Impactos das opções de remoção de gases de efeito estufa em terra sobre os serviços ecossistêmicos e os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável das Nações Unidas. *Annual Review of Environment and Resources, 44*, 255–286.

Tomczyk, A., Sokołowska, Z., & Boguta, P. (2020). Propriedades físico-químicas do biochar: efeitos da temperatura de pirólise e do tipo de matéria-prima. *Review of Environmental Science and Biotechnology, 19*, 191–215. https://doi.org/10.1007/s11157-020-09523-3

Weber, K., & Quicker, P. (2018). Properties of biochar. *Fuel, 217*, 240–261.

Zhao, S. X., Na, T., & Wang, X. D. (2017). Efeito da temperatura nas propriedades estruturais e físico-químicas do biochar com galhos de macieira como matéria-prima. *Energies, 10*, 1293.

BIORREFINARIA & NÃO MADEIREIROS

A química florestal em um contexto de mudanças climáticas

Camila da Silva Bonjour[1]; Maria Eduarda Grigolate Campos[1]; Lucas José de Oliveira Valente[1]; Lara Luísa Mendes Nascimento[1]; Eric Rodrigues de Araújo[1]; Marisa Nunes Assis da Silva[1]; Luiza Xavier Tomaz Lima[1]; João Gilberto Meza Ucella-Filho[1].

[1] Universidade Federal de Viçosa

Resumo: As mudanças climáticas alteram a produção de metabólitos especializados em espécies florestais, influenciando mecanismos de adaptação e o potencial de bioprospecção. Este estudo teve como objetivo analisar a influência das mudanças climáticas sobre a química florestal e identificar os principais estressores ambientais, as principais classes de metabólitos e padrões de resposta química. Para isso, foi realizada uma revisão bibliométrica integrada à síntese temática de 164 artigos científicos da base Scopus. Observou-se crescimento da produção científica, com predomínio de estudos sobre déficit hídrico e aquecimento em diferentes ecossistemas florestais. Compostos fenólicos, terpenoides e compostos orgânicos voláteis foram as classes mais investigadas. As respostas metabólicas dependeram da interação entre estressor, espécie, tecido vegetal e classe química, evidenciando elevada plasticidade química frente às condições ambientais. Os resultados destacam a importância da química florestal para compreender a adaptação das espécies às mudanças climáticas e subsidiar estratégias de conservação, manejo sustentável, restauração ecológica e bioprospecção.

Palavras-chave: Bioprospecção; Metabolômica Florestal; Plasticidade Química.

Forest chemistry in a changing climate context

Abstract: Climate change reshapes forest chemistry by altering the production of specialized metabolites with bioprospecting potential. This study conducted a bibliometric review integrated with a thematic synthesis to characterize the evolution of scientific production and identify patterns of forest chemical responses to climatic stressors. A total of 164 articles retrieved from the Scopus database were analyzed. Scientific output increased substantially, with drought and warming emerging as the predominant research topics in temperate forests. Phenolic compounds, terpenoids, and volatile organic compounds were the most frequently investigated chemical classes. The synthesis showed that climate change promotes a reorganization of forest chemistry driven by interactions among environmental stressors, species, plant tissues, and chemical classes. These findings highlight the importance of chemical plasticity for species adaptation and bioprospecting.

Keywords: Bioprospecting; Forest Metabolomics; Chemical Plasticity.

1. Introdução

As mudanças climáticas estão alterando simultaneamente a temperatura, a disponibilidade hídrica, a concentração atmosférica de CO_2 e outros estressores ambientais, comprometendo o funcionamento dos ecossistemas florestais. Além de afetarem o crescimento,

a produtividade e a sobrevivência das árvores, essas mudanças remodelam a química florestal ao modificar a produção de metabólitos envolvidos na defesa, comunicação e adaptação ao ambiente (Holopainen, 2011). Considerando a elevada diversidade química das espécies arbóreas, tais alterações repercutem desde processos fisiológicos até a dinâmica dos ecossistemas, influenciando sua estabilidade e capacidade de resposta às mudanças ambientais.

A diversidade metabólica das árvores constitui um importante mecanismo de adaptação ao ambiente e uma fonte de compostos de elevado interesse biotecnológico. Fenólicos, terpenoides, alcaloides e compostos orgânicos voláteis desempenham funções essenciais na proteção contra estresses bióticos e abióticos e apresentam aplicações nos setores farmacêutico, cosmético, alimentício e de bioprodutos. Assim, alterações na produção desses metabólitos podem comprometer tanto a resiliência das florestas quanto o aproveitamento sustentável da biodiversidade química.

Entretanto, as respostas da química florestal às mudanças climáticas dependem fortemente do contexto biológico e ambiental. Os efeitos da seca, do aquecimento, do CO_2 elevado, do ozônio e de outros estressores variam conforme a espécie, o tecido vegetal, o estágio de desenvolvimento e a interação entre fatores ambientais (Holopainen et al., 2018; Berini et al., 2018; Li et al., 2020). Além disso, respostas observadas sob estressores isolados frequentemente não se repetem quando múltiplos fatores atuam simultaneamente, dificultando a identificação de padrões gerais e a extrapolação dos resultados para diferentes espécies e ecossistemas.

Os avanços da metabolômica baseada em espectrometria de massas ampliaram significativamente a capacidade de caracterizar alterações em redes metabólicas e identificar moléculas associadas à tolerância ao estresse e ao potencial biotecnológico. Entretanto, a diversidade de espécies, classes químicas, condições experimentais e abordagens analíticas ainda dificulta comparações abrangentes e limita a construção de uma visão integrada sobre os efeitos das mudanças climáticas na química florestal (Rodrigues et al., 2021). Nesse cenário, revisões integrativas tornam-se essenciais para sintetizar evidências dispersas e identificar tendências que orientem futuras pesquisas.

Nesse contexto, permanecem pouco compreendidos quais fatores climáticos estruturam a produção científica, quais classes químicas concentram os esforços de investigação e se existem padrões consistentes nas respostas metabólicas das espécies florestais. Assim, este estudo teve como objetivo analisar a influência das mudanças climáticas sobre a química florestal, identificando os principais estressores ambientais, os metabólitos secundários investigados e os padrões de resposta química das espécies florestais, contribuindo para a

compreensão de suas adaptações bioquímicas e para o avanço de estratégias de conservação, manejo e bioprospecção.

2. Material e métodos

Foi conduzida uma revisão bibliométrica integrada a uma síntese temática estruturada para caracterizar a produção científica sobre os efeitos das mudanças climáticas na química florestal. A abordagem combinou indicadores bibliométricos com análise qualitativa do conteúdo científico, seguindo recomendações consolidadas para revisões bibliométricas voltadas à identificação de tendências, estruturas intelectuais e lacunas do conhecimento (Donthu et al., 2021; Hallinger & Kovačević, 2022; Hallinger, 2023). Os critérios de elegibilidade foram definidos previamente e aplicados de forma padronizada durante todo o processo de triagem. O fluxo metodológico adotado para a identificação, seleção, extração, padronização e análise dos estudos é apresentado na **Figura 1**.

A busca bibliográfica foi realizada exclusivamente na base de dados **Scopus**, em **9 de julho de 2026**, utilizando uma estratégia booleana estruturada em três eixos temáticos: (i) sistemas florestais e espécies lenhosas; (ii) fatores relacionados às mudanças climáticas; e (iii) química florestal, metabólitos secundários e compostos bioativos. A Scopus foi selecionada por sua ampla cobertura multidisciplinar e por sua reconhecida aplicabilidade em estudos bibliométricos. A busca recuperou **333 artigos** publicados em língua inglesa, posteriormente submetidos à triagem sequencial de títulos e resumos. Foram excluídos estudos que não abordavam simultaneamente organismos ou ecossistemas florestais, fatores climáticos e alterações na composição química, em metabólitos especializados ou em compostos orgânicos voláteis biogênicos, resultando em um corpus final de **164 artigos**.

Cada artigo foi submetido à extração padronizada de dez dimensões analíticas: identificação, espécie, bioma ou ecossistema, fator climático, tipo de estudo, tecido ou órgão analisado, classe química, abordagem analítica, direção da resposta e principal resultado. Sinônimos, variações taxonômicas e terminológicas foram harmonizados em categorias-mãe para reduzir a fragmentação dos dados, padronizar a nomenclatura e ampliar a comparabilidade entre os estudos, conforme recomendações para o pré-processamento de dados bibliométricos (Nowakowska, 2025). A classificação foi multirrótulo, permitindo que um mesmo artigo contribuísse simultaneamente para diferentes categorias de fatores climáticos e classes químicas.

A direção das respostas químicas foi classificada em cinco categorias: aumento, redução, resposta mista, resposta dependente do contexto e ausência de efeito significativo. A síntese integrou frequências absolutas e relativas, evolução temporal das publicações e cruzamentos entre fatores climáticos, classes químicas e direção das respostas. Os registros originais permaneceram separados das categorias harmonizadas durante todo o processamento, garantindo rastreabilidade, transparência e reprodutibilidade das análises.



Figura 1 – Fluxograma metodológico da revisão bibliométrica, ilustrando as etapas de identificação, seleção, extração, padronização e análise dos estudos incluídos.

3. Resultados e discussão

3.1. Panorama bibliométrico da produção científica

A análise dos 164 artigos publicados entre 1993 e 2026 revelou um campo científico em rápida expansão, especialmente nas duas últimas décadas. O corpus reuniu 5.937 citações, média de 36,2 citações por artigo e índice h de 40, envolvendo 955 autores, 87 periódicos e 51 países. A concentração de 65 publicações entre 2023 e 2026 evidencia o crescimento recente do interesse pela interface entre mudanças climáticas e química florestal, embora os dados de 2026 representem um período ainda incompleto. A predominância das palavras-chave drought, climate change, metabolism, metabolomics e volatile organic compounds indica a transição de estudos focados em metabólitos isolados para abordagens integrativas que relacionam metabolismo, fisiologia vegetal e ecologia química, evidenciando a consolidação da área.

A produção científica foi liderada pela China (47 artigos) e pelos Estados Unidos (46), seguidos por Espanha (25), Alemanha (23) e Finlândia (18). Entretanto, produtividade e impacto não apresentaram relação direta. Os Estados Unidos acumularam 2.498 citações,

enquanto Finlândia e Alemanha registraram as maiores médias de citações por artigo. Em contraste, o Brasil contribuiu com apenas 12 publicações, evidenciando a necessidade de ampliar investigações em ecossistemas tropicais, ainda sub-representados na literatura internacional.

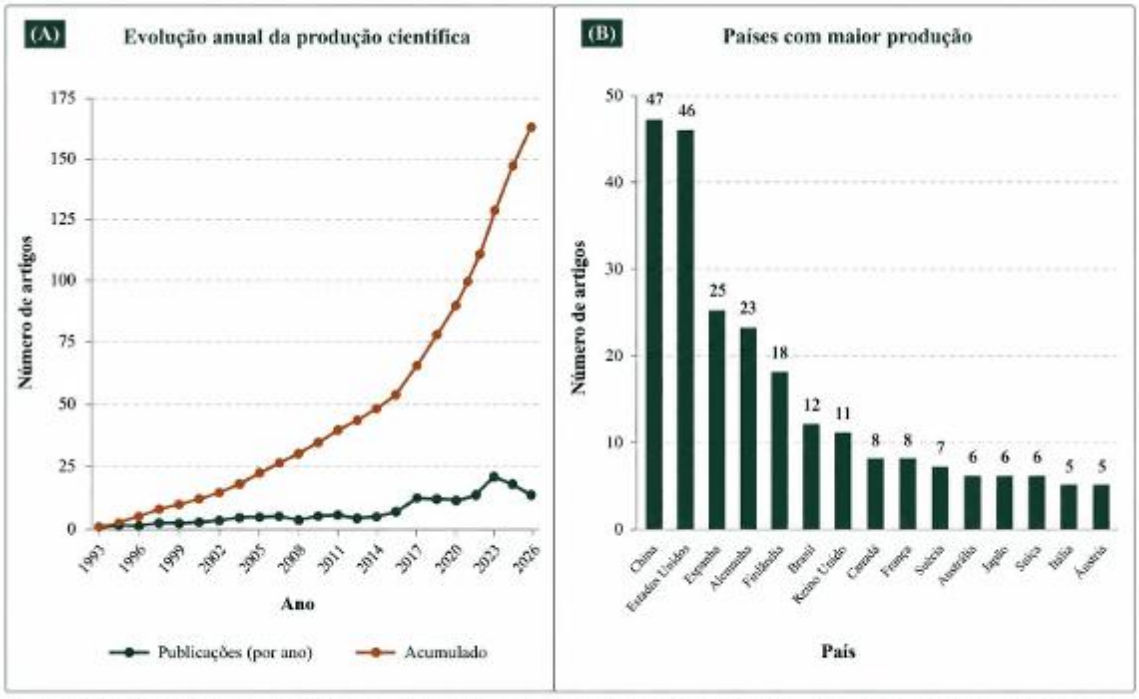


Figura 2 – Panorama da produção científica sobre mudanças climáticas e química florestal. (A) Evolução anual do número de publicações e da produção científica acumulada entre 1993 e 2026. (B) Países com maior número de publicações incluídas na revisão bibliométrica.

3.2. Estrutura temática das pesquisas

A seca constituiu o principal fator climático investigado, presente em 91 estudos (55,5%), seguida pelo aquecimento (61; 37,2%) e pelo CO_2 elevado (35; 21,3%). Outros fatores, como deposição de nitrogênio, ozônio, sazonalidade, radiação, frio e inundação, receberam atenção substancialmente menor, indicando predominância dos estressores com maior potencial de limitar o desempenho fisiológico das árvores.

Entre as classes químicas destacaram-se fenólicos e derivados (42,7%), terpenoides e isoprenoides (36,0%), estudos metabolômicos ou fitoquímicos amplos (30,5%) e compostos orgânicos voláteis (24,4%). A predominância dessas classes reflete seu papel nos mecanismos de defesa e adaptação, enquanto lipídios, hormônios vegetais e alcaloides permanecem pouco explorados, evidenciando oportunidades para futuras pesquisas.

3.3. Respostas aos diferentes fatores climáticos

Os cruzamentos entre fatores climáticos e classes químicas evidenciaram que o déficit hídrico influencia praticamente todas as vias metabólicas investigadas, com maior frequência de associações envolvendo compostos fenólicos (35 estudos) e terpenoides/isoprenoides (32). Também predominou em pesquisas sobre carboidratos, osmólitos, compostos nitrogenados e compostos orgânicos voláteis, evidenciando seu amplo efeito sobre o metabolismo vegetal.

O aquecimento concentrou-se principalmente em estudos envolvendo terpenoides, isoprenoides e compostos orgânicos voláteis, enquanto experimentos com CO_2 elevado focalizaram compostos fenólicos. Esses resultados demonstram que diferentes componentes das mudanças climáticas modulam vias metabólicas distintas, cuja magnitude e direção dependem da interação entre o estressor, a classe química e as características biológicas das espécies, corroborando Holopainen et al. (2018) e Feng et al. (2019).

3.4. Predominância de respostas dependentes do contexto

O principal resultado desta revisão foi a predominância de respostas classificadas como mistas ou dependentes do contexto, observadas em 117 estudos (71,3%), sobretudo nos trabalhos envolvendo seca (62), aquecimento (43) e CO_2 elevado (32). Esse padrão demonstra que a resposta da química florestal é fortemente modulada por diferenças entre espécies, tecidos, intensidade e duração dos estresses e pelas interações entre múltiplos fatores ambientais. Assim, a elevada variabilidade observada reflete a plasticidade química das árvores, fundamental para sua aclimatação e adaptação.

3.5. Lacunas e perspectivas para pesquisas futuras

Apesar da rápida expansão da literatura, persistem importantes lacunas. Cerca de 73% dos estudos concentraram-se em folhas e acículas, enquanto raízes, tecidos lenhosos, serapilheira e rizosfera permanecem pouco investigados. Além disso, predominam pesquisas em florestas temperadas, com reduzida representação de ecossistemas tropicais.

Sob o ponto de vista metodológico, prevalecem experimentos controlados de curta duração e análises fitoquímicas tradicionais. Em contraste, abordagens multiômicas integradas e experimentos multifatoriais ainda são pouco frequentes. O avanço do conhecimento dependerá da integração entre metabolômica, transcriptômica, proteômica e análises em escala

ecossistêmica para compreender os efeitos combinados das mudanças climáticas sobre a química florestal.

Embora esta revisão forneça um panorama abrangente da produção científica internacional, seus resultados devem ser interpretados considerando que a busca foi realizada exclusivamente na base Scopus e restringiu-se a artigos em língua inglesa, o que pode ter limitado a recuperação de estudos regionais e de outras bases.

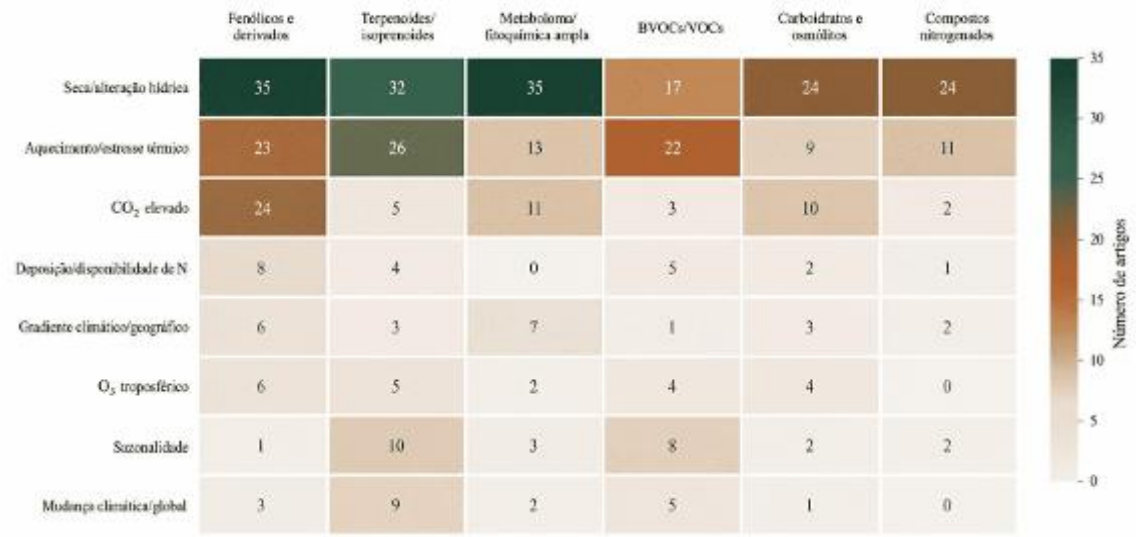


Figura 3 – Heatmap da distribuição temática entre fatores climáticos e classes químicas na literatura analisada. Valores mais elevados (verde escuro) indicam maior frequência de estudos para determinada combinação entre fator climático e classe química.

4. Conclusões

Esta revisão bibliométrica evidenciou que a pesquisa sobre os efeitos das mudanças climáticas na química florestal encontra-se em rápida expansão, com predominância de estudos sobre seca e aquecimento, concentrados em espécies de regiões temperadas e em tecidos foliares. A maior frequência de investigações envolvendo compostos fenólicos, terpenoides e compostos orgânicos voláteis reforça o papel dessas classes químicas nos mecanismos de resposta e adaptação das árvores aos estresses ambientais.

A síntese das evidências demonstra que as mudanças climáticas promovem uma reorganização dinâmica do metabolismo vegetal, cujas respostas dependem da interação entre o estressor ambiental, a espécie, o tecido e a classe química avaliada. Essa variabilidade evidencia a plasticidade química como um componente central da aclimatação e da adaptação das espécies florestais.

Apesar dos avanços, permanecem lacunas relacionadas à limitada representatividade de ecossistemas tropicais, à escassez de estudos sobre compartimentos subterrâneos e ao predomínio de experimentos de curta duração e de fator único. A incorporação de abordagens multiômicas e experimentos multifatoriais será essencial para compreender os mecanismos que regulam a química florestal em cenários climáticos futuros e subsidiar estratégias de conservação, manejo e uso sustentável dos recursos florestais.

Assim, compreender a plasticidade química das espécies florestais representa um requisito para prever a capacidade adaptativa das florestas e fortalecer sua resiliência frente às mudanças climáticas.

5. Agradecimentos

À Universidade Federal de Viçosa (UFV), ao Departamento de Engenharia Florestal (DEF), ao Laboratório de Resíduos da Indústria Florestal (LABRIF), à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG – Projeto APQ-02997-25), ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES – Código de Financiamento 001) pelo apoio à realização deste trabalho.

6. Referências bibliográficas

Berini, J. L., Brockman, S. A., Hegeman, A. D., Reich, P. B., Muthukrishnan, R., Montgomery, R. A., Forester, J. D., Amatangelo, K. L., Cavender-Bares, J., & Tiffin, P. (2018). Combinations of abiotic factors differentially alter production of plant secondary metabolites in five woody plant species in the boreal–temperate transition zone. Frontiers in Plant Science, 9, Article 1257. https://doi.org/10.3389/fpls.2018.01257

Donthu, N., Kumar, S., Mukherjee, D., Pandey, N., & Lim, W. M. (2021). How to conduct a bibliometric analysis: An overview and guidelines. Journal of Business Research, 133, 285–296. https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2021.04.070

Feng, Z., Rütting, T., Pleijel, H., Wallin, G., & Reich, P. B. (2019). Isoprene is more affected by climate drivers than monoterpenes: A meta-analytic review on plant isoprenoid emissions. Plant, Cell & Environment, 42(6), 1939–1949. https://doi.org/10.1111/pce.13535

Hallinger, P. (2023). Mapping the contributions of the Review of Educational Research to education, 1931–2020: A bibliometric review. Review of Educational Research, 93(6), 791–824. https://doi.org/10.3102/00346543221132771

Hallinger, P., & Kovačević, J. (2022). Applying bibliometric review methods in education: Rationale, definitions, analytical techniques, and illustrations. In R. J. Tierney, F. Rizvi, & K. Ercikan (Eds.), International encyclopedia of education (4th ed., pp. 546–556). Elsevier. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818630-5.05070-3

Holopainen, J. K. (2011). Can forest trees compensate for stress-generated growth losses by induced production of volatile compounds? Tree Physiology, 31(12), 1356–1377. https://doi.org/10.1093/treephys/tpr111

Holopainen, J. K., Virjamo, V., Ghimire, R. P., Blande, J. D., Julkunen-Tiitto, R., & Kivimäenpää, M. (2018). Climate change effects on secondary compounds of forest trees in the Northern Hemisphere. Frontiers in Plant Science, 9, Article 1445. https://doi.org/10.3389/fpls.2018.01445

Li, T., Tiiva, P., Rinnan, Å., Julkunen-Tiitto, R., Michelsen, A., & Rinnan, R. (2020). Long-term effects of elevated CO_2, nighttime warming and drought on plant secondary metabolites in a temperate heath ecosystem. Annals of Botany, 125(7), 1065–1075. https://doi.org/10.1093/aob/mcaa037

Nowakowska, M. (2025). A comprehensive approach to preprocessing data for bibliometric analysis. Scientometrics, 130, 5191–5225. https://doi.org/10.1007/s11192-025-05415-x

Rodrigues, A. M., Miguel, C., Chaves, I., & António, C. (2021). Mass spectrometry-based forest tree metabolomics. Mass Spectrometry Reviews, 40(2), 126–157. https://doi.org/10.1002/mas.21603

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

A temperatura de pirólise determina a compatibilidade entre biochar de bambu (*Bambusa vulgaris)* e *Trichoderma harzianum*

Sarah Verderame Milagres[1]; Lana Crystina Alves da Silva; Isabelle Silveira Martins Honorato[1]; Leila Aparecida Lopes[1]; Ricardo Fernandes Pena[1]; Angélica de Cássia Oliveira Carneiro[1]; Vinícius Resende de Castro[1]

[1] Universidade Federal de Viçosa

Resumo: O biochar tem sido amplamente investigado como condicionador de solo e uma ferramenta para o sequestro de carbono, mas seu efeito sobre microrganismos benéficos, como o fungo biocontrolador *Trichoderma harzianum*, varia conforme as condições de pirólise. Neste estudo, avaliou-se o efeito da temperatura de produção do biochar de bambu (*Bambusa vulgaris*) sobre o crescimento micelial de *T. harzianum*. O biochar foi produzido a 450, 550 e 650 °C, com tempo de residência de 30 minutos, sendo incorporado ao meio de cultura Batata-Dextrose-Ágar (BDA) em diferentes concentrações (0,5; 1,0 e 2,0 g). Os resultados indicaram que a temperatura de 550 °C na dose de 0,5 g estimulou o crescimento micelial, enquanto as temperaturas de 450 e 650 °C causaram retardamento do desenvolvimento fúngico. Conclui-se que o biochar de bambu produzido na temperatura intermediária de 550 °C, em baixas concentrações, é o mais viável para associação com o inoculante de *T. harzianum*.

Palavras-chave: Inoculantes microbianos; Pirólise; Condicionador de solo.

The pyrolysis temperature determines the compatibility between bamboo biochar (*Bambusa vulgaris*) and *Trichoderma harzianum*

Abstract: Biochar has been extensively studied as a soil conditioner and a tool for carbon sequestration, but its effect on beneficial microorganisms, such as the biocontrol fungus *Trichoderma harzianum*, varies depending on pyrolysis conditions. In this study, we evaluated the effect of the production temperature of bamboo (*Bambusa vulgaris*) biochar on the mycelial growth of *T. harzianum*. The biochar was produced at 450, 550, and 650 °C, with a residence time of 30 minutes, and was incorporated into Potato-Dextrose-Agar (PDA) culture medium at different concentrations (0.5, 1.0 and 2.0 g). The results indicated that a temperature of 550 °C at a dose of 0.5 g stimulated mycelial growth, while temperatures of 450 and 650 °C slowed fungal development. It is concluded that bamboo biochar produced at the intermediate temperature of 550 °C, at low concentrations, is the most viable for use with the *T. harzianum* inoculant.

Keywords: Microbial inoculants; Pyrolysis; Soil conditioner.

1. Introdução

Frente às mudanças climáticas, a agricultura e a silvicultura enfrentam o desafio de elevar a produtividade minimizando os impactos ambientais. Nesse cenário, torna-se essencial reduzir a dependência de insumos químicos nos sistemas de produção (Sani et al., 2020). Nesse contexto, estratégias que integram o sequestro de carbono à melhoria do solo e ao estímulo microbiológico são pilares da agricultura regenerativa e da bioeconomia (Sher et al., 2024), cenário no qual o biochar tem se destacado. Produzido pela pirólise de biomassa em ambiente com oxigênio limitado, esse material carbonáceo possui elevada estabilidade, alta porosidade e capacidade de adsorção. Tais propriedades favorecem o armazenamento de carbono a longo prazo e aprimoram os atributos físicos, químicos e biológicos do solo (Centro de Estudos de Carbono em Agricultura Tropical [CCarbon/USP], 2025).

Entretanto, essas características são fortemente influenciadas pela matéria-prima utilizada e pelas condições de produção, como temperatura de pirólise e tempo de residência (Jiang et al., 2016), as quais podem influenciar a composição química, a distribuição dos grupos funcionais, a estrutura dos poros e a interação com os microrganismos presentes no solo (Rezende et al., 2011).

Os fungos do gênero *Trichoderma* desempenham um importante papel nos sistemas agrícolas sustentáveis devido à sua capacidade de controlar fitopatógenos, estimular o crescimento vegetal, aumentar a absorção de nutrientes e induzir mecanismos de resistência nas plantas (Meyer et al., 2019). Por tais benefícios, a espécie *Trichoderma harzianum* vem sendo amplamente empregada como bioinsumo, cuja eficiência prática está diretamente associada à sua capacidade de sobrevivência, colonização e estabelecimento no substrato (Jesus, 2026).

Nos últimos anos, o biochar passou a ser considerado um excelente suporte físico para esses microrganismos benéficos. Sua elevada porosidade e capacidade de retenção de água fornecem microambientes protegidos que favorecem a sobrevivência fúngica e a disponibilidade de nutrientes (Pantelides et al., 2023). Entre as fontes de biomassa para sua produção, o bambu (*Bambusa vulgaris*) destaca-se pelo rápido crescimento, alta produtividade de matéria seca e características estruturais que resultam em carvões altamente porosos e estáveis (Bispo et al., 2025).

No entanto, a maior parte dos estudos ainda se concentra nos efeitos isolados do biochar sobre os atributos químicos do solo, permanecendo escassas as informações sobre como as condições de pirólise dessa biomassa afetam diretamente o desenvolvimento de agentes de

biocontrole. Compreender essa dinâmica é fundamental para o desenvolvimento de formulações que combinem eficiência biológica e sequestro de carbono (Li et al., 2026).

Assim, este estudo teve como objetivo avaliar o efeito do biochar de bambu (*Bambusa vulgaris*) sobre o crescimento micelial de *Trichoderma harzianum*, testando diferentes temperaturas de produção (450, 550 e 650 °C) e doses de aplicação do material.

2. Material e métodos

2.1 Delineamento experimental

O experimento foi conduzido em delineamento inteiramente casualizado, em esquema fatorial 3 × 3, composto por três temperaturas de pirólise do biochar (450, 550 e 650 °C) e três concentrações de biochar incorporadas ao meio de cultura (0,5; 1,0 e 2,0 g por placa de Petri), acrescido de um tratamento controle contendo apenas meio batata-dextrose-ágar (BDA) e de um tratamento contendo exclusivamente biochar (1,0 g), sem adição de meio nutritivo. Cada tratamento foi constituído por três repetições, sendo cada placa de Petri considerada uma unidade experimental.

2.2 Produção do biochar

O biochar foi produzido a partir de colmos de *Bambusa vulgaris* com cerca de 4 anos de idade, coletados no Departamento de Engenharia Florestal (DEF) da Universidade Federal de Viçosa (UFV), em Viçosa-MG. Os colmos foram previamente secos ao ar e triturados para a produção de cavacos. A biomassa *in natura* foi submetida à pirólise lenta em forno mufla, nas temperaturas de 450, 550 e 650 °C, durante 30 minutos. O material resultante foi moído e peneirado, sendo utilizada a fração passante em peneira de 60 mesh para a caracterização granulométrica de todos os experimentos (Pena, 2026, pp. 51–52).

2.3 Cultivo do fungo

Foi utilizada uma cepa de *Trichoderma harzianum* obtida a partir do produto comercial Trichodermil® SC 1306. A multiplicação foi realizada em placas contendo meio BDA esterilizado em autoclave (121 °C, 1 atm., 30 min). A inoculação ocorreu em câmara de fluxo laminar previamente descontaminada com etanol 70% e radiação ultravioleta. As placas permaneceram incubadas em câmara BOD a 25 ± 1 °C até completa colonização do meio.

Após o crescimento da cultura-mãe, discos miceliais de aproximadamente 5 mm de diâmetro foram retirados da região periférica da colônia utilizando cortador metálico estéril e transferidos para o centro das placas experimentais.

2.4 Preparação dos tratamentos

O biochar esterilizado foi distribuído uniformemente nas placas de Petri nas quantidades de 0,5; 1,0 e 2,0 g. Em seguida, 20 mL de meio BDA resfriado foram adicionados às placas sob condições assépticas. Após solidificação do meio, realizou-se a inoculação do fungo. As placas foram incubadas em BOD a 25 ± 1 °C, com fotoperíodo ausente e umidade relativa controlada. As placas foram distribuídas aleatoriamente no interior da incubadora, sendo sua posição alterada periodicamente para minimizar possíveis efeitos de localização.

2.5 Avaliação do crescimento micelial

O crescimento radial foi monitorado a cada 48 horas após a inoculação até que a colônia atingisse a borda da placa. As imagens digitais das placas foram obtidas sob condições padronizadas de iluminação e distância focal, sendo posteriormente analisadas no software ImageJ (National Institutes of Health, EUA). O diâmetro médio das colônias foi determinado a partir de duas medidas ortogonais.

Para determinar o desenvolvimento micelial do fungo nos diferentes tratamentos com biochar, foram empregadas as metodologias propostas por Hüller et al. (2019) e Silveira et al. (2003), por meio do cálculo do Índice de Crescimento Micelial (ICM) (Equação 1):

$$ICM = \sum (Cn / Nn) \quad (1)$$

Onde: Cn = crescimento micelial para cada dia de avaliação (mm); Nn = número de dias após a inoculação, adaptação de Hüller et al. (2019).

2.6 Análise dos dados

Os resultados foram analisados de forma descritiva, considerando-se os valores médios obtidos para o crescimento micelial e o Índice de Crescimento Micelial (ICM) nos diferentes tratamentos. As comparações entre temperaturas de pirólise e concentrações de biochar foram realizadas com base nas tendências observadas nos dados.

3. Resultados e discussão

O crescimento micelial de *Trichoderma harzianum* apresentou variação em função da combinação entre a temperatura de pirólise do biochar e sua concentração no meio de cultivo (Figura 1). O biochar produzido a 550 °C na concentração de 0,5 g promoveu o desenvolvimento mais rápido do fungo.

Figura 1 – Percentual de crescimento radial do fungo em função concentração de biochar e temperatura de pirólise

Entre os tratamentos avaliados, o biochar produzido a 550 °C na concentração de 0,5 g apresentou o desenvolvimento micelial mais rápido.. Biochars produzidos entre 500 e 600 °C normalmente apresentam maior área superficial específica, elevada microporosidade, maior estabilidade estrutural e menor concentração de compostos orgânicos voláteis potencialmente tóxicos quando comparados aos produzidos em temperaturas inferiores (Silva et al., 2017). Essas características favorecem a retenção de água, aumentam a disponibilidade de sítios para adesão microbiana e proporcionam microambientes protegidos para o crescimento das hifas, favorecendo a colonização fúngica.

Em temperaturas inferiores, como 450 °C, o biochar apresenta um menor grau de carbonização e retém maior teor de matéria volátil, mantendo compostos orgânicos menos estáveis e reduzindo o desenvolvimento da estrutura porosa do biochar. Em contrapartida, temperaturas muito elevadas, como 650 °C, promovem maior aromatização do carbono e redução de grupos funcionais oxigenados, modificações que podem diminuir a afinidade entre a superfície do biochar e os microrganismos (Tomczyk et al., 2020). Esses resultados sugerem que existe uma faixa ótima de pirólise para maximizar a interação entre biochar e *T. harzianum*, sendo 550 °C a condição mais favorável entre aquelas avaliadas.

O crescimento micelial também apresentou variação entre as diferentes concentrações de biochar avaliadas.. Os tratamentos contendo 0,5 e 1,0 g apresentaram expansão radial mais rápida da colônia, enquanto a utilização de 2,0 g (10%), observou-se maior tempo para que o fungo atingisse a borda da placa. Esse comportamento indica que o excesso de biochar pode alterar as propriedades físicas do meio, reduzindo a disponibilidade de água livre, modificando a difusão de nutrientes ou aumentando a adsorção de compostos presentes no meio BDA, fatores que limitam a velocidade inicial de crescimento do fungo.

A avaliação descritiva do Índice de Crescimento Micelial (ICM) evidenciou maiores valores em alguns tratamentos contendo 2,0 g de biochar, especialmente para o biochar produzidoa 550 °C, condição na qual o índice (26,9) superou numericamente o tratamento

controle (25,7) (Figura 2). Além disso, evidencia-se a ausência completa de crescimento no tratamento de 1,0 g sem a adição do meio BDA, independentemente da temperatura.

Figura 2 - Índice de Crescimento Micelial (ICM) do fungo em função a quantidade e temperatura de pirolise do biochar

Entretanto, esse resultado deve ser interpretado com cautela, pois o ICM representa um índice acumulativo ao longo do tempo experimental. Como os tratamentos com maior concentração demoraram mais dias para atingir a borda da placa, o período de avaliação foi prolongado, resultando em maiores valores acumulados do índice, sem necessariamente indicar maior velocidade de crescimento radial. Dessa forma, a interpretação conjunta entre o tempo de colonização e o ICM fornece uma representação mais consistente do desempenho biológico dos tratamentos.

Outro resultado relevante foi a ausência completa de crescimento micelial nas placas contendo exclusivamente biochar, sem adição do meio BDA (Tabela 1).

Tabela 1 – Crescimento micelial de *Trichoderma harzianum* submetido ao tratamento com biochar de *Bambusa vulgaris* sem adição de meio de cultura.

Temperatura do pirólise	450°C	550°C	650°C
Início do experimento			
Término do experimento			

Esse comportamento sugere que, nas condições avaliadas, o biochar isoladamente não constitui fonte nutricional suficiente para sustentar o metabolismo de *T. harzianum*. Sua principal função consiste em atuar como suporte físico para colonização microbiana, oferecendo proteção mecânica e microambientes favoráveis, mas dependente da disponibilidade de fontes externas de carbono e nutrientes para permitir o crescimento fúngico (Thies & Rillig, 2009). Esse resultado reforça o potencial do biochar como veículo para

inoculantes microbiológicos, desde que associado a substratos nutritivos ou aplicado em solos que forneçam os recursos necessários ao desenvolvimento dos microrganismos.

Os registros fotográficos dos tratamentos no início do experimento e quando o fungo atingiu a borda da placa de Petri, caracterizando o término da avaliação do crescimento micelial, estão dispostos na Tabela 2.

Tabela 2 – Resultado visual do controle de crescimento micelial

Temperatura do pirólise	Controle	0,5 g			1,0 g			2,0 g		
		450°C	550°C	650°C	450°C	550°C	650°C	450°C	550°C	650°C
Início do experimento										
Término do experimento										

292. **Conclusões**

Conclui-se que a temperatura de pirólise e a concentração exercem influência direta na interação entre o biochar de *Bambusa vulgaris* e o fungo *Trichoderma harzianum*, sendo o tratamento a 550 °C (0,5 g) o mais favorável ao crescimento micelial. No entanto, o biochar isoladamente não constitui fonte nutricional para o fungo, o que condiciona sua eficiência como suporte microbiológico à associação prévia com substratos nutritivos ou à aplicação em solos que supram os recursos necessários para o metabolismo fúngico.

Sob uma perspectiva aplicada, a seleção adequada das condições de pirólise otimiza o uso do biochar como carreador de agentes de controle biológico, aumentando a sobrevivência do inoculante no solo. Essa abordagem consolida-se como uma estratégia promissora para o desenvolvimento de formulações na agricultura sustentável, integrando simultaneamente a

reciclagem de resíduos lignocelulósicos, o sequestro de carbono e o fortalecimento do manejo biológico de culturas.

5. Agradecimentos

Este trabalho foi viabilizado, em parte, pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) - Processo APQ-05311-24; APQ-04599-25, pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) - Processo n° 444395/2024-5, e pelos laboratórios LPM (Laboratório de Propriedades da Madeira) e LAPEM (Laboratório de Painéis e Energia da Madeira).

6. Referências bibliográficas

Bispo, D. F. A., de Jesus, A. M. M., da Silva, J. C., de Souza, K. F., & de Oliveira, I. R. (2025). Bamboo-derived biochars: Physicochemical properties and implications for soil fertility and sustainability. *Biomass Conversion and Biorefinery, 14*, 21085–21105. https://doi.org/10.1007/s13399-025-06702-6

Centro de Estudos de Carbono em Agricultura Tropical. (2025). *Biochar: Um potencial sustentável para mitigação e adaptação às mudanças climáticas na agricultura e pecuária*. https://ccarbon.usp.br/pt/biochar-um-potencial-sustentavel-para-mitigacao-e-adaptacao-as-mudancas-climaticas-na-agricultura-e-pecuaria/

Hüller, A. S., Santini, E. J., Talgatti, M., da Silveira, A. G., Valcorte, G., de Oliveira, L. H., & Estigarribia, M. G. (2019). Capacidade antifúngica do extrato vegetal de *Ruta graveolens* sobre o desenvolvimento dos fungos apodrecedores: *Gloeophyllum trabeum* e *Pycnoporus sanguineus*. *Revista Brasileira de Iniciação Científica, 6*(6), 31–43

Jesus, J. M. I. (2026, April 20). *Trichoderma harzianum: O que é, como funciona e como aplicar corretamente no manejo agrícola*. AgroAdvance. https://agroadvance.com.br/blog-trichoderma-harzianum/

Jiang, Y., Sun, H., Yves, U. J., Li, H., & Hu, X. F. (2016). Impact of biochar produced from post-harvest residue on the adsorption behavior of diesel oil on loess soil. *Environmental Geochemistry and Health, 38*(1), 243–253. https://doi.org/10.1007/s10653-015-9712-1

Li, L., Wang, L., Ma, F., & He, M. (2026). Synergistic effect of biochar on biological control measures for suppressing soil-borne diseases: A review. *Applied Soil Ecology, 217*, Article 106613. https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2025.106613

Medeiros, P. L., Pimenta, A. S., Silva, G. G. C., & Oliveira, E. M. M. (2019). Uso do biochar para fins agrícolas: Principais vantagens. In *Semiárido brasileiro* (Vol. 3, pp. 103–110). Editora Poisson. https://doi.org/10.36229/978-85-7042-154-8

Meyer, M. C., Mazaro, S. M., & da Silva, J. C. (Eds.). (2019). *Trichoderma: Uso na agricultura*. Embrapa.

National Institutes of Health. *ImageJ* (Version 1.54) [Computer software]. https://imagej.net/ij/download.html

Pantelides, I. S., Stringlis, I. A., Finkel, O. M., & Mercado-Blanco, J. (2023). Editorial: Organic amendments: Microbial communities and their role in plant fitness and disease suppression. *Frontiers in Plant Science, 14*, 1213092. https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1213092

Pena, R. F. (2026). *Bioprodutos obtidos da conversão termoquímica de Bambusa vulgaris* [Exame de qualificação de doutorado não publicado]. Universidade Federal de Viçosa.

Rezende, E. I. P., Angelo, L. C., dos Santos, S. S., & Mangrich, A. S. (2011). Biocarvão (biochar) e sequestro de carbono. *Revista Virtual de Química, 3*(5), 426–433. https://doi.org/10.5935/1984-6835.20110046

Sani, M. N. H., Hasan, M., Uddin, J., & Subramaniam, S. (2020). Impact of application of *Trichoderma* and biochar on growth, productivity and nutritional quality of tomato under reduced NPK fertilization. *Annals of Agricultural Sciences, 65*(1), 107–115. https://doi.org/10.1016/j.aoas.2020.06.003

Sher, A., Li, H., Ullah, A., Hamid, Y., Nasir, B., & Zhang, J. (2024). Importance of regenerative agriculture: Climate, soil health, biodiversity and its socioecological impact. *Discover Sustainability, 5*(1), 462. https://doi.org/10.1007/s43621-024-00662-z

Silva, G. V., Farias, D. T., Coldebella, R., Wacht, W. L., & Pedrazzi, C. (2022). Biomass of Dendrocalamus giganteus as bioenergetic resource. *Ciência Florestal, 32*(4), 2244–2262. https://doi.org/10.5902/1980509867680

Silveira, S. F. D., Alfenas, A. C., Maffia, L. A., & Suzuki, M. S. (2003). Controle químico da queima de folhas e da mela de estacas de eucalipto, causadas por *Rhizoctonia* spp. *Fitopatologia Brasileira, 28*(6), 642–649. https://doi.org/10.1590/S0100-41582003000600010

Thies, J. E., & Rillig, M. C. (2009). Characteristics of biochar: Biological properties. In J. Lehmann & S. Joseph (Eds.), *Biochar for environmental management: Science and technology* (pp. 85–105). Earthscan.

Tomczyk, A., Sokolowska, Z., & Boguta, P. (2020). Biochar physicochemical properties: Pyrolysis temperature and feedstock kind effects. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, *19*(1), 191–215. https://doi.org/10.1007/s11157-020-09523-3

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

ADESIVO LIGNINA-UREIA-FORMALDEÍDO COM BAIXA EMISSÃO DE FORMALDEÍDO

Êmilly Wakim de Almeida[1]; Ana Márcia Ladeira Macedo de Carvalho[1]; Angélica de Cássia O. Carneiro[1]; Iara Fontes Demuner[1]; Gabriela Ferreira da Silva[1], Nicolle De Filippo Brumano[1], Lawrence Pires de Oliveira[1]

[1] Universidade Federal de Viçosa

Resumo: A utilização da lignina na síntese de adesivos tem sido amplamente investigada como alternativa para modificar as propriedades de adesivos convencionais e reduzir a emissão de formaldeído. Este estudo avaliou o potencial da lignina kraft modificada termicamente para a produção de adesivos ureia-formaldeído destinados à colagem de madeira. A lignina foi modificada a 225 °C por 150 minutos e utilizada na substituição de 0,5; 1,0 e 2,0% da massa de ureia. Os adesivos foram caracterizados quanto ao teor de sólidos, viscosidade, pH, tempo de gelatinização, tempo de trabalho e emissão de formaldeído. A adição de lignina aumentou a viscosidade atingindo valores entre 475 a 1130 cP. Entretanto, as formulações contendo lignina apresentaram uma expressiva redução na emissão de formaldeído em até 97%. Os resultados evidenciam o potencial da lignina modificada termicamente para a produção de adesivos com redução significativa da emissão de formaldeído.

Palavras-chave: Tratamento térmico; Sustentabilidade; Biorrefinaria.

LOW-FORMALDEHYDE-EMISSION LIGNIN–UREA–FORMALDEHYDE ADHESIVE

Abstract: The use of lignin in adhesive synthesis has been extensively investigated as an alternative for modifying the properties of conventional adhesives and reducing formaldehyde emissions. This study evaluated the potential of thermally modified kraft lignin for the production of urea-formaldehyde adhesives intended for wood bonding. The lignin was thermally modified at 225 °C for 150 min and used to replace 0.5, 1.0, and 2.0% of the urea mass. The adhesives were characterized in terms of solids content, viscosity, pH, gel time, working time and formaldehyde emission. The addition of lignin increased the adhesive viscosity, reaching values ranging from 475 to 1130 cP. However, formulations containing lignin showed a substantial reduction in formaldehyde emissions, of up to 97%. These results demonstrate the potential of thermally modified lignin for the production of adhesives with a significant reduction in formaldehyde emissions.

Keywords: Thermal treatment; Sustainability; Biorefinery.

1. Introdução

O adesivo ureia-formaldeído é amplamente utilizado na indústria de painéis reconstituídos de madeira (Solt et al., 2019), pelo seu baixo custo, boa reatividade, boa performance na linha de produção dos painéis e ser incolor após a cura (Artner, 2020). No entanto, apresenta algumas limitações, podendo conferir baixo desempenho aos painéis de madeira com relação às propriedades mecânicas, baixa resistência à água e emissão de formaldeído, principalmente em condições de alta umidade relativa (Tian et al., 2024; Deng et al., 2025).

O formaldeído é considerado cancerígeno e diversos países estão estabelecendo normas que limitam as emissões dos painéis produzidos e testes para quantificá-las (Lessmann, 2008; Zhang et al., 2018). Pesquisas vêm sendo desenvolvidas com o objetivo de reduzir a emissão de formaldeído e melhorar as propriedades do adesivo ureia-formaldeído. A redução da razão molar é uma das modificações que podem ser feitas para diminuir a emissão, porém podem afetar drasticamente a resistência mecânica da colagem (Ferreira, 2017). Também é possível realizar a adição de reforços aos adesivos, como a lignina, cujo objetivo é melhorar as propriedades reológicas, mecânicas e reduzir a emissão de formaldeído (Moya et al., 2015; Valášek e Müller, 2016).

Devido a sua estrutura aromática e hidrofóbica, o uso da lignina torna-se atrativo para a aplicação em adesivos, especialmente na aditivação da ureia-formaldeído (Ferreira, 2017). No entanto, a lignina extraída do licor negro proveniente do processo de polpação kraft apresenta elevada heterogeneidade estrutural e relativamente baixa reatividade química, o que limita diretamente sua aplicação em materiais poliméricos (Gigli e Crestini, 2020). Na molécula da lignina, as ligações éter, especialmente as do tipo β-O-4, constituem a principal ligação interunidades do polímero, influenciando sua reatividade e os processos de conversão e valorização da lignina (Rahman et al., 2024).

Estas características dificultam a reação da lignina durante a síntese, favorecendo a separação de fases em vez da formação de uma solução homogênea, além de afetar as propriedades dos adesivos produzidos, principalmente a força de ligação exigida entre a madeira e o adesivo (Ferreira, 2017). Atualmente, existem diversas alternativas para melhorar a reatividade da lignina e potencializar a geração de novos produtos (Wang et al., 2023). Modificações químicas na estrutura da lignina, a exemplo da hidroximetilação, fenolação e desmetilação, são pré-tratamentos que preparam as ligninas para incorporação em vários tipos de adesivos termofixos, através do aumento da sua reatividade (Zhang et al., 2018).

O tratamento térmico do licor negro antes da extração da lignina pode ser realizado para promover a desmetilação e desmetoxilação, a fim de remover os grupos CH3 e OCH3 presentes na lignina e formar grupos fenólicos mais reativos (Demuner et al., 2021). As modificações causadas na estrutura da lignina são fundamentais para aumentar a sua reatividade com o formaldeído, o que é essencial para a produção de um adesivo de qualidade (Yang, 2019; Demuner et al., 2021). Sendo assim, esta pesquisa teve como objetivo avaliar a influência do tratamento térmico na estrutura química da lignina kraft e o efeito da sua adição na síntese e propriedades de adesivo lignina-ureia-formaldeído para colagem de madeira.

2. Material e métodos

2.1. Síntese das formulações adesivas

Para as sínteses das formulações adesivas foram utilizados formaldeído (30,03 g/mol) diluído a 37%, ureia em grânulos (60,06 g/mol) e lignina kraft tratada termicamente a 225°C durante 150 minutos, de acordo com a metodologia proposta por Demuner et al. (2021). Para ajuste do pH durante a síntese dos adesivos foram utilizados hidróxido de sódio (NaOH) diluído a 20% e ácido fórmico (CH2O2) diluído a 30%.

2.2. Adesivo ureia-formaldeído

A síntese do adesivo ureia-formaldeído foi realizada seguindo a metodologia proposta por Ferreira (2017), conforme a Figura 2.

O adesivo foi sintetizado em um balão tritubulado de fundo chato de 500 ml. Utilizou-se inicialmente 60 gramas de ureia e 170 gramas de formaldeído. O balão com a mistura foi levado para uma capela de fluxo laminar, equipado com um condensador e termômetro, sob uma placa aquecedora com agitação mecânica constante.

A mistura foi aquecida até atingir a temperatura de 90°C, quando foi adicionado NaOH até alcançar pH 9,0 deixando nesta condição por 45 minutos. Em seguida, o pH foi ajustado para 5,0 com ácido fórmico, mantendo na temperatura de 90°C por 15 minutos. Após, foi adicionado 30g de ureia continuando na temperatura de 90°C por mais 20 minutos. No final da etapa anterior a temperatura foi reduzida até atingir 70 °C, o pH ajustado para 8 com NaOH e adicionado 10 g de ureia, permanecendo por 45 minutos a 70°C. Por fim, o balão foi retirado da placa aquecedora e transferido para um recipiente com gelo para resfriamento até a temperatura de 25°C. A razão molar final de formaldeído:ureia foi de 1,26:1,0.

2.3. Adesivo lignina-ureia-formaldeído

Para os adesivos modificados com lignina, a massa total de ureia utilizada na síntese foi substituída por 0,5; 1,0 ou 2,0% de lignina. Esses percentuais de substituições foram definidos a partir de testes preliminares. A lignina foi adicionada no início da síntese, junto com a ureia e o formaldeído, em substituição a massa inicial de ureia utilizada na síntese, nas diferentes proporções estudadas. As etapas seguintes da síntese seguiram a metodologia descrita no pedido de patente BR 10 2025 015454 4.

2.4. Caracterização dos adesivos sintetizados

A caracterização dos adesivos foi realizada a partir da determinação do teor de sólidos, viscosidade, pH, tempo de gelatinização, tempo de trabalho e tempo de armazenamento.

O teor de sólidos foi quantificado de acordo com a norma ASTM D 1490-01 (2013). Uma amostra de 2g foi pesada em uma placa de Petri e levada para estufa na temperatura de 103 ± 2°C até a massa constante.O teor de sólidos foi calculado pela diferença de massa inicial e final da amostra.O procedimento foi realizado em triplicata.

A determinação do pH foi realizada em pHmetro digital segundo a norma ASTM E70-07 (ASTM, 2015). As medições foram feitas em aproximadamente 150 ml da formulação adesiva e na temperatura de aproximadamente 25°C.

A viscosidade dos adesivos foi obtida de acordo com a norma americana ASTM D 1084-97 – método B (ASTM, 1998). Utilizando-se o viscosímetro Brookfield-LV (cp), com haste número 3, velocidade de 12 rpm e fator de conversão de 100.

O tempo de gelatinização foi mensurado conforme a norma ASTM D 2471-99 (ASTM, 1999). Utilizaram-se amostras de 1 g de adesivos, que foram pesadas em tubos de ensaio e submersos em glicerina na temperatura de 180°C. Com o auxílio de uma haste de vidro e de um cronômetro, foi determinado o tempo de polimerização do adesivo com a adição de 2% catalisador sulfato de amônia (solução a 20% m/v).

2.5. Produção das juntas coladas de madeira

Juntas coladas com lâminas de madeira de pinus foram produzidas. As lâminas foram preparadas com dimensões de 0,65 de espessura; 9,0 de largura e 40,0 cm de comprimento. A colagem foi realizada utilizando uma gramatura de 250 g.m-² de

adesivo em face dupla. Após a aplicação do adesivo, as lâminas foram pré-prensadas a frio por quatro minutos e em seguida prensadas em prensa hidráulica na temperatura de 180°C e pressão de 12 kgf/cm2, durante 8 minutos. Após a prensagem, as lâminas coladas foram acondicionadas em câmara climática, com temperatura de 20 ± 2°C e umidade relativa de 65 ± 3%, até atingir massa constante.

2.7. Determinação do teor de formaldeído emitido

A metodologia empregada para a determinação da emissão de formaldeído dos painéis foi baseada no procedimento descrito na NBR 14810-2 (ABNT, 2018), para o método perforator. O teor de formaldeído emitido foi calculado de acordo com a equação (1).

$$TF = \frac{(As - Ab)\, x\, f\, x\, (100 + U)\, x\, 2000}{mh} \qquad \textbf{Eq.1}$$

Onde:

TF: Teor de formaldeído (mg/100g de amostra)

As: Absorbância da solução analisada

Ab: Absorbância do branco (água deionizada)

f: Fator de conversão da curva (mg/ml)

U: Teor de umidade dos corpos de prova (%)

mh: Massa da amostra utilizada na extração (g)

3. Resultados e discussão

Na Tabela 1 estão os valores médios das propriedades das formulações adesivas. A análise de variância indicou efeito significativo das porcentagens de substituição de ureia pela lignina somente na propriedade de viscosidade. Não houve influência da substituição de ureia por lignina no teor de sólidos, pH e tempo de gelatinização, além disso, essas propriedades não diferiram significativamente da testemunha.

Tabela 1 – Valores médios de viscosidade, teor de sólidos, pH, tempos de gelatinização e tempo de trabalho dos adesivos

Formulação adesiva	Propriedades dos adesivos			
	Viscosidade (cP)	Teor de sólidos (%)	pH	Tempo de gelatinização (s)
LUF 0,5%	1130 (34,64) a*	50,58 (0,39) ns	7,69 (0,30) ns	34 (1,53) ns
LUF 1,0%	475 (5,00) c*	49,46 (0,47) ns	7,82 (0,03) ns	36 (2,08) ns
LUF 2,0%	557 (16,07) b*	50,95 (0,37) ns	8,09 (0,01) ns	38 (2,65) ns
UF (testemunha)	167(11,55)	50,71(0,51)	7,90 (0,04)	37 (0,58)

Onde: UF = Adesivo de ureia-formaldeído; LUF = Adesivo de lignina-ureia-formaldeído, com concentrações de 0,5; 1,0 e 2,0% de lignina. Médias seguidas pela mesma letra minúscula ao longo de cada coluna não diferem estatisticamente entre si, pelo teste Tukey a 95% de probabilidade (α = 0,05). * indica diferença significativa entre a média e a testemunha e "ns" indica diferença não significativa entre a média e a testemunha, pelo teste de Dunnett, a 95% de probabilidade (α = 0,05). Valores sobrescritos entre parênteses representam o desvio padrão. Fonte: O autor.

As formulações produzidas com lignina tiveram valores de viscosidade superiores ao adesivo ureia-formaldeído. O adesivo LUF 0,5% teve o maior valor de viscosidade (1130 cP), com aumento superior a 6 vezes em relação ao adesivo UF. Em um estudo realizado por Luckman et al. (2021) também foi observado o aumento de até 7 vezes na viscosidade do adesivo ureia-formaldeído com a adição de lignina kraft, o que pode estar relacionado às ligações cruzadas formadas entre lignina e formaldeído. A viscosidade do adesivo é um parâmetro importante, pois pode limitar a sua utilização devido a dificuldades de aplicação, penetração na estrutura da madeira e formação da linha de cola (Luckman et al., 2021).

Para os adesivos LUF 1,0% e LUF 2,0% a viscosidade reduziu em relação aos produzidos com 0,5% de lignina tratada termicamente, provavelmente porque com a maior substituição da lignina, parte não reagiu com o formaldeído, não formando um pré-polímero, ficando essa em suspensão na solução adesiva. Vale salientar que não houve alteração na razão molar dos componentes da formulação adesiva em função de não ter a massa molecular da lignina.

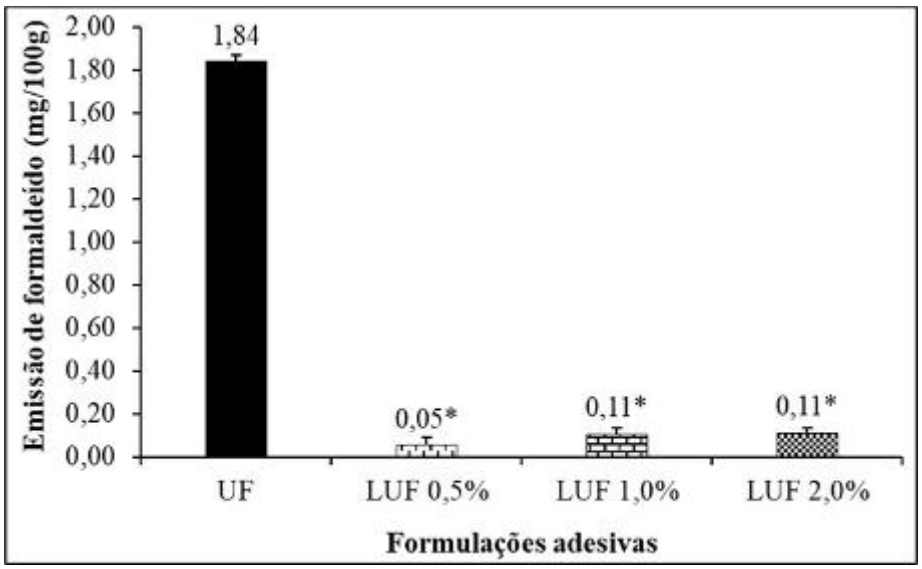
O teor de sólidos não foi influenciado pelas porcentagens de lignina adicionadas na síntese, com isso as formulações adesivas com lignina tiveram valor médio de 50,33%. Além disso, não houve diferença estatística entre os tratamentos e a testemunha para esta propriedade. O teor de sólidos está associado à quantidade de material que formará a linha de cola no painel após a prensagem, com a evaporação da água, responsável pela transferência de tensões entre a madeira e linha de cola (Iwakiri, 2005; Lopes, 2022). Sendo assim, a adição de

lignina no adesivo de ureia-formaldeído não causou alterações significativas nesta propriedade, tendo valores semelhantes ao teor de sólidos do adesivo UF convencional.

O pH também não foi influenciado pelas porcentagens de lignina, o valor médio para os adesivos com lignina foi de 7,86. O resultado pode estar relacionado ao ajuste do pH para 8,0 realizado na última etapa da síntese das formulações adesivas. Os adesivos a base de ureia possuem a característica de curarem em condições ácidas, ou seja, a síntese de um adesivo ácido poderia ocasionar baixo tempo de vida útil e pré-cura, afetando as funções de movimento e mobilidade dos adesivos e a resistência mecânica da colagem (Luckman et al., 2021).

Nota-se que não houve diferença significativa entre as porcentagens de adição de lignina, para a propriedade de tempo de gelatinização. Além disso, não houve diferença estatística entre as formulações com lignina e o adesivo de ureia-formaldeído. O tempo de gelatinização médio para as formulações com lignina foi de 36 segundos. Esta propriedade está relacionada com a reatividade do adesivo, que irá influenciar no tempo de prensagem e na produtividade da fábrica (Ferreira, 2017). Sendo assim, a obtenção de valores de tempo de gelatinização dos adesivos com lignina próximos ao adesivo ureia-formaldeído favorece a sua aplicação industrial.

Os valores de emissão de formaldeído livre obtidos para cada formulação adesiva estão na Figura 1. Não houve diferença estatística entre as porcentagens de lignina adicionada (0,5; 1,0 e 2,0%). No entanto, a emissão de formaldeído dos adesivos com lignina-ureia-formaldeído foi estatisticamente inferior ao adesivo ureia-formaldeído. Podemos observar que, a lignina modificada termicamente adicionada ao adesivo ureia-formaldeído reduziu drasticamente a emissão de formaldeído das juntas coladas produzidas, resultando em redução de até 97%.



Onde: UF = Adesivo de ureia-formaldeído; LUF = Adesivo de lignina-ureia-formaldeído, com concentrações de 0,5; 1,0 e 2,0% de lignina. As barras no topo do gráfico de colunas são os desvios padrão. * indica diferença significativa entre a média e a testemunha, pelo teste de Dunnett, a 95% de probabilidade (α = 0,05). Fonte: O autor.

Figura 1 – Valores médios da emissão de formaldeído das formulações adesivas

A adição de lignina ao adesivo promoveu uma drástica redução na emissão de formaldeído em relação a testemunha. A lignina modificada termicamente, por ter maior porcentagem de ligninas do tipo fenol (H) e catecol (Ca), que não possuem grupos metoxílicos ligados ao anel aromático, tem menor impedimento estérico e mais sítios livres para reagir, o que aumenta a sua reatividade (Wang et al., 2023). Logo, a utilização da lignina modificada termicamente, promoveu uma maior interação com o formaldeído, bloqueando os grupos terminais, impedindo a hidrólise e liberação de formaldeído.

4. Conclusões

A adição da lignina tratada termicamente nas formulações de adesivos lignina-ureia-formaldeído resultou em um aumento na viscosidade e redução do tempo de trabalho. Além disso, observou-se uma redução significativa de até 97% na emissão de formaldeído livre. Portanto, os resultados obtidos indicam que a lignina modificada termicamente possui um papel importante na melhoria das propriedades dos adesivos lignina-ureia-formaldeído e reduzindo a emissão de formaldeído, contribuindo assim para o desenvolvimento de adesivos mais sustentáveis e ambientalmente amigáveis para a indústria de colagem de madeira. No entanto, é importante ressaltar a necessidade de estudos adicionais para otimizar as formulações e

compreender completamente o impacto dessas modificações nas propriedades reológicas e ambientais dos adesivos.

5. Agradecimentos

Os autores agradecem ao Laboratório de Painéis e Energia da Madeira (LAPEM), ao Laboratório de Celulose e Papel (LCP), ao Departamento de Engenharia Florestal (DEF) e à Universidade Federal de Viçosa (UFV) pelo suporte técnico, infraestrutura e apoio institucional disponibilizados para a execução desta pesquisa. Agradecem, ainda, ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio financeiro concedido ao desenvolvimento deste trabalho.

6. Referências bibliográficas

Artner, M. A. (2020). Incorporação de celulose microfibrilada durante a síntese de adesivo ureia-formaldeído (Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Paraná).

Demuner, I. F., Gomes, F. J. B., Coura, M. R., Gomes, J. S., Demuner, A. J., Carvalho, A. M. M. L., & Silva, C. M. (2021). Determination of chemical modification of eucalypt kraft lignin after thermal treatment by Py-GC–MS. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 156, 105102. https://doi.org/10.1016/j.jaap.2021.105102

Deng, X., Liu, Z., Wang, Z., Wu, Z., Li, D., Yang, S., He, S., & Ji, N. (2025). Mechanical properties, thermal stability, and formaldehyde emission analysis of nanocellulose-reinforced urea–formaldehyde resin and its mechanism. Polymers, 17(10), 1402. https://doi.org/10.3390/polym17101402

Ferreira, J. C. (2017). Síntese de adesivos de ureia-formaldeído com adição de lignina kraft e celulose nanocristalina (Tese de doutorado, Universidade Federal de Viçosa).

Gigli, M., & Crestini, C. (2020). Fractionation of industrial lignins: Opportunities and challenges. Green Chemistry, 22, 4722–4746. https://doi.org/10.1039/D0GC01606C

Iwakiri, S. (2005). Painéis de madeira reconstituída. FUPEF.

Lessmann, V. E. (2008). Estudo da reação de cura de resinas ureia-formol por espectrometria de ressonância magnética nuclear (Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Paraná).

Luckman, S. S., Cunha, A. B., Rios, P. D., & Zanatta, P. (2021). Influência da incorporação de lignina kraft à resina ureia-formaldeído nas propriedades tecnológicas de painéis aglomerados convencionais. Scientia Forestalis, 49, e131. https://doi.org/10.18671/scifor.v49n131.17

Lopes, T. A. (2022). Nanopartículas de lignina kraft para modificação do adesivo ureia-formaldeído para colagem de madeira (Tese de doutorado, Universidade Federal de Viçosa).

Moya, R., Rodríguez-Zúñiga, A., Vega-Baudrit, J., & Álvarez, V. (2015). Effects of adding nano-clay (montmorillonite) on performance of polyvinyl acetate (PVAc) and urea-formaldehyde (UF) adhesives in Carapa guianensis, a tropical species. International Journal of Adhesion and Adhesives, 59, 62–70. https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2015.01.006

Rahman, M. U., Ullah, M. W., Shah, J. A., et al. (2024). Lignin valorization through the oxidative activity of β-etherases: Recent advances and perspectives. International Journal of Biological Macromolecules, 281, 136–152. 10.1016/j.ijbiomac.2024.136383

Solt, P., Konnerth, J., Gindl-Altmutter, W., Kantner, W., Moser, J., Mitter, R., & Van Herwijnen, H. W. G. (2019). Technological performance of formaldehyde-free adhesive alternatives for particleboard industry. International Journal of Adhesion and Adhesives, 94, 99–131. https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2019.04.007

Tian, H., Zhang, Q., Pizzi, A., Lei, H., Wang, J., & Xi, X. (2024). Adhesion properties and formaldehyde emissions of MnO_2/UF nanocomposite adhesives. International Journal of Adhesion and Adhesives, 128, 103527. https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2023.103527

Valášek, P., & Müller, M. (2016). Possibilities of adhesives filling with micro-particle fillers—Lap-shear tensile strength. Acta Universitatis Agriculturae et Silviculturae Mendelianae Brunensis, 64(1), 195–201. https://doi.org/10.11118/actaun201664010195

Wang, X., Leng, W., Nayanathara, R. M. O., Milsted, D., Eberhardt, T. L., Zhang, Z., & Zhang, X. (2023). Recent advances in transforming agricultural biorefinery lignins into value-added products. Journal of Agriculture and Food Research, 12, 100570. https://doi.org/10.1016/j.jafr.2023.100570

Yang, W., Rallini, M., Natali, M., Kenny, J., Ma, P., Dong, W., Torre, L., & Puglia, D. (2019). Preparation and properties of adhesives based on phenolic resin containing lignin micro and nanoparticles: A comparative study. Materials & Design, 161, 55–63. https://doi.org/10.1016/j.matdes.2018.11.020

Zhang, J., Song, F., Tao, J., Zhang, Z., & Shi, S. Q. (2018). Research progress on formaldehyde emission of wood-based panel. International Journal of Polymer Science, 2018, 9349725. https://doi.org/10.1155/2018/9349725

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Análise bibliométrica da literatura sobre o perfil fitoquímico da espécie *Licania tomentosa*

Yuan Narcizo Frisso[1], Manuela Silva Andrade[1], Rickson Alves Marques de Oliveira[1], Natália Dias de Souza[1]

[1] Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro

Resumo: A pesquisa analisa o perfil fitoquímico da espécie *Licania tomentosa* (oiti) para compreender seus impactos na qualidade ambiental e urbana. A metodologia baseou-se em uma revisão bibliográfica na base Scopus entre 2001 e 2026, utilizando fórmulas de busca avançada. Do total encontrado, selecionaram-se cinco artigos para análise manual detalhada. Os resultados indicam que os frutos possuem elevado valor nutricional, fibras alimentares e ausência de fatores antinutricionais. As folhas e sementes apresentam compostos fenólicos, flavonoides e triterpenos com forte capacidade antioxidante e ação antibacteriana contra patógenos. Os extratos também demonstraram baixa citotoxicidade em células tumorais, enquanto a biomassa de poda revelou alto poder calorífico. Conclui-se que o oiti atua como biofiltro de poluição e fonte bioativa, justificando seu uso urbano além do sombreamento tradicional.

Palavras-chave: Oiti; Compostos bioativos; Arborização urbana.

Bibliometric analysis of the literature on the phytochemical profile of the species *Licania tomentosa*

Abstract: This research analyzes the phytochemical profile of the species *Licania tomentosa* (oiti) to understand its impacts on environmental and urban quality. The methodology was based on a literature review using the Scopus database covering the period from 2001 to 2026, employing advanced search queries. From the total results, five articles were selected for detailed manual analysis. The findings indicate that the fruits possess high nutritional value and dietary fiber content, with an absence of antinutritional factors. The leaves and seeds contain phenolic compounds, flavonoids, and triterpenes that exhibit strong antioxidant capacity and antibacterial activity against pathogens. Extracts also demonstrated low cytotoxicity in tumor cells, while pruning biomass showed high calorific value. It is concluded that *L. tomentosa* (oiti) acts as a pollution biofilter and a source of bioactive compounds, justifying its use in urban settings beyond the traditional function of providing shade.

Keywords: Oiti; Bioactive compounds; Urban forestry.

1. Introdução

O entendimento em relação a arborização urbana se torna relevante a partir do momento em que aspectos sociais e ambientais são diretamente afetados por ações oriundas da infraestrutura arbórea nas cidades (BOLUND; HUNHAMMAR, 1999). A arborização das

cidades têm um papel fundamental na qualidade de vida humana, vegetal e animal, contribuindo para redução das ilhas de calor, melhoria da qualidade do ar, agir como esponjas retendo águas pluviais e para o embelezamento visual urbano (BRASIL, 2025)

Entretanto, é necessário observar com atenção as espécies de árvores que serão selecionadas para compor essa paisagem, uma vez que nas cidades os conflitos que podem ser gerados abrangem tanto o sítio de plantio, quanto o tempo de crescimento da árvore e como a mesma se portará no ambiente colocado. Essa dinâmica reforça a premissa do Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima (2025) , que apontam que o sucesso da arborização urbana depende fundamentalmente do planejamento e da escolha correta da espécie para minimizar conflitos e maximizar benefícios.

Dentre as diversas espécies utilizadas na arborização urbana destaca-se a *Licania tomentosa*, popularmente chamada de oiti. Muito característica por sua copa frondosa e capacidade de fornecer sombreamento (CARVALHO, 2014), sua utilização no ambiente urbano das cidades se justifica principalmente pelas características morfológicas vegetais da espécie, sua forma e estruturas que desencadeiam em benefícios para sua implementação no ambiente urbano.

Além dessas características, essa espécie apresenta destaque em relação às propriedades químicas, sendo que estas não são levadas como critério de importância que determina a seleção desta espécie para sua costumeira utilização no ambiente urbano.

Embora pesquisas apontem o potencial farmacológico e alimentício da espécie, há no contexto urbano uma lacuna sobre como o perfil fitoquímico da espécie afeta sua presença no ambiente urbano antropizado e de alto estresse para as plantas.

Portanto, o objetivo deste trabalho é avaliar as características fitoquímicas que compõem a espécie *Licania tomentosa*, e por conseguinte compreender seus usos e efeitos para a qualidade ambiental e humana.

2. Material e métodos

Foi realizada uma pesquisa sobre características químicas da espécie *Licania tomentosa* baseando-se em revisões bibliográficas dos últimos 26 anos sobre a espécie, abrangendo literatura de 2001 até 2026. A base de dados utilizada para a pesquisa foi a Scopus, que armazena uma vasta gama de bibliografia científica internacional e amplamente utilizada para pesquisas bibliométricas e revisões bibliográficas.

Partindo das definições de palavras chaves, utilizou-se o método de consulta avançado que define por fórmulas a consulta no banco de dados, sendo utilizados TITLE-ABS-KEY (Licania tomentosa) AND TITLE-ABS-KEY (chemical) AND (LIMIT-TO (DOCTYPE , "ar")). A limitação dos resultados para artigos ocorreu para restrição dos resultados já estabelecidos e não ainda na fase de aceitação. Foram encontrados 10 artigos, porém, apenas 5 atenderam as características desejadas para desenvolvimento do presente trabalho (Figura 1). Com base na bibliografia obtida, foram realizadas análises manuais dos artigos, verificando o conteúdo presente e as informações de interesse para a pesquisa.

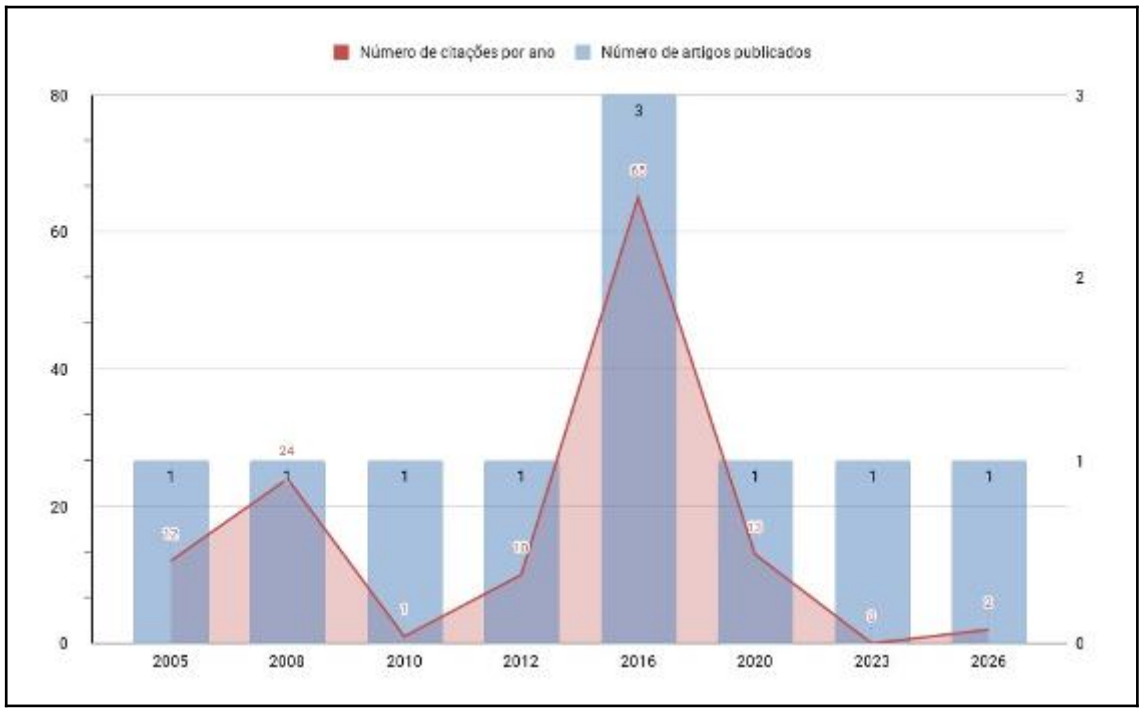


Figura 1. Frequência anual de publicação e média de citações totais por artigo referentes a estudos que abordam propriedades químicas da espécie *Licania tomentosa*.

3. Resultados e discussão

A tabela 1 resume os resultados da análise de 5 artigos incluídos no estudo das características químicas da espécie *Licania tomentosa*, destacando os aspectos principais: categorias, características analisadas, descrição detalhada, método de extração, parte da planta. Esses resultados mostram a diversidade de abordagens e a versatilidade do estudo químico da espécie.

Tabela 1 - Categoria observada de *Licania tomentosa* (oiti), característica analisada, descrições detalhadas, seus respectivos métodos de extração, parte usada da planta e fontes.

Categoria	Característica Analisada	Descrição Detalhada	Método de Extração	Parte da Planta Usada	Fonte (Referência)
Nutricional e Centesimal	Composição centesimal, minerais e vitaminas	Polpa e sementes apresentam elevado teor de fibras alimentares (25,62% a 41,70%), sais minerais e ausência de fatores antinutricionais (lectinas e inibidores de protease).	Extratos etanólicos da polpa e da semente	Polpa e Sementes	Medeiros et al. (2020)
Fitoquímica / Cromatografia	Isolamento e elucidação de triterpenos e lipídios	Isolamento e elucidação do triterpeno inédito Licanolídeo (3β-hidroxilupano-20,28-olídeo), além dos ácidos betulínico, ursólico, oleanólico, lupeol, esteróis e ácidos graxos.	Extração sequencial com n-hexano, acetato de etila e metanol	Folhas e Frutos	Castilho & Kaplan (2008)
Fitoquímica / Cromatografia	Perfil fenólico avançado (UPLC-QTOF / HPLC-DAD)	Identificação e quantificação de 11 a 12 compostos fenólicos	Extração etanólica bruta e fracionamento em coluna (hexano, clorofórmio, acetato de etila, metanol e água)	Sementes / Amêndoas (L. tomentosa e L. rigida)	Medeiros et al. (2020); Pessoa et al. (2016)
Fitoquímica Qualitativa	Prospecção fitoquímica básica	Presença marcante de metabólitos secundários como taninos hidrolisáveis, flavonoides (flavonois, flavonas, catequinas), saponinas, alcaloides e triterpenoides.	Maceração hidroalcoólica (etanol:água 1:1) e extrato etanólico bruto	Folhas e Sementes	Pessoa et al. (2016); Silva et al. (2012)
Atividade Biológica / Microbiologia	Atividade Antibacteriana in vitro	Potente ação bactericida e bacteriostática contra Staphylococcus aureus (MIC = 32 µg/mL), Bacillus cereus e Escherichia coli (MIC = 64 µg/mL), além de ação moderada sobre Klebsiella pneumoniae.	Maceração hidroalcoólica (1:1) seguida de rotaevaporação e liofilização	Folhas	Silva et al. (2012)
Atividade	Capacidade	Elevada capacidade de	Extratos	Sementes /	Medeiros

Biológica / Farmacologia	Antioxidante (In vitro)	sequestro de radicais livres (DPPH) e inibição da peroxidação lipídica (TBARS com e sem estresse por ferro), impulsionada pelo alto teor de quercetina, rutina e ácido clorogênico nas amêndoas.	etanólicos e suas frações purificadas (metanólica, aquosa e acetato de etila)	Amêndoas	et al. (2020); Pessoa et al. (2016)
Atividade Biológica / Farmacologia	Capacidade Antioxidante da Folha	Ação antioxidante moderada no ensaio de DPPH com EC50 = 73,33 µg/mL (comparado ao controle positivo BHT com EC50 = 35,50 µg/mL).	Extrato hidroalcoólico liofilizado	Folhas	Silva et al. (2012)
Atividade Biológica / Imunologia	Modulação de Citocinas Pro-inflamatórias	O extrato foliar não demonstrou inibição sobre a liberação da citocina pro-inflamatória TNF-α em monócitos humanos (THP-1) estimulados por LPS (respostas nulas/negativas).	Extrato etanólico bruto	Folhas	Henriques et al. (2016)
Toxicologia / Citotoxicidade	Citotoxicidade em linhagens tumorais humanas	O extrato das sementes não apresentou citotoxicidade frente às células de adenocarcinoma mamário (MCF-7) e colorretal (Caco-2) em concentrações de até 250 µg/mL, indicando baixo risco citotóxico.	Extrato etanólico bruto	Sementes / Amêndoas	Pessoa et al. (2016)
Produção Energética / Combustão Direta	Poder Calorífico Superior (PCS) e Densidade Energética	A biomassa in natura dos resíduos de poda apresenta Poder Calorífico Superior (PCS) > 19 MJ/kg e densidade energética na faixa de 4,45 a 10,80 GJ/m³, viabilizando a substituição direta de combustíveis fósseis ou mitigação da pegada de carbono	Calorimetria de bomba adiabática (ASTM E870-82).	Galhos e Resíduos Lignocelulósicos	Klingenberg et al. (2020)

Com base nos resultados obtidos na tabela é possível acrescentar justificar o uso da espécie para arborização urbana além do tradicional uso de sombreamento. No contexto de nutricional, o fruto se destaca como uma fonte promissora para o desenvolvimento de alimentos funcionais, uma vez que sua polpa é totalmente livre de fatores antinutricionais, como lectinas e inibidores de proteases que causam intoxicação, minimizando riscos de intolerância ou má absorção de nutrientes, são fontes densas de fibras alimentares e carboidratos digeríveis, além de apresentarem um riquíssimo complexo de minerais (como Cálcio, Ferro, Potássio e Zinco) e Vitaminas C e E.

E portanto, caracterizando seus frutos como um importante alimento para a fauna urbana.

Como demonstrado por Silva et al. (2012), os extratos da planta possuem elevada atividade antibacteriana. Na prática, estes compostos protegem a árvore contra o ataque de fungos, bactérias e insetos no meio urbano. Observa-se também a altíssima concentração de compostos fenólicos e flavonoides antioxidantes (Pessoa et al., 2016; Medeiros et al., 2020), que funcionam como um mecanismo interno de desintoxicação, permitindo que a árvore sobreviva em locais com tráfego intenso de veículos. Estes flavonoides foliares atuam na neutralização de radicais livres gerados pela poluição atmosférica veicular, aumentando a capacidade da planta em atuar como um “biofiltro” de ar urbano (MULYONO; SASMITANINGHIDAYAH, 2021). Este fator juntamente com taninos presentes nas folhas, protegem a copa contra a herbivoria e o ataque de insetos, que mantém a folhagem densa e perene, reduzindo ilhas de calor e preservando a suas copas garantindo sombreamento e a função de filtro de poluentes.

O elevado teor de compostos bioativos, como flavonóis, catequinas e ácidos fenólicos confere ao fruto uma potente atividade antioxidante, antibacteriana e antiviral, além de abrigar triterpenos com comprovada ação antitumoral contra células de leucemia, agregando a espécie uma função além de paisagísticas, auxiliando na prevenção de doenças crônicas como diabetes, câncer e problemas cardiovasculares.

A combinação do alto PCS com a densidade energética superior viabiliza o uso da espécie *Licania tomentosa*, gerando uma possibilidade de mitigação da pegada de carbono gerada por combustíveis fósseis, utilizando uma fonte renovável de origem residual urbana (Klingenberg, 2020).

4. Conclusões

A compreensão do perfil químico da espécie *Licania tomentosa* (oiti) fornece informações adicionais para definição de usos da mesma, abrangendo não apenas as suas características ecossistêmicas de fornecimento de sombra e frutos para cadeia trófica, mas também benéficas para uso humano, incluindo como uma espécie filtradora de poluição atmosférica causadora de complicações respiratórias, até como fornecedora de frutos proveitosos para prevenção de doenças tumorais e fúngicas. Além disso, sua madeira apresenta ótimas características, viabilizando o uso para produção energética.

5. Agradecimentos

Os autores agradecem a instituição Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (UFRRJ), pelo acesso à base de dados Scopus. Um agradecimento especial à orientadora Natália Dias de Souza pelo auxílio no desenvolvimento, triagem e tratamento dos dados obtidos.

6. Referências bibliográficas

Castilho, R. O., & Kaplan, M. A. C. (2008). Constituintes químicos de *Licania tomentosa* Benth. (Chrysobalanaceae). *Química Nova*, 31(1), 66–69. https://doi.org/10.1590/S0100-40422008000100014

Henriques, B. O., Corrêa, O., Azevedo, E. P. C., Pádua, R. M., Oliveira, V. L. S. de, Oliveira, T. H. C., Boff, D., Dias, A. C. F., Souza, D. G. de, Amaral, F. A., Teixeira, M. M., Castilho, R. O., & Braga, F. C. (2016)[cite: 2]. In vitro TNF-α inhibitory activity of Brazilian plants and anti-inflammatory effect of *Stryphnodendron adstringens* in an acute arthritis model. *Evidence-Based Complementary and Alternative Medicine*, 2016, 1–15. https://doi.org/10.1155/2016/9872598

Pessoa, I. P., Neto, J. J. L., Almeida, T. S. de, Farias, D. F., Vieira, L. R., Medeiros, J. L. de, Boligon, A. A., Peijnenburg, A., Castelar, I., & Carvalho, A. F. U. (2016)[cite: 3]. Polyphenol composition, antioxidant activity and cytotoxicity of seeds from two underexploited wild *Licania* species: *L. rigida* and *L. tomentosa*. *Molecules*, 21(12), Article 1755. https://doi.org/10.3390/molecules21121755

MEDEIROS, Jackeline Lima de *et al*. Chemical composition, nutritional properties, and antioxidant activity of *Licania tomentosa* (Benth.) fruit. Food Chemistry, v. 313, p. 126117, 2020. DOI: https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.126117.

SILVA, J. B. N. F. *et al*. Antibacterial and antioxidant activities of *Licania tomentosa* (Benth.) Fritsch (Chrysobalanaceae). Archives of Biological Sciences, Belgrade, v. 64, n. 2, p. 459-464, 2012. DOI: https://doi.org/10.2298/ABS120245975.

MULYONO, Agus; SASMITANINGHIDAYAH, Wiwis. Effectiveness of Catching Free Radicals in Cigarette Smoke with Biofilters Made from Bidara Leaf Powder. Jurnal Pendidikan Fisika dan Keilmuan (JPFK), v. 7, n. 1, p. 31-38, 2021. DOI: http://doi.org/10.25273/jpfk.v7i1.9524.

Energy potential of wood waste from a tropical urban forest. **Research, Society and Development**, *[S. l.]*, v. 9, n. 9, p. e451997478, 2020. DOI: 10.33448/rsd-v9i9.7478. Disponível em: https://rsdjournal.org/rsd/article/view/7478.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima. **PlaNAU**: Plano Nacional de Arborização Urbana. Brasília, DF: MMA, 2025. 89 p. Disponível em: https://www.gov.br/mma/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/qualidade-ambiental-e-meio-ambiente-urbano/plano-nacional-de-arborizacao-urbana.pdf.

CARVALHO, P. E. R. Oiti-da-Praia: *Licania tomentosa*. In: CARVALHO, P. E. R. **Espécies arbóreas brasileiras**. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica; Colombo: Embrapa Florestas, 2014. v. 5, p. 397-401. Disponível em: https://www.embrapa.br/florestas/publicacoes/especies-arboreas-brasileiras.

Análise comparativa da eficiência de coagulantes comerciais e tanino líquido no tratamento de água

Taís Aparecida das Neves Custódio[1]; Ariane Mateus de Souza[1]; Thaynara Silva Vieira[1]; Kaike Costa Carvalho[1]**;** Luiza Xavier Tomaz Lima[1]; Kezia Ellen Souza Bomfim[1]; Carlos Henrique Reis dos Santos Silva [1]; João Gilberto Meza Ucella Filho[1]

[1] Universidade Federal de Viçosa (UFV)

Resumo: O tratamento de água convencional utiliza predominantemente coagulantes químicos, como o sulfato de alumínio, cuja aplicação pode ocasionar alterações no pH da água tratada e gerar preocupações quanto ao alumínio residual. Nesse contexto, coagulantes naturais à base de tanino surgem como uma alternativa sustentável. O presente estudo teve como objetivo avaliar e comparar a eficiência do tanino líquido comercial e do sulfato de alumínio no tratamento de água por meio de ensaios de coagulação em Jar Test. Foram testadas dosagens de 0, 2, 4, 6, 8 e 10 mg L^{-1}, sendo avaliados os parâmetros cor aparente, turbidez e pH. O tanino apresentou maior eficiência na dosagem de 4 mg L^{-1}, promovendo redução da cor aparente para 31,5 uC e da turbidez para 4,3 UNT, mantendo o pH praticamente constante (6,5). Em contrapartida, o sulfato de alumínio promoveu redução acentuada do pH, atingindo 4,5 na maior dosagem avaliada. Os resultados demonstram que o tanino apresenta elevado potencial para aplicação no tratamento de água, constituindo uma alternativa sustentável aos coagulantes convencionais por proporcionar eficiente remoção de cor e turbidez sem comprometer o pH da água tratada.

Palavras-chave: Potabilidade; Sustentabilidade; Turbidez

A comparative analysis of the efficiency of commercial coagulants and liquid tannin in water treatment

Abstract: Conventional water treatment predominantly relies on chemical coagulants, such as aluminum sulfate, whose application may alter the pH of treated water and raise concerns regarding residual aluminum. In this context, tannin-based natural coagulants have emerged as a sustainable alternative. This study aimed to evaluate and compare the efficiency of commercial liquid tannin and aluminum sulfate in water treatment using jar-test coagulation assays. Coagulant dosages of 0, 2, 4, 6, 8, and 10 mg L^{-1} were evaluated, and apparent color, turbidity, and pH were determined. Liquid tannin exhibited the highest efficiency at a dosage of 4 mg L^{-1}, reducing apparent color to 31.5 CU and turbidity to 4.3 NTU while maintaining the pH virtually unchanged (6.5). In contrast, aluminum sulfate caused a pronounced decrease in pH, reaching 4.5 at the highest dosage evaluated. These findings demonstrate that liquid tannin has considerable potential for water treatment as a sustainable alternative to conventional chemical

coagulants, providing efficient removal of color and turbidity without significantly affecting the pH of the treated water.

Keywords: Drinking Water Quality; Sustainability; Turbidity

1. Introdução

A água é um recurso natural limitado e indispensável à vida, sua disponibilidade depende de uma gestão eficiente. O crescimento populacional e o contínuo desenvolvimento econômico vêm aumentando a demanda por recursos hídricos, e contribuindo para a escassez de água em diversas regiões do mundo (ABREU; RODRIGUES, 2023). A água é essencial para a sobrevivência e manutenção de todos os organismos vivos (SOUZA *et al.*, 2022), porém, deve estar livre de contaminações, sejam química, física, biológica ou microbiológica, e para isso deve ser tratada, contribuindo para eliminar possíveis microrganismos existentes nela antes do seu consumo (PIRES *et al.*, 2022).

A ausência de água potável, associada à falta de saneamento básico e às condições inadequadas de higiene, levam a sérios problemas de saúde pública. Essas condições contribuem para a ocorrência de doenças de veiculação hídrica, sendo responsáveis por aproximadamente 1,3 milhão de mortes por ano em todo o mundo, tendo maior impacto sobre populações vulneráveis, principalmente crianças menores de cinco anos. No Brasil, milhões de pessoas ainda não possuem acesso à água tratada e à coleta de esgoto, o que leva a disseminação de agentes infecciosos, aumentando o risco de transmissão de doenças relacionadas à água contaminada (DUARTE, 2025).

As estações de tratamento comumente utilizam os coagulantes químicos como sulfato de alumínio, pois ele é de baixo custo e eficiente, porém o resíduo de alumínio presente na água pode trazer problemas à saúde humana, como por exemplo Alzheimer, outro ponto negativo é a toxicidade e alto índice de lodos residuais. Os coagulantes orgânicos à base de tanino, surgem como alternativa eficiente aos coagulantes químicos no processo de tratamento de água. Por serem compostos fenólicos biodegradáveis, atuam na neutralização das cargas das partículas coloidais, promovendo a formação de flocos e sedimentação. (SANTOS *et al.*, 2020).

O tratamento de efluentes é essencial para reduzir os impactos ambientais decorrentes das atividades industriais e garantir que os efluentes lançados no meio ambiente atendam aos padrões estabelecidos pela legislação vigente. Por isso, processos eficientes de tratamento é

fundamental para o cumprimento das normas ambientais, como a Resolução CONAMA nº 430/2011 (DUARTE, 2026).

Com isso, o objetivo do trabalho é avaliar o uso de taninos na purificação da água, comparando os resultados com outros coagulantes (LEIVISKÄ; SANTOS, 2023), como o sulfato de alumínio, utilizado nas estações de tratamento, por meio de parâmetros analíticos quanto aos parâmetros pH, cor e turbidez (SANTOS *et al.*, 2020). Este trabalho é importante por avaliar o potencial do tanino como alternativa ao sulfato de alumínio no tratamento de água, contribuindo para o desenvolvimento de processos sustentáveis. Além da possibilidade de redução do uso de coagulantes químicos, taninos podem ser obtidos de resíduos da indústria florestal, como cascas de árvores, pode agregar valor a materiais geralmente descartados, permitindo seu aproveitamento e incentivando práticas da economia circular. Além disso, o estudo contribui para o avanço de tecnologias sustentáveis e para os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), principalmente aqueles relacionados ao consumo e à produção responsáveis, à gestão sustentável da água e à preservação dos recursos naturais.

2. Material e métodos

2.1. Coleta da água

A coleta de água foi realizada na lagoa localizada na Universidade Federal de Viçosa (UFV), no município de Viçosa, Minas Gerais, Brasil, em um ponto de amostragem previamente definido (20°46'14.30" S, 42°52'28.73" W). A amostragem foi realizada manualmente na margem da lagoa, utilizando um béquer para a coleta da água, em conformidade com os procedimentos de segurança adotados para a atividade. Posteriormente, as amostras foram acondicionadas em galões previamente higienizados e identificados para transporte e posterior análise.

2.2. Preparação da solução de tanino

Foi utilizada uma solução comercial de tanino líquido à base de *Acacia mearnsii* De Wild, fornecida pela empresa Tanac na concentração de 25%. Previamente aos ensaios de coagulação, essa solução foi diluída para 2,5% (25.000 mg L^{-1}), sendo utilizada como coagulante natural nos experimentos. A partir dessa solução, foram preparadas diferentes dosagens diretamente nos béqueres contendo 2.000 mL de amostra de água. Para obtenção das concentrações finais de 0, 2, 4, 6, 8 e 10 mg L^{-1}, foram adicionados, respectivamente, 0; 1,6; 3,2; 4,8; 6,4 e 8,0 mL da solução de tanino.

2.3. Preparação da solução sulfato de alumínio

No preparo do coagulante inorgânico utilizou-se 5 ml de sulfato de alumínio diluído em 100 mL de água destilada, obtendo-se uma solução com concentração equivalente a utilizada para o tanino líquido (2,5%). A partir dessa solução, foram aplicadas as mesmas dosagens finais (0, 2, 4, 6, 8 e 10 mg L^{-1}) nos beckeres contendo 2.000 mL de amostra, utilizando-se o mesmo procedimento usado para o tanino líquido, para comparação direta entre os tratamentos.

2.4 Ensaio de coagulação em Jar Test

Os ensaios de coagulação foram realizados utilizando um equipamento Jar Test da marca Nova Ética, para realizar o teste foi adicionado em cada recipiente 2.000 mL de água bruta, aos quais foram aplicadas diferentes dosagens da solução do coagulante, correspondentes às concentrações de 0, 2, 4, 6, 8 e 10 mg/L. Inicialmente, realizou-se mistura rápida a 300 rpm, seguida de mistura lenta a 40 rpm durante 5 minutos. Após a etapa de agitação, as amostras permaneceram em repouso por 20 minutos, permitindo a sedimentação dos flocos formados. Em seguida, foi coletada uma alíquota do sobrenadante para realização das análises subsequente.

2.5 Caracterização da água

As amostras de água foram caracterizadas quanto aos parâmetros de turbidez, cor aparente e potencial hidrogeniônico (pH), antes e após os ensaios de coagulação. As análises foram realizadas no Laboratório de Resíduos da Indústria Florestal (LABRIF) da Universidade Federal de Viçosa, seguindo os procedimentos descritos no *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (APHA; AWWA; WEF, 2023).

2.5.1 Turbidez

A turbidez foi determinada pelo método nefelométrico, utilizando turbidímetro da marca Hach devidamente calibrado. Os resultados foram expressos em Unidades Nefelométricas de Turbidez (UNT), conforme o método 2130 B do *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (APHA; AWWA; WEF, 2023).

2.5.2. Cor aparente

A cor aparente foi determinada por meio de colorímetro da marca Hach, sendo os resultados expressos em unidades de cor (uC), conforme o método 2120 B do *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (APHA; AWWA; WEF, 2023).

2.5.3. pH

O potencial hidrogeniônico (pH) foi determinado utilizando pHmetro previamente calibrado com soluções tampão, conforme o método 4500-H^+ B do *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (APHA; AWWA; WEF, 2023).

2.6. Delineamento experimental

Os ensaios foram conduzidos considerando os diferentes coagulantes e suas respectivas dosagens como tratamentos. Foram avaliadas as dosagens de 0, 2, 4, 6, 8 e 10 mg L^{-1} para o tanino líquido e para o sulfato de alumínio. Para cada tratamento, foram realizadas duas repetições, sendo calculadas as médias e os desvios-padrão dos resultados obtidos.

A eficiência de remoção da cor aparente e da turbidez foi calculada para cada dosagem dos coagulantes, tomando-se como referência o valor obtido na concentração de 0 mg L^{-1} de cada ensaio. A eficiência percentual de remoção foi determinada pela Equação 1: Eficiência de remoção (%) = $[(C_0 - C_t) / C_0] \times 100$, em que C_0 corresponde ao valor inicial do parâmetro na concentração de 0 mg L^{-1} e C_t corresponde ao valor do parâmetro após o tratamento na respectiva dosagem do coagulante. Os cálculos foram realizados separadamente para o tanino líquido e o sulfato de alumínio, uma vez que os ensaios apresentaram valores iniciais distintos. Valores negativos de eficiência indicam aumento do parâmetro em relação à condição de 0 mg L^{-1}.

3. Resultados e discussão

A eficiência dos coagulantes foi avaliada por meio de ensaios de coagulação empregando diferentes dosagens de tanino líquido e sulfato de alumínio, conforme descrito na Tabela 1. A tabela apresenta ainda a caracterização inicial da água bruta utilizada no experimento. Após a aplicação de cada tratamento, foram determinados os parâmetros de qualidade da água, incluindo cor aparente, turbidez e pH, possibilitando a comparação da eficiência dos coagulantes em cada concentração avaliada.

Tabela 1 – Dosagens aplicadas a cada tratamento e caracterização da água.

Testes de coagulação		Resultados analíticos de tanino líquido (2,5%)			Sulfato de alumínio		
Volume do coagulante (mL)	**Concentração no bécker (mg/L)**	**Cor (uC)**	**Turbidez (UNT)**	**pH**	**Cor (uC)**	**Turbidez (UNT)**	**pH**
0	0	57,5 ±2,1	7,7 ±0,1	6,7 ± 0	35,5 ±0,7	7,8 ±0,2	6,9 ±0,1
1,6	2	43,0 ±2,8	6,4 ±0,1	6,5 ±0,2	36,5 ±0,7	5,6 ±0,4	6,5 ±0,1
3,2	4	31,5 ±0,7	4,3 ±0,2	6,3 ±0,1	41,5 ±2,1	6,3 ±0,2	6,3 ±0
4,8	6	47,0 ±1,4	6,0 ±0	6,6 ±0	38,5 ±0,7	6,3 ±0,1	5,4 ±0,1
6,4	8	54,0 ±0	7,3 ±0,1	6,6 ±0	44,0 ±0	7,2 ±0,7	4,9 ±0
8	10	60,5 ±2,1	5,8 ±0,1	6,7 ±0	43,5 ±3,5	6,5 ±0	4,5 ±0,1

Tabela 2 – Eficiência percentual de remoção de cor aparente e turbidez para os coagulantes avaliados.

Concentração (mg L^{-1})	**Tanino Cor (%)**	**Tanino Turbidez (%)**	**Sulfato de alumínio Cor (%)**	**Sulfato de alumínio Turbidez (%)**
0	0,00	0,00	0,00	0,00
2	25,22	16,88	-2,82	28,21
4	45,22	44,16	-16,90	19,23
6	18,26	22,08	-8,45	19,23
8	6,09	5,19	-23,94	7,69
10	-5,22	24,68	-22,54	16,67

Os ensaios com tanino e sulfato de alumínio foram realizados utilizando água da mesma coleta. Porém, os ensaios foram conduzidos em períodos diferentes, sendo realizado inicialmente o ensaio com tanino e, posteriormente, o ensaio com sulfato de alumínio. Dessa forma, foram observadas diferenças nos valores de cor, turbidez e pH da água bruta na dosagem de 0 mg L^{-1}. Essa variação pode estar relacionada a alterações nas características da água durante o período de armazenamento, especialmente em função da presença de matéria orgânica e de processos naturais que podem ocorrer em águas superficiais (Grasset et al., 2023; Andersson et al., 2024). Assim, os valores obtidos para a concentração de 0 mg L^{-1} não foram iguais entre os ensaios, apesar de a água ser da mesma coleta.

Com base nas eficiências percentuais de remoção apresentadas na Tabela 2, o tanino líquido apresentou seu melhor desempenho na dosagem de 4 mg L^{-1}, com remoção de 45,22% da cor aparente e 44,16% da turbidez. Nas dosagens superiores, observou-se redução da eficiência de remoção de cor, indicando que o aumento da concentração do coagulante não resultou em melhoria proporcional do processo. Para o sulfato de alumínio, a maior remoção de turbidez foi observada na dosagem de 2 mg L^{-1}, correspondendo a 28,21%. Em relação à cor aparente, foram obtidos valores negativos de eficiência em todas as dosagens avaliadas, indicando que os valores de cor foram superiores àqueles observados na condição de 0 mg L^{-1}.

A maior eficiência observada na concentração de 4 mg/L pode ser atribuída ao mecanismo de ação do tanino, que promove a neutralização das cargas superficiais das partículas coloidais e a formação de pontes entre elas, favorecendo a agregação, a formação de flocos e, consequentemente, a remoção de cor e turbidez (STIVAL *et al*., 2021). Esse resultado indica que, nessa concentração, foi atingida a dosagem ótima do coagulante, proporcionando maior eficiência na desestabilização das partículas presentes na água. Concentrações inferiores não forneceram quantidade suficiente de tanino para promover uma coagulação eficiente, enquanto concentrações superiores podem ter ocasionado a superdosagem do coagulante, provocando a reestabilização das partículas coloidais e reduzindo a formação de flocos maiores e mais densos. Esse comportamento evidencia que a eficiência do tanino está diretamente relacionada à determinação da dosagem ótima, a qual varia de acordo com as características físico-químicas da água bruta.

O aumento da dosagem acima da concentração ótima reduziu a eficiência da coagulação, por isso a eficiência diminuiu em 6, 8 e 10 mg/L. Esse comportamento pode estar relacionado ao excesso de coagulante disponível no meio, levando a estabilização das partículas coloidais e dificultando a formação de flocos maiores e densos. A eficiência do tanino como coagulante depende da dosagem aplicada, pois está relacionada aos grupos fenólicos presentes em sua estrutura química, responsáveis pela interação com as partículas presentes na água, havendo uma concentração ótima para maximizar a coagulação. (STIVAL *et al*., 2021).

O uso do tanino não sofreu alterações significativas, se mantendo no pH entre 6,5 e 6,7, mantendo valores próximos da água bruta, mesmo com o aumento da dosagem. Demonstrando que o coagulante apresenta baixa demanda de alcalinidade, pois, não sofrem hidrólise e são substâncias estáveis que não alteram significativamente o pH (SILVA *et al.*, 2026), reduzindo a

necessidade de correção química durante o tratamento, sendo uma das maiores vantagens do tanino.

Embora o sulfato de alumínio tenha apresentado bom desempenho em algumas das dosagens avaliadas, o tanino apresentou a maior eficiência de remoção de cor e turbidez na concentração de 4 mg/L, além de manter o pH constante. Em contrapartida, a aplicação do sulfato de alumínio promoveu uma acentuada redução do pH da água, comportamento decorrente da hidrólise dos sais de alumínio, que consome a alcalinidade do meio e libera íons H^+ (KONG *et al.*, 2021). Como consequência, o pH reduziu de 6,9 para 4,5 na maior dosagem de sulfato de alumínio avaliada (10 mg/L).

A eficiência da coagulação pode estar relacionada às características da água bruta utilizada nos ensaios. Em águas com baixa turbidez, a menor concentração de partículas em suspensão reduz a frequência de colisões entre elas, limitando a formação de flocos maiores e mais densos e, consequentemente, diminuindo a eficiência do processo de coagulação e floculação (CHIAVOLA *et al.*, 2023). Dessa forma, a determinação da dosagem ótima do coagulante torna-se ainda mais importante, uma vez que tanto a deficiência quanto o excesso de coagulante podem comprometer a remoção de impurezas.

4. Conclusão

Os resultados demonstraram que o coagulante orgânico à base de tanino apresenta potencial para aplicação no tratamento de água, constituindo uma alternativa sustentável aos coagulantes químicos convencionais, devido à sua elevada eficiência e ao menor impacto sobre o pH do meio. A eficiência do processo, contudo, depende da determinação da dosagem ótima, que varia conforme as características físico-químicas da água tratada.. Dessa forma, estudos futuros devem avaliar sua aplicação em diferentes tipos de águas e efluentes, bem como sua viabilidade técnica e econômica e o uso de taninos provenientes de diferentes espécies florestais, visando ampliar o aproveitamento de resíduos da indústria florestal e fortalecer estratégias de economia circular.

5. Agradecimentos

À Universidade Federal de Viçosa (UFV), ao Departamento de Engenharia Florestal (DEF), ao Laboratório de Resíduos da Indústria Florestal (LABRIF), à Fundação de Amparo à pesquisas de Minas Gerais (FAPEMIG), à Fundação de Coordenadora de Aperfeiçoamento

Pessoal de Nível Superior (CAPES) ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico Tecnológico (CNPq).

Referências bibliográficas

ABREU, Ivanildo Silva; RODRIGUES, Jean Robert Pereira. **Acesso à água potável como um direito fundamental: uma análise de caso do município de Paragominas-PA e a Agência de Saneamento de Paragominas**. *Revista Geopolítica Transfronteiriça (REVGEO)*, v. 17, n. 6, 2023. DOI: https://doi.org/10.56238/revgeov17n6-136

ANDERSSON, A.; POWERS, L.; HARIR, M.; GONSior, M.; HERTKORN, N.; SCHMITT-KOPPLIN, P.; KYLIN, H.; HELLSTRÖM, D.; PETTERSSON, Ä.; BASTVIKEN, D. Molecular level seasonality of dissolved organic matter in freshwater and its impact on drinking water treatment. *Environmental Science: Water Research & Technology*, v. 10, p. 1964–1981, 2024. DOI: 10.1039/D4EW00142G.

Chiavola, A.; Di Marcantonio, C.; D'Agostini, M.; Leoni, S.; Lazzazzara, M. (2023). *A combined experimental-modeling approach for turbidity removal optimization in a coagulation–flocculation unit of a drinking water treatment plant.* **Journal of Process Control**, 130, 103068.

DUARTE, F. A. de O. **Avaliação de coagulante polissacarídico catiônico para a otimização do tratamento de efluentes oleosos da Refinaria de Manaus (REAM) – QQS COA S**. In: **ANAIS EVENTOS**. 2026. DOI: https://doi.org/10.56238/MultiCientifica-084

DUARTE, Raphaela Silva. **Viroses tropicais: análises clínicas e estratégias de controle**. *Revista Ibero-Americana de Humanidades, Ciências e Educação (REASE)*, v. 12, n. 5, 2025. DOI: https://doi.org/10.51891/rease.v12i5.26558

GRASSET, C.; GROENEVELD, M.; TRANVIK, L. J.; ROBERTSON, L. P.; HAWKES, J. A. Hydrophilic species are the most biodegradable components of freshwater dissolved organic matter. *Environmental Science & Technology*, v. 57, n. 36, p. 13463–13472, 2023. DOI: 10.1021/acs.est.3c02175.

KONG, Y.; MA, Y.; DING, L.; MA, J.; ZHANG, H.; CHEN, Z.; SHEN, J. **Coagulation behaviors of aluminum salts towards humic acid: Detailed analysis of aluminum**

speciation and transformation. *Separation and Purification Technology*, v. 259, 118137, 2021. DOI: **10.1016/j.seppur.2020.118137**

LEIVISKÄ, Tiina; SANTOS, Sílvia C. R. **Purifying water with plant-based sustainable solutions: Tannin coagulants and sorbents**. *Groundwater for Sustainable Development*, v. 23, 101004, 2023. DOI: https://doi.org/10.1016/j.gsd.2023.101004

PIRES, Carlos Eduardo da Silva; REGIS, Emilly Cristina Almeida; ANDRADE, José Aylton Cadena; SILVA, Marcia Bastos da. **Controle de qualidade microbiológica da água para consumo humano no Brasil: revisão sistemática**. *Research, Society and Development*, v. 11, n. 16, e311111638459, 2022. DOI: https://doi.org/10.33448/rsd-v11i16.38459.

SANTOS, Weslley Natanael de Araujo; MICHELAN, Denise Conceição de Gois Santos; SANTOS, Débora de Gois; BATISTA, Isabela Ferreira. **Avaliação do uso dos coagulantes sulfato de alumínio e tanino vegetal em parâmetros de tratamento de água para abastecimento humano**. *REDE – Revista Eletrônica do PRODEMA*, v. 14, n. 1, 2020. DOI: https://doi.org/10.22411/rede2020.1401.02.

SILVA, Bruna Rafaella Ferreira da; UCELLA-FILHO, João Gilberto Meza; LOURENÇO, Yanka Beatriz Costa; ANJOS, Bruna Ferreira dos; SILVA, Kamilla Crysllayne Alves da; GOMES, João Paulo Silva; BRAGA, Renata Martins; AZEVEDO, Tatiane Kelly Barbosa de; MORI, Fábio Akira. **Optimization of Turbidity Removal in Water Using Chemically Modified Tannins From Brazilian Species**. *Water Environment Research*, v. 98, n. 6, e70429, 2026. DOI: https://doi.org/10.1002/wer.70429

SOUZA, Daniella Azevedo de; SILVA, Fernanda Barros; PEREIRA, Íris; GOMES, Jany Bernardino Santos; DAMAZIO, Marcia Regina; MOURA, Thamara de Brito; PEREIRA, William Gomes; TEIXEIRA, Ana Izabel Passarella. **A importância da água dentro do conceito de saúde única**. *Brazilian Journal of Health Review*, Curitiba, v. 5, n. 6, p. 24012–24029, 2022. DOI: https://doi.org/10.34119/bjhrv5n6-172

STIVAL, G. C.; *et al.* **Avaliação de coagulantes à base de tanino de acácia-negra para tratamento de água**. *Brazilian Journal of Development*, v. 7, n. 3, 2021. DOI: https://doi.org/10.34117/bjdv7n3-739.

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Análise comparativa da eficiência de tanino líquido e tanino em pó de *Acacia mearnsii* De Wild. no tratamento de água

Kaike Costa Carvalho[1]; Thaynara Silva Vieira[1]; Camila Juliana Sampaio[1]; Luiza Xavier Tomaz Lima[1]; Kezia Ellen Souza Bomfim[1]; Taís Aparecida das Neves Custódio[1]; Pedro Henrique Elias da Silva[1]; João Gilberto Meza Ucella-Filho[1]

[1] Universidade Federal de Viçosa (UFV)

Resumo: Os taninos derivados de *Acacia mearnsii* têm se destacado como alternativa sustentável aos coagulantes inorgânicos utilizados no tratamento de água, porém ainda são escassos estudos que comparem o desempenho das formulações líquida e em pó. Desse modo, este estudo comparou a eficiência dessas formulações na remoção de turbidez e cor aparente de água superficial, visando identificar a mais eficiente nas condições experimentais avaliadas. Os ensaios em Jar Test utilizaram dosagens de 0, 2, 4, 6, 8 e 10 mg L^{-1}. Após 5 minutos de mistura lenta e 20 minutos de decantação, foram avaliados cor aparente, turbidez e pH. O tanino em pó apresentou maior eficiência na remoção da cor aparente, com melhor desempenho na dosagem de 4 mg L^{-1}, enquanto o tanino líquido foi mais eficiente na redução da turbidez. Ambas as formulações promoveram baixa alteração do pH, indicando que a escolha da formulação depende do parâmetro de qualidade da água a ser otimizado.

Palavras-chave: Jar Test; Turbidez; Cor aparente.

Comparative Analysis of the Efficiency of Liquid and Powdered *Acacia mearnsii* De Wild. Tannin in Water Treatment

Abstract: Tannins derived from Acacia mearnsii have emerged as a sustainable alternative to inorganic coagulants used in water treatment; however, studies comparing the performance of liquid and powdered formulations remain scarce. Therefore, this study compared the efficiency of these formulations in removing turbidity and apparent color from surface water using Jar Test, with dosages of 0, 2, 4, 6, 8 and 10 mg L^{-1}. After 5 min of slow mixing and 20 min of settling, apparent color, turbidity and pH were evaluated. Powdered tannin showed greater efficiency in apparent color removal, with the best performance at 4 mg L^{-1}, whereas liquid tannin was more effective in turbidity reduction. Both formulations caused only minor pH changes, indicating that the choice of formulation depends on the water quality parameter to be optimized.

Keywords: Jar Test; Turbidity; Apparent color.

1. INTRODUÇÃO

A crescente demanda por água, impulsionada pelo crescimento populacional, pela expansão urbana e pelo desenvolvimento das atividades agrícolas e industriais, tem intensificado a pressão sobre os recursos hídricos e aumentado a necessidade de garantir água de qualidade para abastecimento. Nesse cenário, a crescente degradação dos mananciais superficiais, decorrente da expansão urbana, das atividades agrícolas e industriais e das mudanças no uso do solo, tem intensificado a necessidade de tecnologias eficientes e ambientalmente sustentáveis para o tratamento de água. Nesse contexto, a coagulação-floculação constitui uma das principais etapas do tratamento convencional, promovendo a remoção de partículas coloidais, matéria orgânica e compostos responsáveis pela cor e turbidez da água (Sánchez-Martín et al., 2010).

Os coagulantes químicos, como o sulfato de alumínio e o cloreto férrico, são amplamente empregados devido à sua elevada eficiência. Entretanto, seu uso está associado à geração de grandes volumes de lodo, alterações no pH da água tratada e elevados custos de manejo dos resíduos, além de preocupações ambientais relacionadas ao emprego contínuo desses compostos (Matilainen et al., 2010).

Entre as alternativas disponíveis, os taninos vegetais destacam-se por sua elevada biodegradabilidade, baixa toxicidade e capacidade de promover a coagulação por mecanismos de neutralização de cargas e formação de pontes entre partículas. Esses biopolímeros apresentam potencial para reduzir a geração de lodo e minimizar alterações nas características químicas da água, constituindo uma alternativa promissora aos coagulantes convencionais (Yin, 2010).

A acácia-negra (*Acacia mearnsii* De Wild.) é uma das principais fontes comerciais de taninos condensados, amplamente utilizada para obtenção de coagulantes naturais. Estudos têm demonstrado elevada eficiência desses produtos na remoção de turbidez e cor aparente em diferentes matrizes aquosas, com reduzida interferência no pH da água tratada (Sánchez-Martín et al., 2010). Contudo, a maioria das pesquisas concentra-se na avaliação de formulações líquidas, havendo escassez de estudos que comparem diretamente o desempenho de diferentes formas físicas do mesmo coagulante, como tanino líquido e tanino em pó, sob as mesmas condições experimentais.

Diante desse contexto, este estudo teve como objetivo comparar a eficiência do tanino líquido e do tanino em pó derivados de *Acacia mearnsii* na remoção de turbidez e cor aparente de água superficial por meio de ensaios de Jar Test, avaliando ainda seus efeitos sobre o pH da água tratada.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Coleta da água

A água utilizada nos ensaios foi coletada na Lagoa da Universidade Federal de Viçosa (UFV), localizada no município de Viçosa, Minas Gerais, Brasil. A coleta foi realizada diretamente na região superficial da lagoa, utilizando galões plásticos previamente higienizados, de forma a obter uma amostra representativa da água bruta utilizada nos experimentos. Após a coleta, as amostras foram transportadas ao laboratório de Resíduos da Indústria Florestal (LABRIF), onde permaneceram armazenadas em temperatura ambiente até a realização das análises.

2.2. Coagulantes

Foram avaliadas duas formulações comerciais de tanino à base de *Acacia mearnsii* De Wild., fornecidos pelo fabricante na forma líquida e na forma de pó. Para o tanino em pó, preparou-se previamente uma solução aquosa a 2,5% (m/v), visando padronizar as condições experimentais e permitir a comparação direta entre as duas formulações. Ambas foram aplicadas nas dosagens finais de 0, 2, 4, 6, 8 e 10 mg L^{-1}.

2.3. Ensaios de coagulação (Jar Test)

Os ensaios de coagulação foram realizados em equipamento de Jar Test, utilizando béqueres contendo 2,0 L de água bruta para cada tratamento. Após a adição da dosagem correspondente de coagulante, as amostras foram submetidas à mistura rápida para promover a dispersão do coagulante e favorecer as colisões entre partículas.

Em seguida, foi realizada a etapa de mistura lenta durante 5 minutos, visando à formação e ao crescimento dos flocos. Finalizada essa etapa, as amostras permaneceram em repouso por 20 minutos para sedimentação dos flocos formados, permitindo a coleta do sobrenadante para as análises físico-químicas. Todos os tratamentos foram realizados em duplicata, a fim de garantir maior confiabilidade e reprodutibilidade dos resultados.

2.4. Análises físico-químicas

Após o período de sedimentação, foram determinados os valores de turbidez (UNT), cor aparente (uC) e potencial hidrogeniônico (pH), seguindo os procedimentos analíticos adotados

pelo laboratório. A eficiência dos coagulantes foi avaliada por meio da comparação dos valores obtidos após cada tratamento em relação à amostra controle (0 mg L^{-1}).

2.5. Análise dos dados

Os resultados foram organizados em planilhas eletrônicas e analisados de forma descritiva, considerando as duas repetições realizadas para cada dosagem e formulação de tanino. Os resultados foram expressos como média das repetições, permitindo a comparação do desempenho das formulações líquida e em pó de tanino de *Acacia mearnsii*. A eficiência de remoção da turbidez e da cor aparente foi calculada para cada dosagem dos coagulantes, em relação à amostra controle (0 mg L^{-1}). A interpretação dos resultados foi realizada de forma comparativa entre as dosagens e formulações avaliadas, considerando o número de repetições disponíveis no experimento. As condições experimentais adotadas no estudo são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 – Condições experimentais adotadas no estudo

Parâmetros	**Condição experimental**
Volume da amostra	2,0 L
Formulações avaliadas	Tanino líquido e tanino em pó (*Acacia mearnsii*)
Solução de tanino em pó	2,5% (m/v)
Dosagens avaliadas	0; 2; 4; 6; 8 e 10 mg L^{-1}
Tempo de mistura lenta	5 minutos
Tempo de decantação	20 minutos
Número de repetições	2
Variáveis analisadas	Cor aparente, turbidez e pH
Volume da amostra	2,0 L
Formulações avaliadas	Tanino líquido e tanino em pó (*Acacia mearnsii*)

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados obtidos evidenciam que a eficiência dos taninos de *A. mearnsii* foi influenciada tanto pela formulação (líquida e em pó) quanto pela dosagem aplicada, conforme apresentado nas Tabelas 2 e 3. Os ensaios de coagulação evidenciaram diferenças no desempenho das formulações líquida e em pó do tanino quanto à remoção de cor aparente e turbidez da água superficial. Em ambos os casos, observou-se redução dos parâmetros analisados em relação à amostra controle, confirmando o potencial coagulante dos taninos para o tratamento de água.

Tabela 2 – Valores médios de cor aparente, turbidez e pH da água tratada com tanino em pó de *Acacia mearnsii*

Dosagem (mg L^{-1})	**Cor aparente (uC)**	**Remoção de cor (%)**	**Turbidez (UNT)**	**Remoção de turbidez (%)**
0	149,5	–	14,65	–
2	157,0	-5,0	15,00	-2,4
4	59,0	60,5	8,74	40,3
6	68,5	54,2	9,52	35,0
8	75,0	49,8	8,59	41,4
10	78,5	47,5	8,61	41,2

Tabela 3 – Valores médios de cor aparente, turbidez e pH da água tratada com tanino líquido de *Acacia mearnsii*

Dosagem (mg L^{-1})	**Cor aparente (uC)**	**Remoção de cor (%)**	**Turbidez (UNT)**	**Remoção de turbidez (%)**
0	113,0	–	20,40	–
2	101,5	10,2	12,40	39,2
4	82,0	27,4	11,35	44,4
6	52,0	54,0	5,66	72,3

8	41,0	63,7	5,91	71,0
10	47,0	58,4	5,41	73,5

A formulação em pó apresentou redução expressiva da cor aparente já nas menores dosagens avaliadas, alcançando o melhor desempenho na concentração de 4 mg L^{-1}, com diminuição de aproximadamente 60% em relação à água bruta. A partir dessa concentração, observou-se discreta elevação da cor residual, sugerindo que o aumento da dosagem não resultou em ganhos adicionais de eficiência. Esse comportamento é característico de processos de coagulação, nos quais a dosagem ótima promove a neutralização das cargas superficiais das partículas, enquanto o excesso de coagulante pode ocasionar reestabilização das suspensões coloidais, reduzindo a eficiência do processo (Sánchez-Martín et al., 2009). De forma semelhante, Yin (2010) destaca que taninos obtidos de diferentes espécies vegetais também apresentam uma dosagem ótima de coagulação, sendo comum a redução da eficiência quando concentrações superiores às ideais são empregadas.

Para a turbidez, o tanino em pó apresentou redução gradual com o incremento da dosagem, atingindo os menores valores entre 8 e 10 mg L^{-1}. Esse comportamento indica que a formação e o crescimento dos flocos ocorreram de forma progressiva, favorecendo a sedimentação das partículas em suspensão à medida que aumentou a disponibilidade de sítios ativos para adsorção e formação de pontes entre partículas. Resultados semelhantes foram observados por Tomasi et al. (2022), que relataram elevada eficiência de coagulantes derivados de taninos na remoção de sólidos suspensos e turbidez em águas superficiais. De forma semelhante, Sánchez-Martín et al. (2010) verificaram que coagulantes à base de taninos também apresentaram elevada eficiência na remoção de turbidez em águas superficiais, destacando que o desempenho desses materiais depende das características da água bruta e das condições operacionais empregadas.

O tanino líquido apresentou desempenho superior ao da formulação em pó para a remoção de turbidez. Houve redução contínua desse parâmetro com o aumento da dosagem, atingindo aproximadamente 74% de remoção na concentração de 10 mg L^{-1}, enquanto a menor cor aparente foi obtida na dosagem de 8 mg L^{-1}, representando redução de cerca de 64% em relação à condição inicial. Esses resultados sugerem que a formulação líquida apresenta maior disponibilidade imediata dos grupos ativos responsáveis pela coagulação, favorecendo a interação com as partículas coloidais presentes na água e proporcionando maior eficiência na

formação dos flocos. Estudos conduzidos com coagulantes catiônicos derivados de taninos de *Acacia mearnsii* também demonstram elevada eficiência na remoção simultânea de turbidez e cor em águas superficiais, atribuindo esse comportamento à elevada densidade de cargas positivas incorporadas durante a modificação química do tanino (Beltrán-Heredia et al., 2011). Corroborando esses resultados, Yin (2010) destaca que taninos obtidos de diferentes espécies vegetais apresentam potencial para aplicação como coagulantes naturais, embora sua eficiência possa variar em função da composição química do extrato, da dosagem empregada e das características da água tratada. Esse comportamento reforça que a origem do tanino e sua formulação constituem fatores importantes para o desempenho do processo de coagulação.

Embora ambas as formulações tenham apresentado desempenho satisfatório, verificou-se diferença no comportamento em função da variável analisada. Enquanto o tanino em pó apresentou elevada eficiência na remoção da cor em baixas dosagens, o tanino líquido destacou-se pela maior remoção da turbidez, especialmente nas concentrações entre 6 e 10 mg L^{-1}. Essa diferença pode estar relacionada às características físico-químicas de cada formulação, principalmente quanto à velocidade de solubilização, dispersão na água e disponibilidade dos grupos fenólicos e catiônicos responsáveis pelos mecanismos de neutralização de cargas e adsorção interparticular (Tomasi et al., 2022). Esse comportamento também é descrito por Yin (2010), que destaca que diferenças na composição química dos taninos provenientes de diferentes espécies vegetais influenciam diretamente sua eficiência na remoção de cor e turbidez.

Em relação ao pH, observou-se pequena variação após a aplicação dos coagulantes. Para o tanino em pó, os valores permaneceram próximos de 6,0, enquanto para o tanino líquido estabilizaram-se em torno de 5,9 durante praticamente todas as dosagens avaliadas. Essa reduzida interferência no potencial hidrogeniônico constitui uma das principais vantagens dos coagulantes naturais à base de taninos, uma vez que minimiza a necessidade de correção química da água tratada e reduz o consumo de alcalinizantes durante a operação das estações de tratamento. Resultados semelhantes têm sido amplamente reportados na literatura para coagulantes derivados de *Acacia mearnsii*, evidenciando estabilidade operacional e menor impacto nas características químicas da água quando comparados aos sais metálicos convencionais (Tomasi et al., 2022).

De forma geral, os resultados confirmam que ambas as formulações de tanino constituem alternativas tecnicamente viáveis para aplicação em processos convencionais de

coagulação. Entretanto, a escolha entre o produto líquido e o produto em pó deve considerar as características da água bruta e o parâmetro de qualidade prioritário no tratamento. Nas condições avaliadas, o tanino em pó apresentou maior potencial quando o objetivo principal foi a remoção da cor aparente, enquanto o tanino líquido apresentou vantagem na redução da turbidez. Além da eficiência de remoção, aspectos operacionais, como facilidade de preparo, transporte, armazenamento, estabilidade e custos logísticos, também devem ser considerados, pois podem influenciar a aplicação desses coagulantes em escala real (Tomasi et al., 2022).

Dessa forma, o tanino em pó pode ser indicado para condições em que se busca maior remoção da cor aparente, especialmente considerando seu melhor desempenho na dosagem de 4 mg L^{-1}. Por outro lado, o tanino líquido apresenta maior potencial para processos nos quais a redução da turbidez seja prioritária, principalmente nas maiores dosagens avaliadas. Esses resultados reforçam que a seleção da formulação deve estar relacionada às características específicas da água a ser tratada e ao parâmetro de qualidade que se pretende otimizar. Os resultados obtidos corroboram estudos anteriores que apontam os taninos vegetais como alternativas aos coagulantes inorgânicos, devido à sua eficiência na remoção de cor e turbidez e à baixa interferência sobre o pH da água (Sánchez-Martín et al., 2010; Yin, 2010).

Apesar dos resultados obtidos, estudos futuros devem avaliar o desempenho das duas formulações em diferentes condições de água bruta, incluindo variações de turbidez, cor e matéria orgânica. Também são recomendadas análises estatísticas mais aprofundadas e avaliações em escala piloto, visando ampliar a compreensão do desempenho dos taninos de *Acacia mearnsii* e verificar sua aplicabilidade em condições mais próximas às de sistemas reais de tratamento de água.

4. CONCLUSÕES

Os resultados demonstraram que ambas as formulações de tanino derivadas de *Acacia mearnsii* apresentam potencial como coagulantes naturais no tratamento de água superficial, promovendo a redução da cor aparente e da turbidez com baixa influência sobre o pH da água tratada. Dessa forma, nas condições experimentais avaliadas, o tanino em pó mostrou-se mais eficiente para a remoção de cor aparente, enquanto o tanino líquido apresentou melhor desempenho na redução da turbidez.

5. AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal de Viçosa (UFV), ao Departamento de Engenharia Florestal (DEF), ao Laboratório de Resíduos da Indústria Florestal (LABRIF), à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG), à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Beltrán-Heredia, J., Sánchez-Martín, J., & Gómez-Muñoz, M. C. (2011). *Optimization of the synthesis of a new coagulant from a tannin extract*. *Journal of Hazardous Materials, 186*(2–3), 1704–1712. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2010.12.075

Matilainen, A., Vepsäläinen, M., & Sillanpää, M. (2010). *Natural organic matter removal by coagulation during drinking water treatment: A review*. *Advances in Colloid and Interface Science, 159*(2), 189–197. https://doi.org/10.1016/j.cis.2010.06.007

Sánchez-Martín, J., Beltrán-Heredia, J., & Solera-Hernández, C. (2010). *Surface water and wastewater treatment using a new tannin-based coagulant: Pilot plant trials*. *Journal of Environmental Management, 91*(10), 2051–2058. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2010.05.013

Sánchez-Martín, J., González-Velasco, M., & Beltrán-Heredia, J. (2009). *Acacia Chemistry and Technology*, *29*(2), 119–135. https://doi.org/10.1080/02773810902796146

Tomasi, I. T., Machado, C. A., Boaventura, R. A. R., Botelho, C. M. S., & Santos, S. C. R. (2022). *Tannin-based coagulants: Current development and prospects on synthesis and uses*. *Science of the Total Environment, 822*, 153454. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.153454

Yin, C.-Y. (2010). *Emerging usage of plant-based coagulants for water and wastewater treatment*. *Process Biochemistry, 45*(9), 1437–1444. https://doi.org/10.1016/j.procbio.2010.05.030

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Análise Imediata da Biomassa Proveniente da Polpa de *Geoffroea spinosa* Jacq.

Grazielle Melo de Oliveira[1]; Ageu da Silva Monteiro Freire[1]; Ivaneide Maria da Silva Barbosa[1]; Renata Martins Braga[1]

[1] Universidade Federal do Rio Grande do Norte

Resumo: O crescente interesse por materiais oriundos de fontes renováveis impulsiona estudos sobre o potencial tecnológico e sustentável de biomassas vegetais. O presente trabalho caracterizou a biomassa proveniente da polpa do umari por meio da análise imediata. A polpa foi separada, seca em estufa a 60 °C por 24 h, moída e submetida às determinações dos teores de umidade, cinzas, materiais voláteis e carbono fixo, seguindo normas ASTM. O material apresentou teor de umidade de 16,41%, cinzas de 8,94%, materiais voláteis de 83,53% e carbono fixo de 7,52%. Os resultados indicam predominância da fração orgânica da biomassa, característica típica de materiais de origem vegetal, além de um conteúdo mineral expressivo evidenciado pelo teor de cinzas. Considerando a escassez de estudos sobre a caracterização tecnológica da polpa de G. *spinosa*, os dados obtidos ampliam o conhecimento sobre a espécie e fornecem informações que poderão subsidiar pesquisas futuras voltadas ao seu aproveitamento em diferentes aplicações.

Palavras-chave: Umari; Caracterização; Caatinga.

Proximate Analysis of Biomass Derived from the Pulp of *Geoffroea spinosa* Jacq.

Abstract: The increasing demand for renewable resources has driven research into the technological and sustainable potential of plant biomass. The present study aimed to characterize the biomass derived from *Geoffroea spinosa* Jacq. (umari) pulp through proximate analysis. The pulp was separated, oven-dried at 60 °C for 24 h, ground, and subjected to the determination of moisture, ash, volatile matter, and fixed carbon contents according to ASTM standards. The biomass exhibited moisture, ash, volatile matter, and fixed carbon contents of 16.41%, 8.94%, 83.53%, and 7.52%, respectively. The results indicate the predominance of the organic fraction of the biomass, a characteristic commonly associated with plant-derived materials, as well as a considerable mineral content, as evidenced by the ash content. Given the limited number of studies on the technological characterization of G. *spinosa* pulp, these findings expand the current knowledge of the species and provide a basis for future research aimed at exploring its potential for different applications.

Keywords: Umari; Characterization; Caatinga.

1. Introdução

Em escala global, há uma crescente demanda por soluções de energia verde, assim como uma variabilidade de bioprodutos que cresce constantemente e que impulsiona a procura por

fontes sustentáveis, com o fim de reduzir emissões de gases tóxicos e a dependência em combustíveis fósseis (Brown, 2022; Osman et al., 2023). Nesse contexto, o crescente interesse pela valorização de biomassas vegetais e resíduos agroindustriais tem impulsionado pesquisas voltadas ao aproveitamento de materiais sustentáveis para diferentes aplicações industriais. Sendo uma fonte renovável e de alta disponibilidade no ambiente, resíduos como o bagaço de cana-de-açúcar, fibra de coco, cascas e polpas de frutos, vêm sendo investigados como matérias-primas para a produção de bioenergia, biomateriais, biocombustíveis e compostos de alto valor agregado destinados às indústrias alimentícia, farmacêutica e cosmética (Krbečková et al., 2024; Fernandes et al., 2025; Basera et al., 2024).

A definição de aplicações para uma biomassa depende, inicialmente, do conhecimento de suas propriedades físicas e químicas. Dessa forma, a caracterização constitui uma etapa fundamental para avaliar seu potencial tecnológico e orientar seu aproveitamento em diferentes processos industriais. Entre os métodos de caracterização mais utilizados destaca-se a análise imediata, que determina os teores de umidade, materiais voláteis, cinzas e carbono fixo, fornecendo informações relevantes sobre a composição geral da biomassa e subsidiando estudos voltados ao seu aproveitamento (Racero-Galaraga et al., 2024).

Entre as espécies nativas brasileiras com potencial de aproveitamento tecnológico destaca-se *Geoffroea spinosa* Jacq. (*Fabaceae*), conhecida popularmente como umari. A espécie ocorre naturalmente em áreas de Caatinga e outras formações sazonalmente secas do Nordeste brasileiro, sendo reconhecida por seu potencial alimentício e medicinal, embora ainda não existam estudos relacionados à caracterização tecnológica da polpa de seus frutos (Pinheiro et al, 2020; Roque et al., 2010). Também é importante compreender que a espécie produz muitos frutos carnosos que não são muito utilizados, principalmente por não ter muitas pesquisas sobre seu aproveitamento. Desse modo, a caracterização físico-química da polpa do umari, fornece informações relevantes para a compreensão de suas propriedades. O presente trabalho teve como objetivo caracterizar a biomassa proveniente da polpa de umari, através de análise imediata.

2. Material e métodos

Coleta do material

Os frutos do umari foram coletados em um fragmento de Floresta Tropical Sazonalmente Seca (FTSS), em área de transição dos biomas Caatinga e Mata Atlântica, a 630

m de altitude, localizado no município de Macaíba/RN (5º 53’S e 35º 23’ W). O clima é uma transição entre os tipos As’ e Bs’, de acordo com a classificação de Köppen, com precipitação média anual de 1.086 mm (Cestaro et al, 2004). Após a coleta, a polpa foi retirada, submetida a secagem em estufa a 60 °C, por 24h, e moída com um moinho de facas. O conteúdo foi armazenado em sacos plásticos zipados para a realização das caracterizações.

Teor de umidade

A umidade foi determinada de acordo com a norma ASTM E871- 82 (2019), através do cálculo da perda de massa de uma amostra quando aquecida sob condições de temperatura e tempo controladas. A análise foi feita em triplicata, onde inicialmente foi retirado a umidade dos cadinhos de porcelana, os colocando em uma estufa regulada a 103° C durante 60 minutos. Passado esse tempo, os cadinhos foram colocados em um dessecador até alcançarem temperatura ambiente e, em seguida, pesados. Foi pesado aproximadamente 1 g de biomassa da polpa do umari em cada cadinho, registrando os valores como MI (massa inicial). O conteúdo ficou na estufa por 16 h a 103 ° C, e foi transportado para o dessecador novamente até esfriar, sendo pesado em seguida como MF (massa final).

Para os cálculos do percentual de umidade foi utilizada a Equação 1:

$$U(\%) = \frac{M_I - M_F}{M_I} \times 100 \qquad (1)$$

Onde:

Mi: Massa inicial da amostra (g);

Mf: Massa final da amostra (g).

Teor de cinzas

A determinação do percentual de cinzas foi feita seguindo a norma ASTM E I755- 01 (2020), em triplicata. Aproximadamente 1 g de material seco foi acondicionado em cadinhos e, posteriormente, submetidos ao aquecimento em forno mufla. Inicialmente, as amostras permaneceram a 250 °C durante 30 minutos e, posteriormente, a 600 °C por 3 h. Após o resfriamento do forno, os cadinhos foram transferidos para um dessecador, onde permaneceram até atingirem a temperatura ambiente. Em seguida, foram pesados para a determinação do teor de cinzas.

Os cálculos para o percentual de cinzas foram obtidos por meio da Equação 2.

$$Cinzas(\%) = \frac{M_f}{M_i} \times 100 \quad (2)$$

Onde:

Mi: Massa inicial da amostra seca (g);

Mf: Massa de cinzas encontrada no final (g).

Teor de voláteis

O teor de voláteis foi obtido seguindo a norma ASTM E872-82 (2019). Aproximadamente 1 g da biomassa seca foi acondicionada em cadinhos previamente secos e, em seguida, submetido ao aquecimento em forno mufla a 750 °C durante 7 minutos. Após esse período, os cadinhos foram transferidos para um dessecador, onde permaneceram até atingirem a temperatura ambiente. Posteriormente, foram pesados para a determinação do teor de materiais voláteis.

O teor de materiais voláteis foi calculado conforme a Equação 3.

$$Voláteis(\%) = \frac{M_I - M_F}{M_I} \times 100 \quad (3)$$

Onde:

Mi: Massa inicial da amostra seca (g);

Mf: Massa final da amostra seca (g).

Teor de carbono fixo

Para a determinação do teor de carbono fixo, foram utilizados os valores previamente obtidos para os teores de cinzas e materiais voláteis, conforme a Equação 4.

$$Carbono\ fixo(\%) = 100 - (Teor\ de\ voláteis + Teor\ de\ cinzas) \quad (4)$$

3. Resultados e discussão

As médias dos teores de umidade, cinzas, voláteis e carbono fixo da polpa de umari são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 – Análise imediata da polpa dos frutos do umari.

	Umidade	**Cinzas**	**Voláteis**	**Carbono fixo**

%				
	16,4067	8,9408	83,5347	7,525
Desvio padrão	0,0824	0,0945	0,5940	0,2318

Avaliando os resultados da análise imediata da polpa do umari, o teor de umidade de 16,41% (Tabela 1) indica que a biomassa apresenta uma quantidade considerável de água, resultado esperado já que a polpa é a parte mais úmida do fruto. A determinação desse parâmetro é fundamental, pois a umidade influencia diretamente a estabilidade da biomassa, o armazenamento, o processamento e sua suscetibilidade à deterioração microbiológica. Além disso, esse parâmetro é amplamente empregado na caracterização inicial de biomassas destinadas a diferentes aplicações tecnológicas (Racero-Galaraga et al., 2024). Estudos recentes com frutos nativos e subprodutos vegetais também destacam que o teor de umidade constitui um dos principais indicadores da qualidade e do potencial de aproveitamento desses materiais (Rodrigues et al., 2024).

O teor de cinzas obtido (8,94%) representa a fração mineral da biomassa e pode estar relacionado à composição nutricional da polpa. A quantidade de cinzas varia entre espécies vegetais e pode ser influenciada por fatores como condições edafoclimáticas, estádio de maturação e processamento do material. Dessa forma, esse parâmetro é frequentemente utilizado para comparar diferentes biomassas e avaliar seu potencial de utilização em processos industriais (Racero-Galaraga et al., 2024). Em revisões recentes sobre resíduos de frutas, o conteúdo mineral tem sido apontado como uma característica relevante para a valorização de biomassas vegetais e seus coprodutos (Tsegay et al., 2024). Nesse contexto, resíduos de frutas também apresentam potencial para valorização por meio de processos termoquímicos, como a pirólise, visando à produção de biochar e à sua posterior utilização em aplicações agrícolas e ambientais (Zhang et al., 2024).

A polpa também apresentou um alto teor de materiais voláteis (83,53%), indicando predominância de compostos orgânicos termicamente degradáveis, comportamento característico de biomassas vegetais. Embora a análise imediata não permita identificar a natureza química desses constituintes, esse resultado demonstra que a maior parte da biomassa é composta por substâncias orgânicas passíveis de degradação térmica. Em consequência, o carbono fixo apresentou valor de 7,52%, inferior ao teor de materiais voláteis, comportamento esperado para materiais de origem vegetal. O carbono fixo corresponde à fração sólida remanescente após a eliminação dos compostos voláteis durante o aquecimento e, juntamente

com os demais parâmetros da análise imediata, fornece informações importantes para a caracterização tecnológica de biomassas (Racero-Galaraga et al., 2024).

Apesar do crescente interesse por espécies frutíferas nativas brasileiras, os estudos envolvendo o umari concentram-se principalmente na composição nutricional, nos compostos bioativos, em aspectos ecológicos e no potencial alimentício da espécie, permanecendo escassas as informações relacionadas à caracterização tecnológica da polpa por meio da análise imediata (Rodrigues et al., 2024). Dessa forma, os resultados obtidos neste estudo contribuem para ampliar o conhecimento sobre essa espécie, fornecendo informações que poderão subsidiar futuras pesquisas voltadas ao aproveitamento da polpa em diferentes aplicações.

4. Conclusões

A caracterização da polpa de *Geoffroea spinosa* por meio da análise imediata possibilitou a obtenção de parâmetros fundamentais para o conhecimento inicial de suas possíveis aplicações. O elevado teor de materiais voláteis, associado ao baixo teor de carbono fixo, indica predominância de frações termicamente degradáveis e sugere que a biomassa apresenta potencial para estudos envolvendo processos de conversão termoquímica, como a pirólise, com possível formação de produtos gasosos e condensáveis. O teor de cinzas, por sua vez, evidencia uma fração mineral relevante, que pode influenciar o comportamento da biomassa durante a conversão térmica e a composição dos produtos obtidos. Embora esses resultados indiquem possibilidades de aproveitamento da polpa de umari em processos termoquímicos, são necessárias análises complementares para avaliar de forma mais aprofundada o potencial de aproveitamento dessa biomassa.

5. Agradecimentos

Agradecemos à Universidade Federal do Rio Grande do Norte, juntamente com a Escola Agrícola de Jundiaí, e à FUNPEC pelo apoio e bolsas concedidas.

6. Referências bibliográficas

American Society for Testing and Materials. ASTM E871-82 (2019), Standard Test Method for Moisture Analysis of Particulate Wood Fuels, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2019, www.astm.org.

American Society for Testing and Materials. ASTME1755-01 (2020), Standard Test Method for Ash in Biomass, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2019, www.astm.org.

American Society for Testing and Materials. ASTM E872-82 (2019), Standard Test Method for Volatile Matter in the Analysis of Particulate Wood Fuels, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2019, www.astm.org.

Basera, P., Chakraborty, S. & Sharma, N. Lignocellulosic biomass: insights into enzymatic hydrolysis, influential factors, and economic viability. Discov Sustain 5, 311 (2024). https://doi.org/10.1007/s43621-024-00543-5

Brown, M. 2022. Personal communication via IEA Bioenergy Technology Collaboration Program, University of the Sunshine Coast. December 2022.

Cestaro, L. A., & Soares, J. J. (2004). Variações florística e estrutural e relações fitogeográficas de um fragmento de floresta decídua no Rio Grande do Norte, Brasil. Acta Botanica Brasilica, 18, 203–208. https://doi.org/10.1590/S0102-33062004000200001.

Fernandes, F., Delerue-Matos, C. & Grosso, C. Unveiling the Potential of Agrifood By-products: a Comprehensive Review of Phytochemicals, Bioactivities and Industrial Applications. Waste Biomass Valor 16, 2715–2748 (2025). https://doi.org/10.1007/s12649-024-02622-0

Krbečková, V., Plachá, D., Raw biowaste conversion to high-value compounds for food, cosmetic and pharmaceutical industries, Environmental Research, Volume 263, Part 2, 2024, 120134, ISSN 0013-9351, https://doi.org/10.1016/j.envres.2024.120134.

Osman AI, Farghali M, Ihara I, Elgarahy AM, Ayyad A, Mehta N, Ng KH, Abd El-Monaem EM, Eltaweil AS, Hosny M, Hamed SM, Fawzy S, Yap P-S, Rooney DW (2023) Materials, fuels, upgrading, economy, and life cycle assessment of the pyrolysis of algal and lignocellulosic biomass: a review. Environ Chem Lett 21:1419–1476. https://doi.org/10.1007/s10311-023-01573-7

Pinheiro, L. S. S., Araújo, A. S., Rodrigues, M. S. A., Freitas, F. B. F., Deodato, J. N. V., Oliveira, D. S., Araújo, O. S., Costa, G. L. V., Rodrigues, A. A., Medeiros, A. C., & Albuquerque, T. N. (2020). Nutritional properties of cereal bars produced from fruit flour of marizeiro. Research, Society and Development, 9(10), e4849108707. https://doi.org/10.33448/rsd-v9i10.8707.

Racero-Galaraga, D., Rhenals-Julio, J. D., Sofan-German, S., Mendoza, J. M., & Bula-Silvera, A. (2024). Proximate analysis in biomass: Standards, applications and key characteristics. Results in Chemistry, 12, 101886. https://doi.org/10.1016/j.rechem.2024.101886.

Rodrigues, N. L., Souza, A. L. C., Oliveira, C. C., Carvalho, M. G., Lima, B. R., Akutsu, R. C. C. A., Lana, V. S., Raposo, A., Saraiva, A., Han, H., Carvalho, I. M. M. Nutritional and biological attributes of Spondias tuberosa (Umbu) fruit: An integrative review with a systematic approach, Journal of Food Composition and Analysis, Volume 130, 2024, 106196, ISSN 0889-1575, https://doi.org/10.1016/j.jfca.2024.106196.

Roque, A. A., Rocha, R. M., & Loiola, M. I. B. (2010). Uso e diversidade de plantas medicinais da Caatinga na comunidade rural de Laginhas, município de Caicó, Rio Grande do Norte (Nordeste do Brasil). Revista Brasileira de Plantas Medicinais, 12(1), 31–42. https://doi.org/10.1590/S1516-05722010000100006.

Tsegay, Z. T., Gebreegziabher, S. T., Mulaw, G. Nutritional Qualities and Valorization Trends of Vegetable and Fruit Byproducts: A Comprehensive Review, Journal of Food Quality, 2024, 5518577, 42 pages, 2024. https://doi.org/10.1155/2024/5518577.

Zhang, A., Qiu, Y., Chen, D., Feng, Y., Zhang, B. Valorization of fruit waste by biochar production via thermochemical conversion: A mini-review. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, v. 182, 2024, 106688. DOI: 10.1016/j.jaap.2024.106688.

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Aplicabilidade e eficiência do tanino cationizado de *Anacardium occidentale* em função do tempo de armazenamento

Kedma Carla Santana do Nascimento[1]; Tatiane Kelly Barbosa de Azevedo[1]; Elaine Cristina Alves da Silva[1]; Denys Santos de Souza[1]; Wilkally Crislían Laynne de Moura[1]; José Ricardo Souza da Silva[1]; Kayo Lucas Batista de Paiva[1]; Paula Evanyn Pessoa do Nascimento[1]

[1] Universidade Federal do Rio Grande do Norte

Resumo: O uso de taninos vegetais como floculantes naturais tem se destacado como alternativa sustentável aos coagulantes químicos no tratamento de água, devido à sua biodegradabilidade e baixo impacto ambiental. Este trabalho teve como objetivo avaliar a aplicabilidade e a eficiência do tanino vegetal extraído da casca de *Anacardium occidentale* como coagulante natural, em função do seu tempo de vida útil, no processo de clarificação da água. O tanino foi extraído por decocção aquosa, quantificado pelo método de Stiasny e cationizado pela reação de Mannich. O material utilizado para essa pesquisa se encontra armazenado desde 2024, no qual foi avaliado a sua turbidez inicial em 150 MTU. Esse coagulante foi testado em ensaios de Jar-test, com leituras de turbidez a cada 10 minutos ao longo de 1 hora, em quatro intervalos de análise (0, 3, 6 e 9 meses, contados a partir da primeira leitura. O tanino avaliado no primeiro intervalo (0 meses) atingiu a maior eficiência de remoção de turbidez (82,5%), enquanto os intervalos de 3 e 6 meses apresentaram desempenho inferior (41,1% e 39,8%), com recuperação parcial aos 9 meses (52,2%). Os resultados indicam que o tempo de armazenamento compromete o potencial floculante do tanino de *Anacardium occidentale* de forma não linear, sugerindo possíveis alterações químicas ou de estabilidade do coagulante cationizado ao longo do tempo. Conclui-se que a validade do floculante natural necessita de estudos complementares, sobretudo quanto à sua formulação e condições de armazenamento, para viabilizar sua aplicação prática e comercial no tratamento de água.

Palavras-chave: Jar-Test; Turbidez; Tratamento de água.

Applicability and efficiency of cationized Anacardium occidentale tannin as a function of storage time

Abstract: The use of plant tannins as natural flocculants has stood out as a sustainable alternative to chemical coagulants in water treatment, due to their biodegradability and low environmental impact. However, little is known about the stability of this potential flocculant over storage time. This study aimed to evaluate the applicability and efficiency of the vegetable tannin extracted from *Anacardium occidentale* bark as a natural coagulant, as a function of its shelf life, in the water clarification process. The tannin was extracted by aqueous decoction, quantified using the Stiasny method, and cationized through the Mannich reaction. The material used in this research has been stored since 2024, with an initial turbidity of 150 NTU. This coagulant was tested through Jar-test assays, with turbidity readings taken every 10 minutes over a 1-hour period, at four analysis intervals (0, 3, 6, and 9 months, counted from the first reading). The tannin evaluated at the first interval (0 months) achieved the highest turbidity removal efficiency (82.5%), while the 3- and 6-month intervals showed lower performance (41.1% and 39.8%, respectively), with partial recovery at 9 months (52.2%). The results

indicate that storage time compromises the flocculant potential of *Anacardium occidentale* tannin in a non-linear manner, suggesting possible chemical or stability changes in the cationized coagulant over time. It is concluded that the validity of the natural flocculant requires further studies, particularly regarding its formulation and storage conditions, in order to enable its practical and commercial application in water treatment.

Keywords: Jar-test; Turbidity; Water treatment.

1. Introdução

Nas últimas décadas, o crescimento populacional tem sido especialmente intenso nos centros urbanos, e esse processo vem afetando diretamente a qualidade de vida da população (ALVIM et al. 2024). À medida que as cidades crescem, aumenta também o consumo de água, o que gera déficits no abastecimento e compromete a qualidade da água disponível para grandes contingentes populacionais. Esse cenário é agravado pelo desmatamento decorrente da própria urbanização, que reduz a capacidade de armazenamento natural dos recursos hídricos e de acordo com a Confederação Nacional de Municípios (CNM, 2014), torna o tratamento de água para abastecimento público um desafio cada vez mais complexo para os gestores públicos.

Diante desse contexto, os taninos vegetais vêm se consolidando como uma alternativa promissora aos coagulantes químicos tradicionais no tratamento de águas destinadas ao consumo humano. Entre suas principais vantagens estão o baixo custo de obtenção, já que se encontram amplamente distribuídos nas cascas de diversas espécies arbóreas, e a eficácia comprovada em uma ampla faixa de pH (BELLO et al., 2020; DAS et al., 2020). Diferentemente dos sais e polímeros sintéticos, que costumam alterar o pH da água tratada e apresentar riscos toxicológicos à saúde humana, os taninos se destacam por serem biodegradáveis, não tóxicos, não corrosivos e provenientes de fontes renováveis (MONTEIRO et al., 2005).

No cenário nacional, esse potencial já vem sendo explorado comercialmente. Por exemplo, a empresa brasileira TANAC exporta cerca de 85% de sua produção de extratos tânicos, obtidos principalmente a partir da *Acacia mearnsii*, para mais de 70 países, o que coloca o Brasil entre os maiores exportadores tânicos do mundo (TANAC, 2013; IBGE, 2017). Esse tipo de coagulante também já demonstrou sua utilidade em situações emergenciais, tal como o tanino extraído da acácia-negra que foi empregado na recuperação da captação de água do Rio Doce após o rompimento da barragem de Fundão, acelerando de forma expressiva o processo de decantação da lama presente na água (FRANCO, 2016).

No que diz respeito especificamente ao tanino extraído da casca de *Anacardium occidentale*, estudos recentes têm demonstrado de forma consistente seu potencial como agente floculante. Em estudos realizados por Anjos et al. (2022) e Nascimento et al. (2026) foi verificado que a eficiência do uso desse tanino para tratamento de água tem significativa taxa de redução de turbidez.

Apesar desses resultados promissores, ainda há uma lacuna importante na literatura quanto à validade e à estabilidade do potencial floculante desses taninos ao longo do tempo de armazenamento do coagulante já cationizado, informação essencial para viabilizar sua produção e comercialização em escala industrial.

A ausência de dados consolidados sobre esse aspecto dificulta a definição de prazos de validade confiáveis. Este trabalho teve como objetivo avaliar, em função do tempo de vida útil do coagulante, a aplicabilidade e a eficiência do tanino vegetal extraído da casca de *Anacardium occidentale* no processo de clarificação da água.

2. Material e métodos

a. Caracterização da área e coleta das cascas

Para a realização deste estudo, foram utilizadas cinco árvores saudáveis de *Anacardium occidentale*, obtidas na Área Experimental da Unidade Acadêmica Especializada em Ciências Agrárias (UAECIA), da Escola Agrícola de Jundiaí (EAJ), pertencente à Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), no município de Macaíba, Rio Grande do Norte.

O solo da área é classificado como latossolo amarelo de textura arenosa e topografia plana (BELTRÃO et al., 1975), e o clima local corresponde a uma transição entre os tipos As e BSw, caracterizado como tropical chuvoso segundo a classificação de Köppen, com temperatura média anual de 27,1 °C, umidade relativa anual de 76% e precipitação pluviométrica variando entre 863,7 e 1.070,7 mm ao longo do ano (IDEMA, 2013).

As amostras de casca foram retiradas do fuste das árvores selecionadas, tomando-se o cuidado necessário para não causar danos letais aos indivíduos. Em seguida, as cascas coletadas foram secas em casa de vegetação, dispostas de maneira uniforme sobre as bancadas, de modo a evitar a formação de mofo e favorecer uma secagem mais homogênea e eficiente. Uma vez secas, as cascas foram moídas em forrageira e devidamente acondicionadas até o momento da extração dos taninos vegetais.

b. Extração e quantificação dos taninos

Para a obtenção do extrato tânico, foram utilizados 30 g de cascas moídas, dispostas em béqueres contendo 300 mL de água destilada, mantendo-se assim a proporção de 1:10 (peso por volume). As amostras foram então submetidas a aquecimento em banho-maria, a 70 °C, por um período de 3 horas. Decorrido esse tempo, a solução resultante foi filtrada em peneira de malha 200 mesh, e o resíduo sólido remanescente foi novamente submetido às mesmas condições de extração, de modo a garantir o melhor aproveitamento possível do material vegetal.

Os extratos líquidos obtidos nas duas etapas foram então combinados e levados à secagem em estufa, originando o extrato tânico utilizado nas etapas seguintes do trabalho. Já o teor de sólidos totais (TST), o índice de Stiasny (I) e o teor de taninos condensados (TTC) foram determinados de acordo com o método de Stiasny, descrito originalmente por Guangcheng et al. (1991) e posteriormente adaptado por Anjos et al. (2022), conforme apresentado nas Equações 1 a 3.

$$TST\ (\%) = [(M1 - M2) / M2] \times 100 \quad (1)$$

$$I\ (\%) = (M2 / M1) \times 100 \quad (2)$$

$$TTC\ (\%) = (TST \times I) / 100 \quad (3)$$

Em que, TST (%): Teor de Sólidos Totais;

M1 e M2 (g): massa inical e final, respectivamente;

I: índice de Stiasny;

TTC (%): Teor de Taninos Condensados

c. Cationização do tanino

A etapa de cationização do extrato tânico foi conduzida com base na reação de Mannich, segundo o procedimento descrito por Konrath e Fava (2006), o qual compreende três etapas principais. Na primeira, 5,4 g de cloreto de amônio e 24,4 g de formaldeído foram aquecidos a 80 °C por 2 h. Na segunda etapa, o produto obtido foi misturado a 28,0 g de uma solução aquosa de tanino a 50%, sob agitação, por 30 min. a 60 °C. Por fim, na etapa pós-reação, adicionaram-se 0,2 g de monoetanolamina, deixando a mistura reagir por mais 3 h, a uma temperatura de 50 °C.

O tanino cationizado utilizado neste estudo foi produzido em 2024 e, desde então, permaneceu armazenado em condições ambiente até o momento de cada um dos ensaios de coagulação, em que foram formados os tratamentos avaliados (0, 3, 6 e 9 meses).

d. Ensaios de coagulação (Jar-test)

As amostras de água, com turbidez inicial padronizada em 150 NTU, foram submetidas ao ensaio de Jar-test em três jarros de floculação distintos para cada intervalo de armazenamento avaliado. O protocolo experimental consistiu, primeiramente, em uma etapa de mistura rápida a 135 rpm por 2 min, seguida de um período de repouso de 5 min. Na sequência, as amostras passaram por uma etapa de mistura lenta, a 35 rpm por 10 min, ainda no próprio equipamento de Jar-test.

Encerrada essa etapa, o equipamento não foi mais acionado, e as amostras de cada jarro passaram a ser coletadas a cada 10 min, ao longo de 1 h, para leitura de turbidez e pH. Assim, os ensaios de coagulação foram realizados em quatro momentos distintos, designados como 0, 3, 6 e 9 meses em função do intervalo decorrido entre as análises, e não do tempo total de armazenamento desde a produção do tanino.

A eficiência de remoção de turbidez em cada tempo de leitura foi calculada a partir da equação de eficiência, onde é calculada a diferença da turbidez inicial padronizada, sobre a turbidez da amostra, tal resultado foi dividido pela turbidez inicial padronizada e multiplicada por cem.

3. Resultados e discussão

O Quadro 1 apresenta os valores médios de cada ciclo amostral, acompanhados do respectivo desvio padrão, de turbidez residual ao longo do tempo de sedimentação, para cada um dos intervalos de armazenamento do tanino cationizado avaliados, além da eficiência média de remoção de turbidez observada ao final dos 60 minutos de ensaio.

Quadro 1 – Turbidez residual (NTU) e eficiência de remoção em função do tempo de sedimentação e do tempo de armazenamento do tanino cationizado

Tempo (min)	0 meses	3 meses	6 meses	9 meses
0 (inicial)	150,00	150,00	150,00	150,00
10	125,20 ± 0,45	125,40 ± 5,34	123,67 ± 7,69	97,67 ± 9,66
20	37,40 ± 12,97	103,45 ± 10,95	125,01 ± 7,10	90,00 ± 4,17
30	34,33 ± 7,96	94,30 ± 11,46	109,53 ± 3,04	79,20 ± 1,36
40	32,73 ± 8,86	93,03 ± 9,69	106,83 ± 2,88	77,29 ± 1,85
50	32,50 ± 10,27	92,67 ± 12,36	97,26 ± 4,32	74,70 ± 0,97
60	27,70 ± 9,92	87,06 ± 12,26	97,03 ± 0,34	73,66 ± 0,74

Eficiência aos 60 min (%)	82,48 ± 6,10	41,12 ± 7,91	39,77 ± 4,09	52,16 ± 0,29

Na Figura 1 é apresentada a cinética de clarificação da água ao longo do tempo de sedimentação, permitindo visualizar o comportamento dos quatro intervalos de armazenamento avaliados ao longo do experimento.

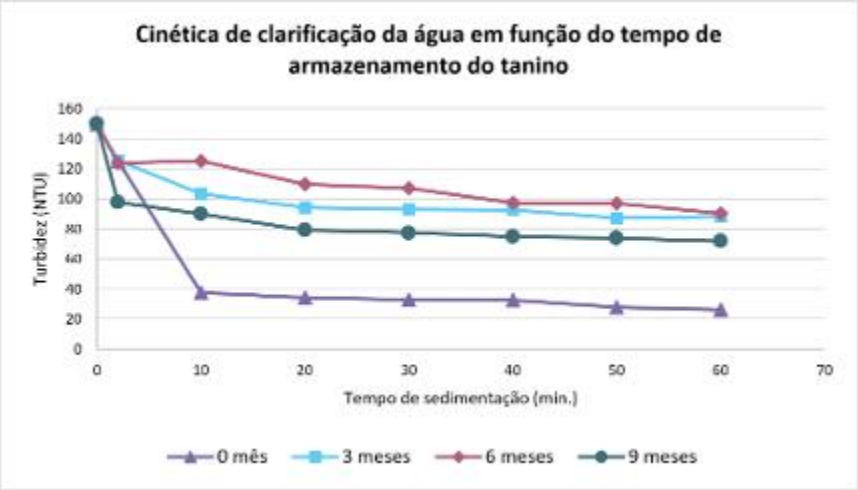


Figura 1 – Cinética de clarificação da água em função do tempo de armazenamento do tanino.

Conforme esperado, os resultados obtidos no intervalo de análise correspondente ao mês 0 apresentou o melhor desempenho. Nesse caso, a turbidez foi reduzida de 150 NTU para 27,7 ± 9,9 NTU ao final de 60 min, o que corresponde a uma eficiência média de remoção de 82,5%. Esse resultado se mostra compatível com o observado por Anjos et al. (2022) e por Nascimento et al. (2026), que obtiveram turbidez final entre 2,2 e 2,7 NTU utilizando taninos de *Anacardium occidentale* cationizados recém-preparados, ainda que em dosagens e condições de extração distintas das empregadas neste trabalho.

Após 3 e 6 meses de armazenamento, no entanto, observou-se uma queda expressiva na eficiência do coagulante, que passou a 41,1% e 39,8%, respectivamente. Esse resultado indica que o tempo de armazenamento comprometeu de forma significativa o potencial floculante do tanino cationizado nesses dois intervalos intermediários. Segundo Silva et al., 2025 as soluções de coagulantes de base orgânica preparadas em meio aquoso perdem eficiência de clarificação (remoção de turbidez e cor) quando armazenadas por longos períodos em temperatura ambiente, devido à oxidação e alteração da estrutura dos grupos fenóis e aminas quaternárias.

Em contraste aos meses supracitados, aos 9 meses de armazenamento a eficiência apresentou variação positiva de 12,4 pontos percentuais, demostrando recuperação parcial e atingindo 52,2%, valor superior ao observado nos intervalos de 3 e 6 meses, ainda que inferior

ao registrado no primeiro intervalo de análise. Esse comportamento não linear sugere que a degradação do potencial coagulante não ocorre de maneira progressiva e constante ao longo do tempo, essa variação pode ser atribuída à dinâmica de equilíbrio conformacional e agregação de biopolímeros catiônicos em meio aquoso, considerando que polímeros de origem natural apresentam distribuição de massa molar (polidispersão) que afeta diretamente a reprodutibilidade entre lotes experimentais (BOLTO; GREGORY, 2007; TZOUPANOS; ZOUBOULIS, 2008).

De modo geral, é importante destacar que, mesmo nos intervalos de menor desempenho, o tanino de *Anacardium occidentale* manteve uma capacidade de remoção de turbidez relevante, sempre acima de 39%. Esse resultado é condizente com o que já vem sendo apontado pela literatura, que reconhece os coagulantes à base de tanino como alternativas eficazes e sustentáveis aos coagulantes químicos convencionais, com vantagens adicionais relacionadas à biodegradabilidade e à ausência de alterações significativas no pH da água tratada (FRUMENTO & ȚĂLU, 2026; MOREIRA et al., 2026).

4. Conclusões

O tempo de armazenamento compromete a aplicabilidade e a eficiência do tanino cationizado extraído da casca de *Anacardium occidentale* como coagulante natural na clarificação da água, porém de maneira não linear. A eficiência de remoção de turbidez foi máxima no intervalo de 0 meses (82,5%), caiu de forma expressiva aos 3 e 6 meses de armazenamento (41,1% e 39,8%, respectivamente) e apresentou recuperação parcial aos 9 meses, atingindo 52,2%.

Esse comportamento sugere que a perda de desempenho não decorre de um processo simples e progressivo de degradação. Ela pode estar relacionada à oxidação dos grupos fenólicos e das aminas quaternárias do coagulante ao longo do armazenamento, bem como a fenômenos de equilíbrio conformacional e agregação dos biopolímeros catiônicos em meio aquoso, influenciados pela polidispersão natural desse tipo de polímero. Ainda assim, mesmo nos intervalos de menor desempenho, o tanino manteve capacidade de remoção de turbidez relevante, sempre acima de 39%, reforçando seu potencial como alternativa eficaz e sustentável aos coagulantes químicos convencionais.

Conclui-se, portanto, que o potencial floculante do tanino cationizado de *Anacardium occidentale*, embora comprometido pelo tempo de armazenamento, se mantém relevante mesmo após 9 meses. São necessários estudos complementares para elucidar os mecanismos

responsáveis por essa variação não linear e para definir parâmetros de validade e condições de armazenamento adequados, de modo a viabilizar a aplicação prática e comercial desse floculante natural no tratamento de água.

5. Agradecimentos

À Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN) pelo suporte institucional e pela estrutura disponibilizada para o desenvolvimento desta pesquisa. Agradecemos também ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela concessão da bolsa de iniciação científica, fundamental para a realização deste trabalho. Por fim, agradecemos ao Laboratório de Produtos Florestais Não Madeireiros e a todos os colegas que nele colaboram.

6. Referências bibliográficas

A Alvim, A. T. B., Izaga, F. G. de, & Claps, R. F. (2024). Mobilidade urbana em perspectiva: Novos olhares sobre as dinâmicas da cidade contemporânea. Cadernos Metrópole, 26(60), 413–421. https://doi.org/10.1590/2236-9996.2024-6000

Anjos, B. F., Azevêdo, T. K. B., Silva, B. R. F., Braga, R. M., Pimenta, A. S., & Andrade, F. A. F. (2022). Tannins from cashew tree (Anacardium occidentale) bark as a flocculant for water clarification. Revista Ambiente & Água, 17(3). https://doi.org/10.4136/ambi-agua.2815

Anjos, B. F., Azevêdo, T. K. B., Silva, E. C. A., Nascimento, P. E. P., Paiva, K. L. B., Silva, L. C., & Pimenta, A. S. (2024). Assessment of chemically modified vegetable tannins as coagulants for water treatment. Revista Ambiente & Água, 19. https://doi.org/10.4136/ambi-agua.2985

Bello, A., Virtanen, V., Salminen, J. P., & Leiviskä, T. (2020). Aminomethylation of spruce tannins and their application as coagulants for water clarification. Separation and Purification Technology, 242, 116765. https://doi.org/10.1016/j.seppur.2020.116765

Beltrão, V. A., Freire, L. C. M., & Santos, M. F. (1975). Levantamento semidetalhado da área do Colégio Agrícola de Jundiaí – Macaíba/RN. SUDENE, Recursos de Solos.

BOLTO, B., & GREGORY, J. (2007). Organic polyelectrolytes in water treatment. Water Research, 41(11), 2301–2324. https://doi.org/10.1016/j.watres.2007.03.012

Confederação Nacional de Municípios. (2014, May 20). Estudos indicam que desmatamento interfere na qualidade da água. Portal CNM. https://cnm.org.br/comunicacao/noticias/estudos-indicam-que-desmatamento-interfere-na-qualidade-da-%c3%a1gua

Das, A. K., Islam, M. N., Faruk, M. O., Ashaduzzaman, M., & Dungani, R. (2020). Review on tannins: Extraction processes, applications and possibilities. South African Journal of Botany, 135, 58–70. https://doi.org/10.1016/j.sajb.2020.08.008

Franco, L. C. G. (2016). Comparativo dos tratamentos de água do rio doce após o rompimento da barragem da Samarco. XIII Congresso Nacional de Meio Ambiente de Poços de Caldas.

Frumento, D., & Țălu, Ș. (2026). Recent advances in the application of natural coagulants for sustainable water purification. Eng, 7(1), 38. https://doi.org/10.3390/eng7010038

Guangcheng, Z., Yunlu, L., & Yazaki, Y. (1991). Extractives yields, Stiasny values and polyflavanoid contents in barks from six Acacia species in Australia. Australian Forestry, 54(3), 154–156. https://doi.org/10.1080/00049158.1991.10674572

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. (2017). Produção da extração vegetal e da silvicultura (Vol. 31, p. 55).

IDEMA – Instituto de Desenvolvimento Econômico e Meio Ambiente do Rio Grande do Norte. (2013). Perfil do seu município: Macaíba.

Konrath, R. A., & Fava, F. J. (2006). Processo de preparação de um agente floculante à base de extrato vegetal (Patente n. BR PI 0500471-3 A).

Monteiro, J. M., Albuquerque, U. P., Araújo, E. L., & Amorim, E. L. C. (2005). Taninos: Uma abordagem da química à ecologia. Química Nova, 28(5), 892–896. https://doi.org/10.1590/S0100-40422005000500029

Moreira, I. S., Tomasi, I. T., Boaventura, R. A. R., Botelho, C. M. S., & Ferreira, R. M. (2026). Natural coagulants as sustainable alternatives for wastewater treatment: A review. Sustainability, 18(14), 7130. https://doi.org/10.3390/su18147130

Nascimento, P. E. P., Azevedo, T. K. B. de, Paiva, K. L. B. de, Souza, D. S. de, Nunes, F. H. F. M., Costa, E. de L. M. da, Silva, E. C. A. da, Pimenta, A. S., Miranda, N. de O., & Meza Filho, J. G. U. (2026). Improving the extraction of Anacardium occidentale bark tannins by alkaline and sulphitation processes and their efficiency in coagulation: Chemical

characterization by HPLC. Ambiente E Agua - an Interdisciplinary Journal of Applied Science, 21(Vol. 21 (2026)), 1–21. https://doi.org/10.4136/ambi-agua.3145

Silva, L. C. da, Nascimento, P. E. P. do, Paiva, K. L. B. de, Souza, D. S. de, Pimenta, A. S., Ucella-Filho, J. G. M., & Azevedo, T. K. B. de. (2025). Quantification and FTIR-based chemical characterization of condensed tannins extracted from the bark of tropical tree species. Revista Árvore, 49(1), e4917. https://doi.org/10.53661/1806-9088202549263864

TANAC. (2013). Construindo o futuro todos os dias. TANAC.

Vijayaraghavan, G., Sivakumar, T., & Kumar, V. (2011). Application of plant based coagulants for waste water treatment. International Journal of Advanced Engineering Research and Studies, 1, 88–92.

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Aplicação de extratos obtidos de resíduos madeireiros para pigmentação de madeiras claras

Fernanda Dalfiôr Maffioletti[1]; Michelly Casagrande Stragliotto[1]; Jéssica Sabrina da Silva Ferreira[1]; Jaíne Beatriz Sousa da Silva[1]; Thiago Augusto de Sousa Moreira[1]; Fernando Wallase Carvalho Andrade[1]; Antonio Henrique Cordeiro Ramalho[1]; Victor Hugo Pereira Moutinho[2]

[1] Universidade Federal do Oeste do Pará - UFOPA

Resumo: A utilização de pigmentos naturais obtidos de resíduos madeireiros representa uma alternativa sustentável para a modificação da cor de madeiras claras, agregando valor à biomassa residual e reduzindo o uso de produtos sintéticos. Nesse contexto, este trabalho teve como objetivo avaliar o potencial de extratos naturais obtidos de resíduos de jacarandá (*Dalbergia* sp.), maçaranduba (*Manilkara* sp.) e andiroba (*Carapa guianensis*) para a modificação da cor da madeira clara de molongó (*Pseudobombax munguba*). Os extratos foram obtidos por maceração alcoólica, concentrados e aplicados na madeira por imersão. Posteriormente, foram realizadas análises de composição química, colorimetria e ensaios de lixiviação e volatilização para avaliar a permanência dos compostos impregnados. Os resultados demonstraram diferenças entre as espécies quanto ao teor de extrativos, porém sem influência significativa na alteração colorimétrica promovida pelos tratamentos. Todos os extratos proporcionaram redução da luminosidade da madeira e alterações cromáticas classificadas como muito expressivas, além de apresentarem comportamento semelhante quanto à permanência dos compostos após os ensaios de lixiviação e volatilização. Conclui-se que os extratos naturais obtidos de resíduos de madeiras amazônicas apresentam potencial para a modificação da cor da madeira clara de molongó, constituindo uma alternativa promissora para o aproveitamento de resíduos florestais e para o desenvolvimento de produtos de maior valor agregado no contexto da bioeconomia.

Palavras-chave: Extrativos; Pigmentos naturais; Coloração da madeira.

Application of Extracts Obtained from Wood Residues for the Pigmentation of Light-Colored Woods

Abstract: The use of natural pigments obtained from wood residues represents a sustainable alternative for modifying the color of light-colored woods, adding value to residual biomass while reducing the use of synthetic products. In this context, this study aimed to evaluate the potential of natural extracts obtained from residues of jacarandá (*Dalbergia* sp.), maçaranduba (*Manilkara* sp.), and andiroba (*Carapa guianensis*) to modify the color of light-colored molongó wood (*Pseudobombax munguba*). The extracts were obtained by alcoholic maceration, concentrated, and applied to the wood by immersion. Subsequently, chemical composition, colorimetric analyses, and leaching and volatilization tests were performed to evaluate the retention of the impregnated compounds. The results showed differences among species regarding extractive content, although these differences did not significantly influence the color changes promoted by the treatments. All extracts reduced wood lightness and produced color changes classified as very expressive, while exhibiting similar behavior regarding compound

retention after the leaching and volatilization tests. It can be concluded that natural extracts obtained from Amazonian wood residues have potential for modifying the color of light-colored molongó wood, representing a promising alternative for the valorization of forest residues and the development of higher value-added products within the context of the bioeconomy.

Keywords: Extractives; Natural pigments; Wood coloration

1. Introdução

Os extrativos naturais presentes em madeiras tropicais desempenham papel fundamental na determinação da coloração e da durabilidade natural da madeira, reunindo compostos como fenólicos, quinonas, limonoides e outros metabólitos secundários associados à proteção contra radiação ultravioleta, umidade e organismos xilófagos (Kirker *et al*., 2024; do Nascimento *et al*., 2025). Além de conferirem características estéticas valorizadas, esses compostos apresentam potencial para aplicação tecnológica como pigmentos naturais e modificadores das propriedades superficiais da madeira.

Grande parte desses compostos permanece presente nos resíduos gerados durante o processamento da madeira, os quais são frequentemente subutilizados. A obtenção de extratos naturais a partir desses resíduos representa uma alternativa sustentável para o aproveitamento da biomassa residual, reduzindo a dependência de pigmentos sintéticos e agregando valor a subprodutos da indústria madeireira, em consonância com os princípios da bioeconomia e da economia circular.

Estudos recentes demonstram que extratos naturais podem modificar a coloração da madeira e contribuir para a proteção superficial do material (Anish *et al.*, 2023; Gao *et al*., 2024; Wang *et al*., 2024). Além da modificação da cor, a incorporação desses extratos em madeiras claras pode representar uma estratégia promissora para introduzir compostos bioativos naturalmente associados à durabilidade de madeiras tropicais. Entretanto, ainda são escassas as investigações sobre a utilização de extratos obtidos de resíduos de madeiras amazônicas para a modificação da cor de madeiras claras e a permanência desses compostos após a aplicação. Assim, este trabalho teve como objetivo avaliar o potencial de extratos naturais obtidos de resíduos de jacarandá (*Dalbergia* sp.), maçaranduba (*Manilkara* sp.) e andiroba (*Carapa guianensis*) para a modificação da cor da madeira clara de molongó (*Pseudobombax munguba*).

2. Material e métodos

Os resíduos madeireiros utilizados para a obtenção dos extratos naturais empregados neste estudo foram provenientes do aplainamento de amostras de maçaranduba (*Manilkara* sp.),

andiroba (*Carapa guianensis*) e jacarandá (*Dalbergia* sp.), gerados durante as atividades de preparação e manutenção do acervo da Xiloteca da Universidade Federal do Oeste do Pará (UFOPA).

A serragem foi submetida à extração em etanol, na concentração de 0,4 kg L^{-1}, por 48 h, seguida de filtração em filtro de papel e concentração em evaporador rotativo até 4% de sólidos (m/m). As soluções concentradas foram armazenadas em recipientes de vidro âmbar, e mantidas sob refrigeração até o momento da aplicação nas amostras de madeira.

Os extratos obtidos foram aplicados em corpos de prova de madeira de molongó (*Pseudobombax munguba*) por imersão a frio, visando retenção entre 50 e 70 kg m^{-3}. A retenção de solução foi estimada por diferença de massa entre os corpos de prova antes e após a imersão, conforme o procedimento descrito por Sousa (2016). A estabilidade dos tratamentos foi avaliada por ensaios de volatilização e lixiviação adaptados da AWPA E10-16 (2016).

Para o ensaio de volatilização, os corpos de prova tratados foram imersos em água destilada por 2 horas e, em seguida, submetidos à secagem em estufa de circulação forçada a 50 ± 2 °C por 336 horas. Esse procedimento simula condições de aquecimento e perda de componentes voláteis decorrentes da exposição solar e térmica.

A lixiviação foi determinada imergindo-se as amostras em água destilada, com renovação diária por 14 dias consecutivos. O ensaio permitiu avaliar o desprendimento de pigmentos e a estabilidade da coloração. Ao final, os corpos de prova foram secos em estufa até massa constante.

A caracterização química dos resíduos obtidos de maçaranduba, andiroba e jacarandá foi realizada de acordo com procedimentos padronizados pela *American Society for Testing and Materials* (ASTM), com o objetivo de quantificar componentes estruturais relevantes para a pigmentação. Inicialmente, as amostras foram secas em estufa a 103 ± 2 °C até massa constante, moídas e classificadas, sendo utilizada a fração entre 40 e 60 mesh. O teor de extrativos totais foi determinado conforme a ASTM D1105, por extração sequencial em aparelho Soxhlet utilizando etanol-tolueno e etanol absoluto. A lignina insolúvel foi determinada conforme a ASTM D1106, mediante hidrólise das amostras com ácido sulfúrico a 72%, seguida de filtração, secagem e determinação gravimétrica do resíduo insolúvel. O teor de holocelulose foi estimado por diferença, considerando a massa remanescente após a remoção da lignina, correspondendo à soma das frações de celulose e hemiceluloses.

A análise colorimétrica foi realizada via processamento digital de imagens capturadas por smartphone sob condições controladas (distância de 25 cm, iluminante padrão 5500 K),

utilizando o espaço de cor L*, a* e b* no software Inkscape. Cada amostra foi fotografada três vezes, sendo utilizada a imagem de melhor nitidez e uniformidade luminosa. As imagens foram então importadas para o Inkscape. Utilizou-se a ferramenta de seleção de cor para identificar regiões homogêneas da superfície da madeira. Para cada amostra, foram realizadas três medições independentes, em pontos distintos, e os valores de L*, a* e b*. A média dessas três leituras foi adotada como valor representativo da cor da amostra. A variação total da cor (ΔE) antes e após os tratamentos foi calculada pela Equação 1, utilizando os valores de L*, a* e b*:

$$\Delta E^{¿} = \sqrt{(\Delta L^{¿})^2 + (\Delta a^{¿})^2 + (\Delta b^{¿})^2}$$

Em que: L* é a claridade; a* a coordenada cromática do eixo verde-vermelho; e b* a coordenada cromática do eixo azul-amarelo.

As variações das cores das madeiras após os tratamentos, intemperismo e ataque de fungos foram classificadas pela proposição de Hikita, Toyoda e Azuma (2001) realizada com base em níveis de percepção visual (Tabela 1).

Tabela 1 – Classificação da variação total da cor (ΔE) da madeira

Parâmetros	Variação total da cor (ΔE)
Desprezível	0,0 – 0,5
Quase imperceptível	0,5 – 1,5
Ligeiramente perceptível	1,5 – 3,0
Notável	3,0 – 6,0
Muito expressiva	6,0 – 12,0

Fonte: Hikita, Toyoda, Azuma (2001).

3. Resultados e discussão

Os extratos naturais apresentaram comportamento semelhante quanto à lixiviação, diferindo apenas da madeira sem tratamento (Tabela 2). Esse resultado indica que, embora provenientes de espécies distintas, os compostos pigmentantes apresentaram permanência semelhante após a impregnação na madeira de molongó. Para a volatilização, não foram observadas diferenças entre os tratamentos, indicando que esse mecanismo teve baixa contribuição para a remoção dos extrativos.

Tabela 2 – Volatilização e lixiviação das soluções impregnadas na madeira de molongó.

Soluções	Lixiviação (%)	Volatilização (%)
Extrato de Jacarandá	1,97a	1,92a
Extrato de Maçaranduba	2,53a	2,21a
Extrato de Andiroba	1,91a	1,67a

Sem tratamento	0,29b	1,17a

Médias seguidas por uma mesma letra, na coluna, não diferem (Tukey, p > 0,05).

A maior lixiviação observada nas amostras tratadas indica que parte dos compostos incorporados pelos extratos permaneceu suscetível à remoção pela água. Esse comportamento pode ser atribuído à presença de compostos fenólicos, quinonas e outros metabólitos secundários responsáveis pela coloração da madeira, os quais apresentam diferentes graus de solubilidade em água (Mendoza; Borges, 2013).

A ausência de diferenças entre os extratos sugere que as variações na composição química entre maçaranduba, andiroba e jacarandá exerceram pouca influência sobre a permanência dos compostos pigmentantes após a impregnação. Como todos os tratamentos foram aplicados na madeira de molongó, esse comportamento indica que o substrato respondeu de forma semelhante à incorporação dos diferentes extratos. Segundo Nicholas e Siau (1973) e Siau (1995), propriedades da madeira, como permeabilidade, porosidade e composição química, influenciam a absorção e a retenção de soluções impregnantes.

Apesar da remoção por lixiviação, os percentuais observados foram baixos, indicando que grande parte dos compostos permaneceu associada à madeira após o ensaio. Esse comportamento sugere que os extrativos estabeleceram interações suficientemente estáveis com a matriz lignocelulósica para reduzir sua remoção. A permanência desses compostos está relacionada às suas propriedades físico-químicas e à capacidade de formar interações estáveis com os constituintes da parede celular (Domingos, 2020).

A ausência de diferenças na volatilização demonstra que os compostos pigmentantes apresentaram estabilidade frente ao aquecimento empregado, indicando que a água foi o principal agente responsável pela remoção dos extrativos. Além disso, a volatilização observada na madeira sem tratamento sugere que parte dos compostos liberados é proveniente dos constituintes naturais da própria madeira.

A composição química diferiu entre as espécies quanto aos teores de extrativos e holocelulose, enquanto não foram observadas diferenças significativas para o teor de lignina (Tabela 3). O maior teor de extrativos observado na andiroba evidência maior disponibilidade de compostos não estruturais passíveis de extração, reforçando seu potencial como fonte de extratos naturais. Além de serem os principais responsáveis pela coloração da madeira, esses compostos incluem metabólitos secundários, como limonoides e compostos fenólicos, amplamente associados à durabilidade natural e à resistência contra fungos e insetos (Hillis, 1987; Firmino *et al*., 2019; Medeiros *et al*., 2021).

Tabela 3 - Teor de extrativos, lignina e holocelulose dos resíduos.

Espécie	Extrativos (%)	Lignina (%)	Holocelulose (%)
Jacarandá	8,18 ± 0,57 b	27,51 ± 1,08 a	64,31 ± 0,58 a
Andiroba	17,66 ± 0,95 a	28,18 ± 2,38 a	54,16 ± 3,25 b
Maçaranduba	3,28 ± 0,07 c	29,60 ± 3,30 a	67,12 ± 3,24 a

Em contraste, a maçaranduba apresentou o menor teor de extrativos, diferindo das demais espécies. Esse resultado foi inferior ao reportado por Nobre *et al*. (2014) para a mesma espécie, podendo estar relacionado à idade da madeira, à posição da amostragem na árvore ou às condições edafoclimáticas do local de coleta. As diferenças observadas demonstram que a disponibilidade de compostos passíveis de extração varia entre as espécies, aspecto relevante para a obtenção de extratos naturais destinados à pigmentação e à proteção da madeira.

O teor de extrativos pode estar relacionado ao potencial de pigmentação, uma vez que essa fração da madeira concentra diferentes compostos cromóforos, como fenólicos, quinonas e outros metabólitos secundários responsáveis pela coloração natural do material. Assim, em princípio, madeiras com maior percentual de extrativos podem apresentar maior disponibilidade de compostos passíveis de extração e utilização como pigmentos naturais.

Estudos demonstram que a impregnação de extrativos provenientes de madeiras duráveis pode promover alterações na coloração e aumentar a resistência ao apodrecimento e ao ataque de insetos em madeiras menos duráveis (Santana e Okino, 2007; Cetera *et al*., 2024; Kirker *et al*., 2024). Assim, espécies com maior disponibilidade de extrativos representam fontes promissoras para a obtenção de compostos naturais com potencial de aplicação tecnológica. Além disso, a utilização desses compostos obtidos a partir de resíduos do beneficiamento de madeiras agrega valor a um material frequentemente subutilizado, contribuindo para estratégias de aproveitamento integral da biomassa e fortalecimento da bioeconomia.

Embora os teores de lignina não tenham diferido entre as espécies, os valores obtidos permaneceram dentro da faixa normalmente reportada para madeiras folhosas (Fengel; Wegener, 1989), indicando composição estrutural semelhante entre elas. Em relação à holocelulose, a andiroba apresentou teor inferior às demais espécies, comportamento esperado em função da maior proporção de extrativos, uma vez que esses constituintes representam frações complementares da composição química da madeira.

A aplicação dos extratos naturais promoveu alteração significativa na coloração da madeira de molongó, evidenciada pela redução da luminosidade e pelo aumento das

coordenadas cromáticas, resultando em uma tonalidade mais escura, quente e visualmente mais intensa (Tabela 4). Essas alterações foram facilmente perceptíveis nas amostras tratadas (Figura 5), confirmando a eficiência dos extratos naturais na modificação da aparência da madeira.

Tabela 4 – Colorimetria da madeira antes e após a pigmentação com os extratos vegetais.

Soluções	Antes da pigmentação			Depois da pigmentação			Variação da cor Δ*E**	Classificação
	L*	a*	b*	L*	a*	b*		
Jacarandá	78,90	-2,98	19,80	67,87	5,60	34,08	20,54 a	Muito expressiva
Maçaranduba	78,24	-2,71	20,16	72,08	4,62	30,09	14,54 a	Muito expressiva
Andiroba	80,47	-2,76	19,8	74,64	1,41	31,99	14,24 a	Muito expressiva

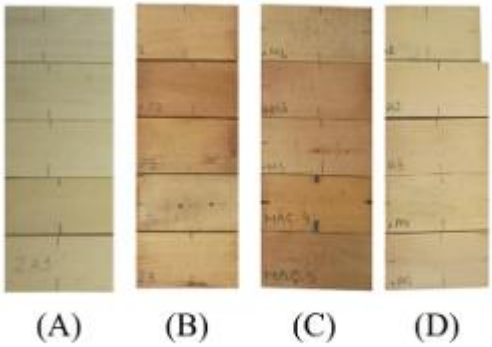


Figura 5 – Coloração das madeiras, em que (A) é a madeira de molongó sem a pigmentação, (B) a madeira de molongó com a pigmentação do extrato de jacarandá, (C) com a pigmentação do extrato de maçaranduba e (D) com a pigmentação do extrato de andiroba.

Embora a composição química tenha demonstrado diferenças significativas no teor de extrativos entre as espécies, essas diferenças não se refletiram na intensidade da pigmentação, uma vez que não houve diferença estatística para a variação total da cor (ΔE*). Esse resultado indica que a eficiência da pigmentação não depende exclusivamente da quantidade de extrativos disponível para extração, mas também da composição química dos compostos cromóforos presentes em cada espécie e de sua interação com a madeira receptora.

Os elevados valores de ΔE*, classificados como de alteração cromática muito expressiva, demonstram que a pigmentação foi facilmente perceptível a olho nu, corroborando o aspecto visual observado na Figura 5. A ausência de diferenças estatísticas entre os extratos evidencia que resíduos provenientes de diferentes espécies amazônicas apresentam comportamento semelhante quanto à capacidade de modificar a cor da madeira de molongó.

Embora a andiroba tenha apresentado o maior teor de extrativos, seu desempenho colorimétrico foi estatisticamente semelhante ao dos demais tratamentos. Esse comportamento

reforça que a concentração de extrativos, isoladamente, não determina a intensidade da pigmentação. Entretanto, a elevada disponibilidade desses compostos permanece relevante, pois os extrativos da andiroba são ricos em limonoides, compostos fenólicos e outros metabólitos secundários associados à elevada durabilidade natural da madeira e à resistência contra fungos e insetos (Firmino et al., 2019; Medeiros et al., 2021). Dessa forma, além do potencial como agente pigmentante, esses extratos apresentam perspectivas de aplicação como modificadores naturais capazes de agregar propriedades estéticas e funcionais à madeira tratada.

A alteração da coloração observada está associada à incorporação de compostos cromóforos presentes nos extrativos vegetais, como compostos fenólicos, quinonas e outras substâncias responsáveis pela coloração natural da madeira (Carneiro; Zanoni, 2016). Esses compostos apresentam potencial para aplicação como corantes naturais e, quando obtidos a partir de resíduos do processamento da madeira, representam uma alternativa sustentável para agregação de valor à biomassa residual.

De forma integrada, os resultados de composição química, colorimetria e dos ensaios de lixiviação e volatilização demonstram que resíduos de diferentes espécies amazônicas constituem fontes promissoras de pigmentos naturais para modificação da cor da madeira. Embora apresentem diferenças na concentração de extrativos, todos os materiais promoveram alterações cromáticas muito expressivas e comportamento semelhante quanto à permanência na madeira, evidenciando o potencial de aproveitamento desses resíduos em aplicações de maior valor agregado e contribuindo para estratégias de valorização de resíduos e fortalecimento da bioeconomia.

4. Conclusões

Os extratos naturais obtidos de resíduos de jacarandá (*Dalbergia* sp.), maçaranduba (*Manilkara* sp.) e andiroba (*Carapa guianensis*) apresentam potencial para a modificação da cor da madeira clara de molongó (*Pseudobombax munguba*), constituindo uma alternativa sustentável para a pigmentação de madeiras claras. Além de agregar valor a resíduos do processamento madeireiro, sua utilização contribui para o desenvolvimento de produtos de maior valor agregado e para o fortalecimento da bioeconomia amazônica.

Entre os extratos avaliados, o jacarandá apresentou numericamente a maior alteração da coloração da madeira, com ΔE de 20,54, embora não tenha diferido estatisticamente dos

extratos de maçaranduba e andiroba. Todos os extratos foram utilizados na concentração de 4% de sólidos (m/m), permitindo a comparação dos tratamentos sob a mesma condição de aplicação

5. Agradecimentos

Os autores agradecem à Financiadora de Estudos e Projetos (FINEP), por meio do projeto XILOREC (Edital Recuperação e Preservação de Acervos 2024), à Empresa Brasileira de Pesquisa e Inovação Industrial (EMBRAPII) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pela concessão de bolsa de Produtividade em Pesquisa, pelo apoio financeiro ao desenvolvimento desta pesquisa. O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

6. Referências bibliográficas

American Wood Protection Association. (2016). *AWPA E10-16: Laboratory method for evaluating the decay resistance of wood-based materials against pure Basidiomycete cultures: Soil/block test*

Anish, M. C., Giridhar, B. N., Nair, S., Anantha, N. S., & Pandey, K. K. (2023). Influences of extractives and thermal modification on the UV resistance of Albizia lebbeck *wood.* Wood Material Science & Engineering, 18, 540–548. https://doi.org/10.1080/17480272.2022.2053586

ASTM International. (2013). *ASTM D1106-96: Standard test method for acid-insoluble lignin in wood.*

Carneiro, P. A., & Zanoni, M. V. B. (2016). Corantes têxteis. In M. V. B. Zanoni & H. Yamanaka (Orgs.), Corantes: Caracterização química, toxicológica, métodos de detecção e tratamento (pp. 13–36). UNESP.

Cetera, P., Gindl-Altmutter, W., D'Auria, M., Turkulin, H., & Todaro, L. (2024). Native and TMT chestnut extractives as hydrophobic agents and color modifiers for poplar and spruce wood. Forests, *15*(8), 1358. https://doi.org/10.3390/f15081358

Domingos, D. M. (2020). Toxicidade das cinzas volantes geradas pela utilização de madeira tratada com arseniato de cobre cromatado (CCA) como material combustível [Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina].

Fengel, D., & Wegener, G. (1989*).* Wood: Chemistry, ultrastructure, reactions. Walter de Gruyter.

Firmino, A. V., Vidaurre, G. B., Oliveira, J. T. S., Guedes, M., Almeida, M. N. F., Silva, J. G. M., Latorraca, J. V. F., & Zanuncio, J. C. (2019). Wood properties of *Carapa guianensis* from floodplain and upland forests in Eastern Amazonia, Brazil. Scientific Reports, *9*(1), 10587. https://doi.org/10.1038/s41598-019-46943-w

Gao, C., Cui, X., & Matsumura, J. (2024). Multidimensional exploration of wood extractives: A review of compositional analysis, decay resistance, light stability, and staining applications. *Forests*, *15*(10), 1782. https://doi.org/10.3390/f15101782

Hikita, Y., Toyoda, T., & Azuma, M. (2001). Weathering testing of timber: Discoloration. In Y. Imamura (Ed.), High performance utilization of wood for outdoor uses. Press-Net.

Hillis, W. E. (1987*).* Heartwood and tree exudates. Springer-Verlag.

Kirker, G. T., Hassan, B., Mankowski, M. E., & Eller, F. J. (2024). Critical review on the use of extractives of naturally durable woods as natural wood protectants. Molecules, *29*(1), 69. https://doi.org/10.3390/molecules29010069

Medeiros, D. T., Melo, R. R., Cademartori, P. H. G., Batista, F. G., & Mascarenhas, A. R. P. (2021). Caracterização da madeira de espécies da Amazônia. Madera y Bosques, *27*(2). https://doi.org/10.21829/myb.2021.2722285

Mendoza, Z. M. S. H., & Borges, P. H. M. (2013). Estudo fitoquímico da folha de teca. In Anais do I Congresso Brasileiro de Ciência e Tecnologia e III Simpósio de Ciência e Tecnologia da Madeira do Rio de Janeiro (pp. 98–101). UFRRJ.

Nascimento, C. S. do, Araújo, R. D. de, Lima, M. da P., Nascimento, C. C. do, Jesus, M. A. de, Oliveira, M. C. R. de, & Higuchi, N. (2025). A chemical survey of Amazonian rainforest species: Characterization of wood extractives. Journal of Sustainable Forestry, 1–19.

Nicholas, D. D., & Siau, J. F. (1973). Factors influencing the treatability of wood. In D. D. Nicholas (Ed.), Wood deterioration and its prevention by preservative treatments (pp. 299–343). Syracuse University Press.

Nobre, J. R. C., Napoli, A., Bianchi, M. L., Trugilho, P. F., & Urbinati, C. V. (2014). Caracterização elementar, química e energética de resíduos de *Manilkara huberi* (maçaranduba) do estado do Pará. In Anais do XIV Encontro Brasileiro em Madeiras e em Estruturas de Madeira. EBRAMEM.

Santana, M. A. E., & Okino, E. Y. A. (2007). Chemical composition of 36 Brazilian Amazon forest wood species. Holzforschung, *61*(5), 469–477. https://doi.org/10.1515/HF.2007.084

Siau, J. F. (1995). Wood: Influence of moisture on physical properties. Polytechnic Institute, Department of Wood Science and Forest Products.

Sousa, S. F. (2016). Eficiência dos óleos de andiroba, copaíba e pinhão manso na melhoria da resistência da madeira de *Pinus elliottii* a organismos xilófagos [Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Espírito Santo].

Wang, F., Morsali, M., Rižikovs, J., Pylypchuk, I., Mathew, A. P., & **Sipponen, M. H.** (2024). Fully bio-based water-resistant wood coatings derived from tree bark. *Materials Horizons*, *11*(24), 6504–6515. https://doi.org/10.1039/d4mh01010h

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Aplicação de hidróxido de magnésio na otimização do estágio (EP) de branqueamento de polpa celulósica

Luana Capuchi de Paula Nascimento[1]; Walaston Martins Souza[2]; Luciana Cerqueira Souza Solimani[2]; Diana Catalina Cubides Roman[2]; Sabrina Mayer de Almeida[1]; Larisse Aparecida Ribas Batalha[1]; Fernando José Borges Gomes[1]; Roberto Carlos Costa Lelis[1]

[1] Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro – Brasil
[2] Celulose Nipo Brasileira (CENIBRA) – Brasil

Resumo: Na indústria de celulose e papel, o estágio de peroxidação é realizado em meio alcalino, no qual o peróxido de hidrogênio (H_2O_2) atua na oxidação de estruturas cromóforas, promovendo o branqueamento da polpa. Entretanto, sua decomposição pode ser catalisada por metais de transição, principalmente ferro, cobre e manganês, reduzindo a eficiência do processo. Neste contexto, este estudo avaliou o uso de hidróxido de magnésio ($Mg(OH)_2$) como agente estabilizante, substituindo parcialmente o hidróxido de sódio (NaOH) no estágio de extração alcalina com peroxidação (EP). Para simular as condições industriais, utilizou-se polpa proveniente do estágio D_{hot}, submetida à sequência de branqueamento (EP)–D_1–P. Os resultados demonstraram que a adição de $Mg(OH)_2$ melhorou a branqueabilidade da polpa, reduziu o consumo de ClO_2 nas etapas subsequentes e aumentou a viscosidade da polpa. Esses resultados indicam que o hidróxido de magnésio constitui uma alternativa promissora para otimizar o processo de branqueamento, promovendo maior eficiência química e preservação das cadeias de celulose.

Palavras-chave: Celulose; Peróxido de hidrogênio; Metais de transição

Magnesium hydroxide application in the (EP) cellulosic pulp bleaching stage optimization

Abstract: In the pulp and paper industry, the peroxide reinforcement stage is carried out under alkaline conditions, where hydrogen peroxide (H_2O_2) reacts with lignin to promote pulp bleaching. However, its decomposition can be catalyzed by transition metals, mainly iron, copper, and manganese, reducing the efficiency of the process. In this context, this study evaluated the use of magnesium hydroxide ($Mg(OH)_2$) as a stabilizing agent, partially replacing sodium hydroxide (NaOH) in the alkaline extraction stage with peroxide reinforcement (EP). To simulate industrial conditions, pulp from the D_{hot} stage was used, subjected to the bleaching sequence (EP)–D_1–P. The results showed that the addition of $Mg(OH)_2$ improved pulp bleachability, reduced ClO_2 consumption in subsequent stages, and increased pulp viscosity. These results indicate that magnesium hydroxide constitutes a promising alternative for optimizing the bleaching process, promoting greater chemical efficiency and preservation of fiber quality.

Keywords: Cellulose; Hydrogen peroxide; Transition metal.

1. Introdução

A indústria de celulose e papel possui uma posição relevante em relação à economia mundial, enquanto busca reduzir os impactos ambientais e enfrentar a limitação dos recursos florestais, existe uma constante busca por melhorias no processo (Bachmann, 2009). Nesse cenário, a produção de polpas químicas, como a polpa celulósica Kraft, demanda processos cada vez mais eficientes e otimizados, de modo a assegurar a qualidade das fibras e a sustentabilidade das operações industriais. Entre as etapas que compõem esse processo, o branqueamento da polpa destaca-se por sua importância, tendo como principal finalidade a remoção seletiva da lignina residual e de outros compostos cromóforos responsáveis pela coloração da polpa não branqueada (Goto et al., 2023).

O peróxido de hidrogênio (H_2O_2) é empregado de forma ampla como agente oxidante em sequências de branqueamento livre de cloro elementar (ECF) e também em sequências totalmente livres de cloro elementar (TCF) (Y. Liu et al., 2011). Sua atuação está principalmente relacionada ao aumento da alvura da polpa, por meio da oxidação das estruturas cromóforas presentes na lignina, processo conduzido pelo ânion perhidroxila (HOO^-), cuja formação é favorecida em meio alcalino (Wong et al., 2006). Diferente dos agentes de branqueamento à base de cloro, o H_2O_2 promove modificações na estrutura química da lignina sem provocar sua completa remoção da polpa, resultando na redução da coloração e, simultaneamente, contribuindo para a preservação da integridade das fibras celulósicas (Achaw & Danso-Boateng, 2021).

No entanto, a eficiência da etapa de peroxidação pode ser comprometida pela presença de metais de transição na polpa. Esses metais podem ter origem na própria matéria-prima ou ser introduzidos por meio de reagentes do processo e da água (Colodette & Gomes, 2015), e sabe-se que catalisam a decomposição do H_2O_2, reduzindo seu potencial oxidante e a eficiência do branqueamento.

Como alternativa promissora, o hidróxido de magnésio ($Mg(OH)_2$) tem ganhado cada vez mais atenção na etapa de extração alcalina com peróxidação. Ele contribui para a inativação de metais de transição, seja por meio da adsorção desses metais em sua superfície, seja pela formação de complexos que suprimem sua atividade catalítica (Ning et al., 2019), estabilizando assim o H_2O_2 e melhorando a seletividade do branqueamento. Outro ponto é que a adição do $Mg(OH)_2$ na etapa de (EP) tem sido associada a diversos benefícios técnicos e ambientais. Do

ponto de vista da qualidade da fibra, ele atua como protetor de carboidratos, produzindo polpas com maior viscosidade em comparação com processos à base de sódio (Liu et al., 2013).

Apesar dessas vantagens relatadas, o método ideal para incorporar $Mg(OH)_2$ nas sequências de branqueamento industrial ainda não foi caracterizado. Nesse contexto, o presente estudo teve como objetivo avaliar o uso de $Mg(OH)_2$ como substituto parcial do NaOH na etapa de extração alcalina com peroxidação (EP), bem como investigar sua capacidade de atenuar os efeitos catalíticos dos íons metálicos na decomposição do peróxido.

2. Material e métodos

Incialmente foi feita a caracterização da polpa celulósica industrial do estágio D_{hot}, na qual foi utilizada nos experimentos, em termos de número kappa (TAPPI 236 om-85, 2022), alvura (TAPPI 452 om-08, 2023a), ácido hexenurônico (TAPPI 282 pm-07, 2023b), viscosidade (TAPPI 230 om-08, 2023c) e análise de metais (SCAN-CM 63-05). As polpas branqueadas produzidas nos experimentos foram caracterizadas igualmente. Para o teste de reversão de alvura, as amostras foram submetidas à reversão em uma estufa a uma temperatura de 105 ± 3 ºC por 4 horas, e a alvura foi medida posteriormente.

O processo de branqueamento seguiu a partir do estágio (EP) mantendo os parâmetros apresentados na Tabela 1. Os testes envolvendo o uso de hidróxido de magnésio na etapa (EP) foram realizados por meio de duas abordagens diferentes: (i) substituição parcial do hidróxido de sódio pelo hidróxido de magnésio, utilizando porcentagem, sendo substituído 10, 20 e 30%, e (ii) substituição parcial do hidróxido de sódio utilizando a relação entre o teor de manganês na polpa, utilizando relações de Mg/Mn de 30 (2,3%), 50 (3,8%) e 100 (7,7%).

A substituição do NaOH pelo $Mg(OH)_2$ foi realizada com base em um fator de conversão de 0,729, determinado a partir da relação de equivalência molar entre os dois compostos. Esse fator foi aplicado para garantir que as cargas alcalinas nos diferentes tratamentos fossem expressas em uma base comparável, permitindo uma avaliação sistemática do efeito da dosagem de $Mg(OH)_2$ no desempenho da etapa de peroxidação.

Tabela 1 – Parâmetros dos estágios de branqueamento

Estágio	**(EP)**	**D_1**	**P**
Consistência, %	10	10	10
Tempo, min.	111	111	120
Temperatura, °C	80	80	80
pH	10,5	5,5	10,5
ClO_2, kg/adt	-	(a)	-
H_2O_2, kg/adt	3,0	-	3,0

(a) – carga definida para alvura de 90% ISO

3. Resultados e discussão

Inicialmente, para que fossem feitos os cálculos das cargas de $Mg(OH)_2$ para o teste de substituição através da relação Mg/Mn necessitava-se do teor do íon manganês presente na polpa que seria utilizada nos testes, sendo este no valor 2,32 ppm. Seguindo para os testes, os primeiros parâmetros avaliados foram o pH final do estágio (EP) e o ganho de alvura, apresentados na Figura 1. Para as substituições de até 20% (S20%), o pH manteve-se relativamente constante, variando entre 10,7 e 10,9, indicando a manutenção da alcalinidade necessária à ativação do peróxido. Entretanto, com 30% de substituição, verificou-se uma redução do pH para 9,8. Esse comportamento pode estar relacionado à menor capacidade tamponante do $Mg(OH)_2$, que apresenta menor solubilidade e é uma base mais fraca (Zeinaly et al., 2013). A diminuição do pH pode afetar negativamente a formação do ânion perhidroxila (HOO^-), apresentado na Equação (1), considerado a principal espécie ativa responsável pelo branqueamento com H_2O_2 [2] (Filho & Suess, 2002).

$$H_2O_2 + OH^- \rightarrow H_2O + HOO^- \quad (1)$$

Em relação ao ganho de alvura, as substituições determinadas pela relação Mg/Mn apresentaram uma tendência de estabilização a partir de S3,8% (R50), alcançando 83,61% ISO. Nos níveis mais elevados de substituição, o maior ganho de alvura obtido em S30% permaneceu abaixo dos valores registrados para menores dosagens de $Mg(OH)_2$. Esse comportamento pode estar associado à redução do pH, que influencia a cinética das reações envolvidas no branqueamento com peróxido. O incremento da alvura observado pode estar relacionado à ação estabilizadora do $Mg(OH)_2$ sobre o H_2O_2, por meio da complexação e adsorção de íons de metais de transição, como Mn^{2+}, Fe^{2+} e Cu^{2+}. Observou-se no estudo apresentado por Ning *et al.* (2019), que a presença do $Mg(OH)_2$ reduziu a decomposição catalítica do peróxido, favorecendo maior disponibilidade de H_2O_2 para as reações de branqueamento e,

consequentemente, sua eficiência no processo, o que explica o ganho de alvura observado no experimento.

Figura 1 – Relação entre pH final e alvura da polpa obtida no estágio (EP) do branqueamento, no experimento de substituição parcial de hidróxido de sódio por hidróxido de magnésio.

A viscosidade pode ser utilizada como um indicador do grau de polimerização (DP) da celulose, de modo que valores mais elevados estão associados a cadeias poliméricas que sofreram menor degradação (Susanti, 2024). Conforme apresentado na Tabela 2, todas as substituições de $Mg(OH)_2$ proporcionaram valores de viscosidade superiores aos observados para o tratamento controle, o que pode estar relacionado à atuação do $Mg(OH)_2$ como agente de proteção dos carboidratos (Kilpi, 2019). No estudo apresentado por Abe *et al.* (2022), é explicado que a inativação dos íons de metais de transição pelo hidróxido de magnésio faz com que haja uma redução da capacidade desses metais de catalisar a decomposição do peróxido de hidrogênio, evitando a formação de espécies radicalares altamente reativas, como os radicais hidroxila e superóxido, por meio de reações do tipo Fenton, que envolvem a interação entre íons metálicos no estado de oxidação II e o H_2O_2. Essas espécies radicalares apresentam baixa seletividade e podem atacar os grupos hidroxila presentes nas cadeias de celulose, promovendo sua oxidação e a formação de estruturas carbonílicas. Esse processo favorece a ruptura das ligações glicosídicas da celulose e, consequentemente, a redução do grau de polimerização e da viscosidade da polpa (Ning et al., 2019). Além disso, por apresentar menor força básica, o $Mg(OH)_2$ tende a reduzir a dissolução dos carboidratos no efluente do estágio de branqueamento (Han et al., 2015), contribuindo adicionalmente para os maiores valores de viscosidade observados nos tratamentos com substituição.

A substituição de 3,8% de NaOH por $Mg(OH)_2$ destacou-se entre as condições avaliadas por apresentar a menor demanda de dióxido de cloro no estágio D1 para atingir 90% ISO de alvura, demandando apenas 0,24 kg/adt (Tabela 2). A menor necessidade de ClO_2 para alcançar o mesmo nível de alvura indica maior eficiência do processo de branqueamento, sugerindo que a utilização de $Mg(OH)_2$ nessa proporção favoreceu as condições para a etapa subsequente. Assim, considerando o consumo de dióxido de cloro como um importante indicador da eficiência e do desempenho do processo, a substituição de 3,8% pode ser considerada a condição mais promissora entre os tratamentos avaliados.

Em relação ao número kappa (Tabela 2), os resultados de todos os experimentos de substituição foram uniformes, variando entre 1,0 e 1,1 em todas as condições. Esse resultado indica que a substituição parcial do NaOH por $Mg(OH)_2$ não prejudicou a deslignificação na etapa (EP), portanto, a eficiência da remoção da lignina foi equivalente ao controle em todas as condições testadas. No estudo conduzido por Sêco et al., (2008) também foi observado que a redução do dióxido de cloro não afetou negativamente o teor residual de lignina na polpa branqueada.

Tabela 2 – Parâmetros dos estágios de branqueamento

Experimento	**ClO_2 para alvura 90% ISO, kg/adt**	**Viscosidade, dm^3/kg**	**Kappa**
Controle	0,59	775	1,1
S2.3% (R30)	0,50	800	1,1
S3.8% (R50)	0,24	819	1,1
S7.7% (R100)	0,34	816	1,0
S10%	0,46	803	1,1
S20%	0,51	828	1,0
S30%	0,46	853	1,1

4. Conclusões

Os resultados obtidos demonstram o potencial do $Mg(OH)_2$ como substituto parcial do NaOH no estágio (EP), evidenciando sua viabilidade técnica para aplicação no processo de branqueamento. A substituição de 3,8% proporcionou um ganho de 1,62% na alvura, associado a uma redução de 59% no consumo de ClO_2 e ao aumento da viscosidade da polpa. Esses resultados indicam que a ação estabilizadora do $Mg(OH)_2$ sobre o H_2O_2 contribuiu para maior preservação das cadeias de celulose e redução da degradação oxidativa. Além disso, a eficiência de deslignificação foi mantida nas diferentes condições avaliadas, conforme demonstrado pela uniformidade dos valores de número kappa. De maneira geral, considerando o desempenho conjunto em termos de alvura, viscosidade, estabilidade do pH, eiciência do branqueamento e consumo de reagentes, a condição S3,8% (R50) apresentou o melhor equilíbrio entre os parâmetros avaliados, destacando-se como a condição mais promissora para aplicação industrial. Substituições superiores a esse nível não resultaram em melhorias adicionais consistentes no desempenho do processo.

5. Agradecimentos

O autor agradece ao suporte concedido pela Coordenação para o Aperfeiçoamento do Pessoal de Ensino Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001, pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pela Fundação Carlos Chagas Filho de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro (FAPERJ), pela Celulose Nipo Brasileira (CENIBRA) e INCT InovaLigno.

6. Referências bibliográficas

Abe, C., Miyazawa, T., & Miyazawa, T. (2022). Current Use of Fenton Reaction in Drugs and Food. Molecules, 27(17), 5451. https://doi.org/10.3390/molecules27175451

Achaw, O.-W., & Danso-Boateng, E. (2021). Chemical and Process Industries: With Examples of Industries in Ghana. Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-79139-1

Bachmann, D. L. (2009). Benchmarking Energético na Indústria de Celulose e Papel.

Colodette, J. L., & Gomes, F. J. B. (2015). Branqueamento de polpa celulósica. Editora UFV.

Filho, C. L., & Suess, H. U. (2002). HYDROGEN PEROXIDE IN CHEMICAL PULP BLEACHING -an overview-.

Goto, T., Zaccaron, S., Hettegger, H., Bischof, R. H., Fackler, K., Potthast, A., & Rosenau, T. (2023). Evaluating chelating agents and their effects on cellulosic pulps during P-stage bleaching. Part 1: Analytical method development. Cellulose, 30(6), 3887–3900. https://doi.org/10.1007/s10570-023-05110-1

Han, S., Liu, W., Wu, S., Long, Z., & Hou, Q. (2015). Investigation on the application of industrial grade MgO in the alkaline peroxide bleaching of poplar CTMP. Journal of Industrial and Engineering Chemistry, 21, 121–125. https://doi.org/10.1016/j.jiec.2014.02.013

Kilpi, O. (2019). REDUCTION OF SULFATE EMISSIONS IN BLEACHED SOFTWOOD KRAFT PULP MILL.

Liu, Y., Chen, K., Luo, K., Li, J., Mo, L., & Xu, J. (2011). Using Mg(OH)2 in peroxide bleaching of wheat straw soda-AQ pulp. BioResources, 6, 1230–1241. https://doi.org/10.15376/biores.6.2.1230-1241

Liu, Y.-L., Chen, K.-F., & Lin, B.-P. (2013). The Use of Mg(OH)2 in the Final Peroxide Bleaching Stage of Wheat Straw Pulp. BioResources, 9(1), 161–170. https://doi.org/10.15376/biores.9.1.161-170

Ning, D., Hu, Y., Fu, C., Chen, L., Huang, H., Cao, S., Ni, Y., & Huang, F. (2019). Effect of the particle size of magnesium hydroxide on the cellulose polymerization during the oxygen delignification of radiata pine kraft pulp. Cellulose, 26(11), 6571–6581. https://doi.org/10.1007/s10570-019-02569-9

Sêco, I. M. C. L., Neto, C. P., & Silvestre, A. J. D. (2008). Strategies to reduce the brightness reversion of industrial ECF bleached Eucalyptus globulus kraft pulp. Journal of Chemical Technology & Biotechnology, 83(3), 218–226. https://doi.org/10.1002/jctb.1791

Susanti, S. (2024). Influence of Kappa Number on Enhancing Pulp Brightness through Stage D0 with ClO2 Bleaching Process: Environmental Implications and Considerations. ENVIRO: Journal of Tropical Environmental Research, 25(2), 28–37. https://doi.org/10.20961/enviro.v25i2.85211

Wong, D. F., Schmidt, J. A., & Heitner, C. (2006). Magnesium-based alkalis for hydrogen peroxide bleaching of mechanical pulps. 107(12).

Zeinaly, F., Karimi, M., Shakhes, J., & Mohammadi, H. (2013). IMPROVING THE BLEACHING PROCESS OF HARDWOOD CHEMI-MECHANICAL PULP.

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Aprimoramento da eficiência da deslignificação com oxigênio por meio do reforço com peróxido de hidrogênio

Sabrina Mayer de Almeida[1]; Luana Capuchi de Paula Nascimento [1], Roberto Carlos Costa Lelis[1], Biljana M. Bujanovic[2], Ericka Redmond[3], Fernando José Borges Gomes[1]

[1] Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Instituto de Florestas. Seropédica, Rio de Janeiro, Brasil.
[2] US Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. United States of America
[3] State University of New York College of Environmental Science and Forestry. United States of America

Resumo: A deslignificação com oxigênio é amplamente utilizada, contudo sua eficiência e seletividade podem ser limitadas por reações paralelas. Este estudo propõe o reforço da deslignificação com oxigênio através da adição de peróxido de hidrogênio, vinculando o desempenho do processo à estabilidade química do agente oxidante. Experimentos utilizaram polpas com diferentes números Kappa (16 e 19) e diferentes cargas de H_2O_2 (0, 5, 20 e 35 kg/tas). A estabilidade do H_2O_2 foi investigada em função do pH na presença de íons de metais de transição. A adição de H_2O_2 intensificou a deslignificação das polpas, promovendo aumento da alvura e redução do Kappa com o incremento da carga de H_2O_2. Para o tratamento $P35_{Mg}$, os ganhos relativos de alvura foram de 96,4 e 87,4% e as reduções do Kappa atingiram 47,3 e 46,6%, para K16 e K19 respectivamente. A decomposição do H_2O_2 aumentou com a elevação do pH e foi intensificada pela presença de Mn^{2+}, Cu^{2+} e Fe^{2+}. Portanto, este estudo fornece uma base para o desenvolvimento de estratégias de intensificação da deslignificação.

Palavras-chave: polpa Kraft; estabilidade do peróxido de hidrogênio; metais de transição.

Enhancing oxygen delignification efficiency through hydrogen peroxide reinforcement

Abstract: Oxygen delignification is widely used in the production of bleached pulp, however, its efficiency and selectivity may be limited by side reactions. This study proposes the reinforcement of the oxygen delignification stage through the addition of hydrogen peroxide, relating process performance to the chemical stability of the oxidizing agent. Experiments were conducted using pulps with different Kappa numbers (16 and 19) and H_2O_2 charges of 0, 5, 20, and 35 kg/odt. H_2O_2 stability was investigated as a function of pH in the presence of transition metal ions. H_2O_2 addition intensified delignification of both pulps, increasing brightness and reducing Kappa number with increasing peroxide charge. For the $P35_{Mg}$ treatment, relative brightness gains were 96.4 and 87.4%, while Kappa reductions reached 47.3 and 46.6% for K16 and K19, respectively. H_2O_2 decomposition increased with increasing pH and was particularly intensified by the presence of Mn^{2+}, Cu^{2+}, and Fe^{2+}. Therefore, this study provides a basis for developing strategies to intensify delignification.

Keywords: Kraft pulp; hydrogen peroxide stability; transition metals.

1. Introdução

A deslignificação com oxigênio é uma etapa consolidada na indústria de celulose, contribuindo para reduzir o consumo de reagentes clorados nas sequências de branqueamento e a carga poluidora dos efluentes (Akim et al., 2001; Balkissoon et al., 2023; Doelle & Bajrami, 2018). Entretanto, sua eficiência é geralmente limitada a cerca de 50% de remoção de lignina, uma vez que maiores níveis de deslignificação comprometem a seletividade do processo e favorecem a degradação da celulose, reduzindo a viscosidade e a resistência das fibras (Akim et al., 2001; Esteves et al., 2020; Suchy & Argyropoulos, 2002).

A perda de seletividade é atribuída à formação de espécies radicais altamente reativas e não seletivas. A decomposição catalítica do peróxido produzido durante a deslignificação, acelerada por íons de metais de transição gera radicais hidroxila e ânion oxila (Bouchard et al., 2010; Huang et al., 2019; Wuorimaa & Jokela, 2006). Além disso, em níveis de pH superiores a 11,5, o radical ânion oxila pode causar até quatro vezes mais clivagem da cadeia de celulose do que o radical hidroxila (Bouchard et al., 2011).

O reforço da deslignificação com peróxido de hidrogênio (H_2O_2) tem sido proposto como uma estratégia para aumentar a eficiência do processo e a alvura da polpa (Balkissoon et al., 2023; Suchy & Argyropoulos, 2002). Contudo, seu desempenho depende da estabilidade do H_2O_2 em meio alcalino, a qual é influenciada pelo pH e pela presença de metais de transição, mesmo na presença de estabilizantes, como o sulfato de magnésio (Brown & J. Abbot., 1995; Huang et al., 2021; Sun et al., 1999).

Desta forma, compreender a estabilidade do H_2O_2 sob condições representativas do estágio de deslignificação com oxigênio é essencial para interpretar o desempenho da deslignificação reforçada com H_2O_2. Portanto, o objetivo deste trabalho é avaliar o desempenho da deslignificação com oxigênio reforçada com H_2O_2 de polpa Kraft de eucalipto e correlaciona-lo à estabilidade química do peróxido na presença de íons metálicos em diferentes faixas de pH, visando compreender a influência dessas variáveis sobre a eficiência e a seletividade do processo.

2. Material e métodos

2.1. Matéria-prima

Polpas Kraft não branqueadas com diferentes números Kappa, 16 e 19 (denominadas K16 e K19, respectivamente), foram caracterizadas quanto ao número Kappa (TAPPI T326 om-99), viscosidade (TAPPI T230 om-08), alvura (TAPPI T525 om-92), ácidos hexenurônicos (TAPPI T282 pm-07) e rendimento.

2.2. Estabilidade do peróxido de hidrogênio

A estabilidade do peróxido de hidrogênio foi avaliada em função do pH e da presença de íons metálicos. Soluções de H_2O_2 tiveram o pH ajustado para 9,0, 10,5 e 12,0, enquanto a solução original (pH 2,5) foi utilizada como Controle. Para cada condição de pH, foram preparadas soluções contendo Cu^{2+}, Mn^{2+}, Fe^{2+} ou Fe^{3+}, além de uma condição Controle sem adição de metais. A decomposição do peróxido foi determinada de acordo com procedimento padrão interno do Laboratório de Biorrefinaria Lignocelulósica da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro.

2.3. Deslignificação com oxigênio reforçada com peróxido de hidrogênio

Os experimentos foram realizados em reator pressurizado a 100 °C, durante 60 min, sob pressão total de 0,6 MPa e consistência de 10%. Foram avaliadas cargas de H_2O_2 de 0, 5, 20 e 35 kg/tas, com adição de 2 kg/tas de sulfato de magnésio ($MgSO_4$). Um tratamento controle foi realizado sem $MgSO_4$. Os tratamentos foram identificados de acordo com a carga de peróxido (P) e a presença de $MgSO_4$ (Mg). Assim, P0 corresponde ao tratamento sem H_2O_2 e sem $MgSO_4$, enquanto $P0_{Mg}$ representa o tratamento sem H_2O_2 e com $MgSO_4$. A mesma nomenclatura foi adotada para os demais tratamentos.

Tabela 1 – Condições operacionais da deslignificação com oxigênio reforçada com peróxido de polpa Kraft de eucalipto.

Parâmetro	Tratamentos				
	P0	**$P0_{Mg}$**	**$P5_{Mg}$**	**$P20_{Mg}$**	**$P35_{Mg}$**
Fator Kappa	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4
O_2, kg/tas	*	*	*	*	*
NaOH, kg/tas	*	*	*	*	*
$MgSO_4$, kg/tas	-	2.0	2.0	2.0	2.0
H_2O_2, kg/tas	-	-	5.0	20.0	35.0

*Variação de acordo com o Kappa inicial da polpa Kraft não branqueada.

3. Resultados e discussão

3.1. Estabilidade do peróxido de hidrogênio

A estabilidade do H_2O_2 foi influenciada tanto pela alcalinidade do meio quanto pelo tipo de metal presente (Figura 1). Em condições sem ajuste de pH (pH 2,5), a decomposição permaneceu relativamente baixa, indicando maior estabilidade do oxidante. Em contrapartida, a

elevação do pH aumentou significativamente a decomposição do H_2O_2, principalmente na presença de Mn^{2+}, Cu^{2+} e Fe^{2+}, enquanto o Fe^{3+} apresentou atividade catalítica inferior.

Figura 1 – Cinética da decomposição do H_2O_2 na presença de íons metálicos (Mn^{2+}, Cu^{2+}, Fe^{2+} e Fe^{3+}) em diferentes valores de pH (2,5, 9,0, 10,5 e 12,0).

A decomposição do H_2O_2 em sistemas alcalinos é controlada pela interação entre o pH e os metais de transição (Sun et al., 1999; Wuorimaa & Jokela, 2006). Em meios mais alcalinos, próximos ao pKa do H_2O_2, a maior formação do ânion per-hidroxila favorece reações catalíticas mediadas por metais, acelerando a geração de espécies radicalares responsáveis pela decomposição do H_2O_2 (Bouchard et al., 2011; van Heiningen et al., 2019; Van Lierop et al., 1994; Wuorimaa & Jokela, 2006). Por outro lado, a menor atividade observada para Fe^{3+} pode ser atribuída à formação de espécies pouco solúveis e cataliticamente menos ativas sob essas condições (Brown & J. Abbot., 1995; Zhao et al., 2018).

Os resultados demonstram que a estabilidade do peróxido diminui progressivamente com o aumento do pH e depende da natureza do metal presente na solução. Esses resultados evidenciam a importância do controle do ambiente químico durante a deslignificação com oxigênio reforçada com peróxido, servindo como base para interpretar o desempenho observado nos experimentos de deslignificação.

3.1. Deslignificação com oxigênio reforçada com peróxido de hidrogênio

A adição de H_2O_2 promoveu melhorias no desempenho do processo para ambas as polpas Kraft, refletidas pelo aumento do ganho de alvura, da eficiência de deslignificação e da seletividade livres de HexA, conforme mostra a Figura 2. Em contrapartida, a Tabela 1 mostra que o aumento da carga de H_2O_2 foi acompanhado por redução da viscosidade, indicando que a intensificação da deslignificação também aumenta a suscetibilidade à degradação dos carboidratos.

Tabela 2 – Desempenho da deslignificação com oxigênio reforçada com peróxido de polpas Kraft de eucalipto com números Kappa iniciais de 16 e 19.

Parâmetro	**Tratamentos**									
	K16-P0	**K16-$P0_{Mg}$**	**K16-$P5_{Mg}$**	**K16-$P20_{Mg}$**	**K16-$P35_{Mg}$**	**K19-P0**	**K19-$P0_{Mg}$**	**K19-$P5_{Mg}$**	**K19-$P20_{Mg}$**	**K19-$P35_{Mg}$**
pH final	11.9	11.9	11.7	11.3	10.6	11.9	12.1	11.8	11.5	10.6
Kappa final	10.9	10.4	10.1	9.0	8.5	14.7	14.2	12.4	12.2	10.3

Alvura, %ISO	45,5	45,8	48,8	60,1	65,3	41,3	41,6	46,2	54,8	64,4
Viscosidade, dm³/kg	966	1057	972	861	840	1091	1191	1109	1092	829
Rendimento, %	97.9	97.8	97.6	97.1	96.6	97.6	97.9	97.7	97.4	97.2

* Viscosidade inicial: K16 – 1152 dm³/kg e; K19 – 1229 dm³/kg; Alvura inicial: K16 – 33,2 %ISO e; K19 – 34,4 %ISO.

(a) **(b)**

(c)

Figura 1 – Efeito de tratamentos de deslignificação com oxigênio reforçada com H_2O_2 sobre (a) alvura, (b) eficiência livre de HexA e (c) seletividade livre de HexA.

O ganho de alvura aumentou com a dosagem de H_2O_2 para ambas as polpas, alcançando alvuras próximas de 65 %ISO na maior carga ($P35_{Mg}$), correspondendo a ganhos relativos de 96,4 e 87,4% para K16 e K19 respectivamente. A redução de Kappa também foi significativa, atingindo 47,3 e 46,6%. Isso evidencia que o reforço oxidativo favorece a remoção da lignina residual e o aprimoramento da qualidade óptica da polpa (İskefyeli et al., 2024; van Heiningen et al., 2019).

A eficiência de deslignificação livre de HexA também aumentou com a adição de H_2O_2, atingindo valores de 62,8 e 62,2% nos tratamentos com maior carga de H_2O_2 aplicada ($P35_{Mg}$) para ambas as polpas, K16 e K19 respectivamente. Em contrapartida, a seletividade livre de HexA apresentou redução gradativa conforme o aumento da carga de H_2O_2. Contudo, ao comparar os tratamentos Controle e $P35_{Mg}$ para ambas as polpas, observa-se que os valores obtidos foram similares, variando em torno de 2,2 a 2,8.

Além disso, o efeito estabilizador do $MgSO_4$ pode ser evidenciado pela comparação da seletividade obtida no tratamento Controle (P0) com a dos demais tratamentos. Os tratamentos contendo $MgSO_4$ apresentaram, de modo geral, maior seletividade em relação ao controle, indicando uma possível redução das reações não seletivas promovidas por íons de metais de transição. Esse comportamento corrobora a atuação do $MgSO_4$ como agente estabilizador durante o processo de branqueamento (Esteves et al., 2020; Huang et al., 2021).

Os ensaios de estabilidade do H_2O_2 mostraram que sua decomposição é intensificada na presença de metais de transição em meio alcalino, assim, a estabilização do oxidante durante a reação favorece sua utilização na oxidação seletiva da lignina, contribuindo para os maiores ganhos de eficiência observados da pré-O_2. Em conjunto, os resultados demonstram que a combinação entre H_2O_2 e $MgSO_4$ aumenta a eficiência da pré-O_2, preservando melhor a integridade da fração celulósica.

4. Conclusões

A adição de H_2O_2 promoveu aumento da alvura e da eficiência de deslignificação livre de HexA, acompanhadas da redução do número Kappa em ambas as polpas. O uso de $MgSO_4$ contribuiu para a preservação da viscosidade e, consequentemente, para seletividade do processo. Os ensaios de estabilidade do H_2O_2 reforçaram a importância do controle de sua decomposição para maximizar o uso do oxidante durante a deslignificação com oxigênio.

Estudos futuros, especialmente quanto ao consumo de reagentes, tratabilidade de efluentes no branqueamento e às demais variáveis operacionais, são necessários para contribuir com a determinação da condição de deslignificação mais adequada.

5. Agradecimentos

Os autores agradecem o financiamento da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) - Finance Code 001, Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), Fundação Carlos Chagas Filho de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro (FAPERJ) e INCT InovaLigno.

6. Referências bibliográficas

Akim, L. G., Colodette, J. L., & Argyropoulos, D. S. (2001). Factors limiting oxygen delignification of kraft pulp. Canadian Journal of Chemistry, 79(2), 201–210. https://doi.org/10.1139/cjc-79-2-201

Balkissoon, S., Andrew, J., & Sithole, B. (2023). Dissolving wood pulp production: a review. Biomass Conversion and Biorefinery, 13(18), 16607–16642. https://doi.org/10.1007/s13399-022-02442-z

Bouchard, J., Wang, J., & Berry, R. (2011). MgSO4 vs. Mg(OH)2 as a cellulose protector in oxygen delignification. Holzforschung, 65(3), 295–301. https://doi.org/10.1515/HF.2011.062

Brown, D. G., & J. Abbot. (1995). Effects of metal ions and stabilisers on peroxide decomposition during bleaching. J. Wood Chem. Technol., 15, 85–111.

Doelle, K., & Bajrami, B. (2018). Sodium Hydroxide and Calcium Hydroxide Hybrid Oxygen Bleaching with System. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 301(1). https://doi.org/10.1088/1757-899X/301/1/012136

Esteves, C. S. V. G., Brännvall, E., Östlund, S., & Sevastyanova, O. (2020). Evaluating the Potential to Modify Pulp and Paper Properties through Oxygen Delignification. ACS Omega, 5(23), 13703–13711. https://doi.org/10.1021/acsomega.0c00869

Huang, H., Hu, Y., Zhang, H., Cao, S., & Ma, X. (2021). Limitations on the protective action of MgSO4 for cellulose during kraft pulp oxygen delignification. BioResources, 16(1), 1438–1452. https://doi.org/10.15376/biores.16.1.1438-1452

İskefyeli, A., Kirci, H., Kalyoncu, E. E., & Erişir, E. (2024). Enhanced selectivity of oxygen delignification by cherry and guar gum additives. Cellulose Chemistry And Technology, 58(7–8), 747–757.

Ramos, E., Calatrava, S. F., & Jiménez. (2008). Bleaching with Hydrogen Peroxide. A Review.

Suchy, M., & Argyropoulos, D. D. S. (2002). Peer-reviewed delignification.

Sun, Y., Fenster, M., Yu, A., Berry, R. M., Argyropoulos, D. S., Sun, Y., Argyropoulos, D., Fenster, M., & Yu, A. (1999). The effect of metal ions on the reaction of hydrogen peroxide with Kraft lignin model compounds. In Can. J. Chem (Vol. 77).

van Heiningen, A., Ji, Y., & Jafari, V. (2019). 4 Recent Progress on Oxygen Delignification of Softwood Kraft Pulp 4.1 Introduction and State-of-the-Art of Commercial Oxygen Delignification. Cellulose Science and Technology.

van Heiningen, A., Krothapalli, D., Genco, J., Justason, A., Van Heiningen, A., Krothapalli, D., Genco, J., & Justason, A. (2003). A chemical reactor analysis of industrial oxygen delignification. Pulp & Paper Canada, 104(12), 96–101.

Van Lierop, B., Liebergott, N., & Faubert, M. G. (1994). Using Oxygen and Peroxide to Bleach Kraft Pulps. Journal of Pulp and Paper Science, 20.

Wuorimaa, A., & Jokela, R. (2006). Recent developments in the stabilization of hydrogen peroxide bleaching of pulps: An overview. Nordic Pulp & Paper Research Journal, 21(4), 435–443. https://doi.org/https://doi.org/10.3183/npprj-2006-21-04-p435-443

Zhao, H., Wu, H., Hu, H., Li, Y., Li, J., & Zhang, X. (2018). Decomposition of H2O2. In BioResources (Vol. 13, Number 2).

Atividade antifúngica da fração tânica de *Anadenanthera colubrina* (Vell.) Brenan frente a *Candida albicans*

Carlos Augusto Cardoso Fernandes[1]; Fernanda de Nobrega Medeiros[1]; Rafael Lucas Marassi[1]; Ana Helise Abreu Rodrigues da Silva[1]; Giovane Guimarães Farias[1]; Jessica Tavares Chaves Faria[1]; Águida Aparecida de Oliveira[1]; Natália Dias de Souza[1]

[1] Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro

Resumo: As infecções por *Candida albicans* são um desafio clínico devido à crescente resistência farmacológica. Este estudo avaliou a atividade antifúngica *in vitro* da fração tânica da casca de *Anadenanthera colubrina* (Vell.) Brenan contra *C. albicans* (ATCC 90028). A Concentração Inibitória Mínima (CIM) foi determinada pelo ensaio de microdiluição em caldo (CLSI M27-A4). O extrato tânico exibiu ação fungistática, inibindo a proliferação do patógeno a 12,5 mg/mL. Esta dosagem reflete o impedimento estérico e a ausência do sinergismo encontrado em extratos brutos. O ensaio confirmou a resistência do fungo ao itraconazol (CIM >0,016 mg/mL), mantendo suscetibilidade à anfotericina B (CIM = 0,008 mg/mL). Conclui-se que o tanino de *A. colubrina* apresenta potencial biotecnológico, despontando como candidato para terapias antifúngicas combinadas visando contornar a resistência no manejo da candidíase.

Palavras-chave: Azóis; Resistência antifúngica; Produtos naturais

Antifungal activity of the tannic fraction from *Anadenanthera colubrina* (Vell.) Brenan against *Candida albicans*

Abstract: *Candida albicans* infections pose clinical challenges due to rising drug resistance. This study evaluated the *in vitro* antifungal activity of the *Anadenanthera colubrina* (Vell.) Brenan bark tannic fraction against *C. albicans* (ATCC 90028). Minimum Inhibitory Concentration (MIC) was determined via broth microdilution (CLSI M27-A4). The extract exhibited fungistatic action, inhibiting pathogen proliferation at 12.5 mg/mL. This dosage requirement reflects the steric hindrance and the lack of crude extract synergism. The assay confirmed fungal resistance to itraconazole (MIC >0.016 mg/mL), while remaining susceptible to amphotericin B (MIC = 0.008 mg/mL). In conclusion, *A. colubrina* tannins exhibit relevant biotechnological potential, emerging as promising candidates for combined antifungal therapies to overcome resistance in candidiasis management.

Keywords: Azoles; Fungal resistance; Natural products.

1 Introdução

As infecções fúngicas invasivas e superficiais causadas por leveduras do gênero *Candida*, em particular a *Candida albicans*, representam um desafio crescente e grave para a saúde pública mundial (Parslow & Thornton, 2022). Embora a *C. albicans* seja um fungo comensal comum que coloniza a microbiota de indivíduos saudáveis, fatores de desequilíbrio

imunológico ou danos na barreira das mucosas podem desencadear infecções oportunistas associadas a altas taxas de morbidade (Talapko *et al.*, 2021). Um dos principais fatores de virulência deste patógeno é a sua notável capacidade de formar biofilmes, comunidades celulares densas que se aderem a tecidos do hospedeiro e dispositivos médicos (Ponde *et al*., 2021). Estes biofilmes conferem uma forte resistência tanto às respostas imunológicas do hospedeiro quanto às terapias antifúngicas tradicionais, o que torna o tratamento um enorme desafio clínico (Fan *et al*., 2022). Com o aumento alarmante da incidência destas infecções e da resistência aos medicamentos convencionais, torna-se urgente a busca por novos agentes antifúngicos e estratégias terapêuticas (Maia *et al*., 2021).

Neste contexto, os metabólitos secundários de origem vegetal têm se destacado como alternativas ecológicas e eficazes para a descoberta de novos fármacos que consigam contornar os mecanismos de resistência atuais (Nawrot-Chorabik *et al.,* 2022; Gómez-Gaviria *et al.,* 2023). A espécie *Anadenanthera colubrina* (Vell.) Brenan, endêmica da América do Sul e popularmente conhecida como angico branco, possui um extenso registro de uso na medicina popular e apresenta um perfil biológico com imenso potencial farmacológico (Delices *et al.,* 2023). Estudos focados na caracterização química da casca e extratos desta árvore revelam uma rica composição em polifenóis, destacando-se uma concentração significativa de compostos fenólicos, ácidos fenólicos, flavonoides e, especialmente, taninos (Mota *et al.,* 2017; Junior *et al*., 2021).

Os taninos formam um grupo diversificado de macromoléculas polifenólicas solúveis em água que desempenham papéis de defesa nas plantas e são amplamente reconhecidos por suas notáveis propriedades biológicas, que incluem potente ação antioxidante, antimicrobiana e antifúngica (Serrano *et al*., 2009; Smeriglio *et al.,* 2017). Na literatura recente, extratos da casca de *A. colubrina* já demonstraram excelente atividade antifúngica direta contra cepas de *C. albicans*, sendo capazes de reduzir o crescimento de células planctônicas em baixas concentrações e de inibir significativamente a formação de biofilmes maduros, causando destruição celular no fungo (Lima *et al.,* 2014; Silva *et al*., 2019). Além dos seus fortes efeitos antibiofilme, observou-se que a espécie modula a virulência fúngica ao sub-regular a expressão gênica de enzimas proteolíticas de ataque da *Candida*, enquanto apresenta baixa citotoxicidade para os fibroblastos humanos, sendo considerada uma forte candidata no tratamento de infecções como a candidíase oral (Silva *et al*., 2019; Maia *et al.,* 2021).

Embora os extratos brutos de *A. colubrina* demonstrem sucesso biológico, a exploração direta dos taninos como o princípio ativo isolado no combate estrutural e metabólico a este

patógeno carece de investigações direcionadas. Dessa forma, o presente trabalho teve como objetivo avaliar a atividade antifúngica da fração tânica da espécie *A. colubrina* no combate à *C. albicans*, visando propor o desenvolvimento de novas bases terapêuticas e fitofármacos eficazes e seguros contra infecções fúngicas resistentes.

2 Material e métodos

2.1 Material

A espécie Angico-branco (*Anadenanthera colubrina* (Vell.) Brenan) utilizada nesta pesquisa foi coletada em Mangaratiba, no estado do Rio de Janeiro (RJ), Brasil, localizada nas coordenadas 43° 59' 55.73" W e 22° 23' 56.74" S, a 1119 metros acima do nível do mar. As amostras foram obtidas de um agrupamento de aproximadamente 10 indivíduos adultos, identificados por meio do mapeamento de coleta de sementes realizado pela equipe do Programa Replantando Vida da Companhia Estadual de Águas e Esgotos (CEDAE).

2.2 Preparo dos extrativos da casca

As cascas foram cavaqueadas e processadas em moinho de facas tipo Willey. A fração que foi utilizada para o preparo dos extrativos foi referente a porção que atravessou a peneira de malha 40 mesh e que se manteve retida na peneira de 60 mesh como preconiza a norma da Technical Association of the Pulp and Paper Industry (TAPPI, 1997).

Foram adicionados 10g da casca homogeneizada em cartuchos de papel filtro e em seguida os mesmos cartuchos foram submetidos a extração. Foi feito uma relação de 15:1, onde, foi utilizado 150 ml de água destilada para 10g de casca e levado para balão sob refluxo por 2 horas. Após a extração, o material foi filtrado a vácuo, em cadinho de vidro sinterizado de peso conhecido previamente tarado. O material foi levado à estufa a 103 °C durante 24h e posteriormente pesado. Foram realizadas cinco repetições (SAMPAIO, 2022).

2.3 Avaliação da Atividade Antifúngica através da determinação da concentração inibitória mínima (CIM)

A atividade antifúngica contra *Candida albicans* (ATCC 90028) foi delineada pelo ensaio de microdiluição em caldo, fundamentado no protocolo CLSI M27-A4 (2017) com adaptações. O inóculo, padronizado por espectrofotometria (530 nm) a partir de culturas recentes (ágar Sabouraud-dextrose, 35 ºC por 24 horas), foi diluído em meio sintético RPMI-1640 (tamponado com MOPS, pH 7,0 e esterilizado por filtração a 0,22 µm) para atingir

a densidade final de 1,0 a 5,0 x 10^3 UFC/mL. O ensaio foi conduzido em microplacas de 96 poços, nas quais o extrato tânico e os fármacos de referência (itraconazol e anfotericina B) foram previamente solubilizados em um sistema carreador (DMSO/Tween 80/RPMI na proporção 1:1:8) e submetidos a diluição seriada (fator 2). O delineamento estabeleceu faixas de 200 a 0,390 mg/mL para o extrato e de 16 a 0,031 µg/mL para os controles clínicos, contemplando ensaios paralelos de esterilidade do meio, viabilidade celular e a toxicidade.

Decorridas 48 horas de incubação a 37 °C, a Concentração Inibitória Mínima (CIM) foi estabelecida visualmente como a menor concentração capaz de inibir totalmente o desenvolvimento fúngico. A confiabilidade do ensaio foi garantida pela adoção de controles simultâneos de esterilidade do meio, viabilidade do inóculo e a toxicidade do sistema carreador (DMSO/Tween 80).

3 Resultados e discussão

O extrato tânico da casca de *A. colubrina* demonstrou atividade fungistática frente à cepa de *C. albicans* (ATCC 90028), apresentando um perfil inibitório específico quando comparado aos fármacos de referência (Tabela 1).

Tabela 1. Concentração Inibitória Mínima (CIM) do extrato da casca de *Anadenanthera colubrina* sobre o fungo de *Candida albicans* (ATCC 90028).

Concentração inibitória (mg / mL)		
Tratamento	**Tipo de extrato**	***Candida albicans***
Itraconazol	Controle	>0,016
Anfotericina B	Controle	0,008
Extrato da casca de *A. colubrina*	Tanino	12,5

Nota: O valor (>0,016 mg/mL) para o Itraconazol representa a maior concentração testada no ensaio, na qual não foi observada a inibição do crescimento fúngico.

Os resultados do ensaio de microdiluição em caldo revelaram diferentes perfis de suscetibilidade da cepa de *C. albicans* frente aos tratamentos avaliados (Tabela 1). O extrato tânico obtido da casca de *A. colubrina* apresentou uma CIM de 12,5 mg/mL. Nesta concentração, o composto foi capaz de suprimir o metabolismo leveduriforme e inibir a proliferação celular do patógeno, porém, é fundamental destacar que a atividade observada para a fração de taninos neste ensaio caracteriza-se como uma ação eminentemente fungistática, e

não fungicida. Isso significa que a substância atua paralisando o crescimento e a replicação do fungo, em vez de causar a lise ou morte celular direta e imediata.

Conforme explicam Cosme *et al.* (2025) e Smeriglio *et al*. (2017), os taninos são compostos polifenólicos de alto peso molecular, e sua atividade biológica é fortemente influenciada pelo grau de polimerização e solubilidade. Esses mesmos autores indicam que o elevado tamanho estrutural dessas macromoléculas pode dificultar a translocação através da complexa parede celular da *Candida*. Esse impedimento estérico resulta em um efeito inibitório que demanda concentrações significativamente mais elevadas (12,5 mg/mL) para atingir a eficácia, quando comparado aos antifúngicos convencionais.

Esse perfil diverge parcialmente dos estudos conduzidos por Maia *et al*. (2021) e Silva *et al*. (2019), os quais utilizaram extratos brutos ou hidroalcoólicos de *A. colubrina* e relataram forte atividade antifúngica e antibiofilme contra cepas de *Candida* em concentrações significativamente menores, na faixa de mg/mL. Essa divergência pode ser explicada pelas observações de Delices *et al.* (2023) e Junior *et al.* (2021), que sugerem que a atividade descrita na literatura para o angico depende do sinergismo entre os diversos metabólitos secundários presentes no extrato bruto, que engloba uma ampla matriz de flavonoides, ácidos fenólicos e alcaloides, além dos próprios taninos. Ao isolar unicamente a fração tânica, perde-se esse efeito cooperativo que potencializa a toxicidade celular, evidenciando a ação primariamente fungistática do polímero isolado.

A análise dos controles clínicos traz um dado relevante: enquanto a Anfotericina B demonstrou alta eficácia com uma CIM de 0,008 mg/mL, o Itraconazol não foi capaz de inibir o crescimento fúngico na maior concentração testada (>0,016 mg/mL). Essa refratariedade ao azol corrobora a problemática global mostrada por Fan *et al.* (2022) e Parslow e Thornton (2022) a respeito da resistência e evasão imunológica de *C. albicans* às terapias tradicionais, reforçando a necessidade incontestável de bioprospecção de novos agentes de matriz vegetal.

Por fim, embora o tanino de *A. colubrina* tenha se mostrado estritamente fungistático e ativo apenas em concentrações elevadas no seu estado isolado, o seu valor biotecnológico não deve ser descartado. Como demonstraram Maia *et al.* (2021) e Silva *et* al. (2019), substâncias vegetais com este perfil demonstram forte potencial na modulação de fatores de virulência e na formação de biofilmes.

4 Conclusões

O presente estudo demonstra que a fração tânica isolada da casca de *Anadenanthera colubrina* (Vell.) Brenan exibe atividade primariamente fungistática contra *Candida albicans*. A necessidade de concentrações mais elevadas (CIM = 12,5 mg/mL) para a supressão do metabolismo leveduriforme evidencia que o isolamento prévio deste polímero desfaz o sinergismo molecular característico dos extratos brutos, além de impor restrições estruturais que dificultam a sua translocação intracelular. No entanto, a preocupante resistência do fungo aos antifúngicos comuns, comprovada neste estudo, reforça a urgência na busca por novos compostos. Sob essa ótica, o tanino de *A. colubrina* mantém relevante potencial biotecnológico, despontando como um candidato para a formulação de terapias antifúngicas combinadas, visando resgatar a suscetibilidade aos fármacos comerciais, e para o desenvolvimento de alternativas no manejo clínico da candidíase.

5 Agradecimentos

Os autores agradecem ao Laboratório de Micotoxicologia, da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (UFRRJ), pelo apoio técnico e pela infraestrutura disponibilizada para a realização deste trabalho.

6 Referências bibliográficas

Clinical and Laboratory Standards Institute. (2017). Reference method for broth dilution antifungal susceptibility testing of yeasts (4th ed., CLSI standard M27-A4).

Cosme, F., Aires, A., Pinto, T., Oliveira, I., Vilela, A., & Gonçalves, B. (2025). A comprehensive review of bioactive tannins in foods and beverages: Functional properties, health benefits, and sensory qualities. Molecules, 30(4), 800. https://www.mdpi.com/1420-3049/30/4/800

Delices, M., Muller, J. A. I., Arunachalam, K., & Martins, D. T. O. (2023). Anadenanthera colubrina (Vell.) Brenan: Ethnobotanical, phytochemical, pharmacological and toxicological aspects. Journal of Ethnopharmacology, 300, 115745. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S037887412200784X

Fan, F., Liu, Y., Liu, Y., Lv, R., Sun, W., Ding, W., Cai, Y., Li, W., Liu, X., & Qu, W. (2022). Candida albicans biofilms: Antifungal resistance, immune evasion, and emerging therapeutic strategies. International Journal of Antimicrobial Agents, 60(5), 106673. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924857922001935

Gómez-Gaviria, M., Ramírez-Sotelo, U., & Mora-Montes, H. M. (2023). Non-albicans Candida species: Immune response, evasion mechanisms, and new plant-derived alternative therapies. Journal of Fungi, 9(1), 11. https://www.mdpi.com/2309-608X/9/1/11

Junior, O. C., Lima, N. M., Silva, M. G. A., Aguiar, V. B., Carli, G. P., Scherrer, E. C., Castro, S. B. R., Alves, C. C. S., Oliveira, M. A. L., & Carli, A. P. (2021). In vitro and in vivo evaluation of anti-inflammatory activity and free radical scavenging potential of leaves extract from Anadenanthera colubrina. Natural Product Research, 35(22), 4819-4823. https://doi.org/10.1080/14786419.2020.1727472

Lima, R. d. F., Alves, É. P., Rosalen, P. L., Ruiz, A. L. T. G., Teixeira Duarte, M. C., Góes, V. F. F., de Medeiros, A. C. D., Pereira, J. V., Godoy, G. P., & Costa, E. M. M. D. B. (2014). Antimicrobial and antiproliferative potential of Anadenanthera colubrina (Vell.) Brenan. Evidence-Based Complementary and Alternative Medicine, 2014(1), 802696. https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1155/2014/802696

Maia, C. M. d. A., Pasetto, S., Nonaka, C. F. W., Costa, E. M. M. D. B., & Murata, R. M. (2021). Yeast-host interactions: Anadenanthera colubrina modulates virulence factors of C. albicans and inflammatory response in vitro. Frontiers in Pharmacology, 12, 629778. https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fphar.2021.629778/full

Mota, G. S., Sartori, C. J., Miranda, I., Quilhó, T., Mori, F. A., & Pereira, H. (2017). Bark anatomy, chemical composition and ethanol-water extract composition of Anadenanthera peregrina and Anadenanthera colubrina. PLOS ONE, 12(12), e0189263. https://dx.plos.org/10.1371/journal.pone.0189263

Nawrot-Chorabik, K., Sułkowska, M., & Gumulak, N. (2022). Secondary metabolites produced by trees and fungi: Achievements so far and challenges remaining. Forests, 13(8), 1338. https://www.mdpi.com/1999-4907/13/8/1338

Parslow, B. Y., & Thornton, C. R. (2022). Continuing shifts in epidemiology and antifungal susceptibility highlight the need for improved disease management of invasive candidiasis. Microorganisms, 10(6), 1208. https://www.mdpi.com/2076-2607/10/6/1208

Ponde, N. O., Lortal, L., Ramage, G., Naglik, J. R., & Richardson, J. P. (2021). Candida albicans biofilms and polymicrobial interactions. Critical Reviews in Microbiology, 47(1), 91-111. https://doi.org/10.1080/1040841X.2020.1843400

Sampaio, D. A., dos Santos Junior, A. J., Dias de Souza, N., & Carlos Costa Lelis, R. (2022). Diversity of secondary metabolites of Araucaria seed (Araucaria angustifolia (Bert.) O. Ktze) residues. Ensaios e Ciência: Ciências Biológicas, Agrárias e da Saúde, 26(2), 289–292. https://doi.org/10.17921/1415-6938.2022v26n2p289-292

Serrano, J., Puupponen-Pimiä, R., Dauer, A., Aura, A.-M., & Saura-Calixto, F. (2009). Tannins: Current knowledge of food sources, intake, bioavailability and biological effects. Molecular Nutrition & Food Research, 53(S2). https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/mnfr.200900039

Silva, D. R., Rosalen, P. L., Freires, I. A., Sardi, J. D. C. O., Lima, R. F., Lazarini, J. G., Costa, T. K. V. L. D., Pereira, J. V., Godoy, G. P., & Costa, E. M. M. D. B. (2019). Anadenanthera colubrina vell Brenan: Anti-Candida and antibiofilm activities, toxicity and therapeutical action. Brazilian Oral Research, 33, e023. http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1806-83242019000100215&tlng=en

Smeriglio, A., Barreca, D., Bellocco, E., & Trombetta, D. (2017). Proanthocyanidins and hydrolysable tannins: Occurrence, dietary intake and pharmacological effects. British Journal of Pharmacology, 174(11), 1244-1262. https://bpspubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/bph.13630

Talapko, J., Juzbašić, M., Matijević, T., Pustijanac, E., Bekić, S., Kotris, I., & Škrlec, I. (2021). Candida albicans—The virulence factors and clinical manifestations of infection. Journal of Fungi, 7(2), 79. https://www.mdpi.com/2309-608X/7/2/79

TECHNICAL ASSOCIATION OF THE PULP AND PAPER INDUSTRY - TAPPI. TAPPI T 204 cm-97: solvent extractives of wood and pulp. Atlanta: TAPPI Press, 1997. Disponível em: <https://www.tappi.org>. Acesso em: 4 maio. 2026

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Avaliação das propriedades físico-mecânicas de papel produzido a partir de resíduos agrícolas da indústria cafeeira

Thaisa Saturnino André; Marcela Ribeiro Coura[1]; Priscila Moreira da Silva Xavier[1]; Iara Fontes Demuner[1]; Ana Márcia Macedo Ladeira Carvalho[1]; Antônio Jacinto Demuner[1]; Rodrigo Fraga de Almeida[1]; Jamille Carvalho de Souza[1]

[1] Universidade Federal de Viçosa

Resumo: O café é uma das commodities mais relevantes do mercado global, contudo, sua cadeia produtiva gera volumes expressivos de resíduos. Converter esses rejeitos em subprodutos industriais desponta como alternativa vantajosa para a economia e o meio ambiente. Diante disso, este estudo avaliou o potencial do pergaminho cafeeiro (kappa 25) como matéria-prima alternativa para a produção de polpa celulósica, com ênfase em suas propriedades estruturais e mecânicas. A polpa foi submetida a refino em três níveis de rotação (100, 200 e 300 rpm), analisando-se a drenabilidade (°SR), a resistência à passagem de ar (RPA) e o índice de tração (IT). O refino elevou o °SR de 18 para 43 °SR; a RPA, de 0,54 para 0,74 s/100 cm³; e o IT, de 1,89 para 9,19 N·m/g, considerando os pontos de 0 e 300 rpm, respectivamente. Conclui-se que a polpa apresenta desempenho mecânico satisfatório e elevada porosidade, característica desejável em papéis para cigarro ou em misturas de fibras para papéis *tissue*.

Palavras-chave: Pergaminho cafeeiro; Refino mecânico; Polpa celulósica.

Evaluation of the physical-mechanical properties of paper produced from agricultural residues of the coffee industry

Abstract: Coffee is one of the most relevant commodities in the global market; however, its production chain generates significant volumes of waste. Converting these residues into industrial by-products emerges as an advantageous alternative for both the economy and the environment. In this context, this study evaluated the potential of coffee parchment (kappa 25) as an alternative raw material for cellulose pulp production, focusing on its structural and mechanical properties. The pulp was subjected to refining at three rotation levels (100, 200, and 300 rpm), assessing drainability (°SR), air resistance (RPA), and tensile index (TI). Refining increased the °SR from 18 to 43 °SR; the RPA from 0.54 to 0.74 s/100 cm³; and the TI from 1.89 to 9.19 N·m/g, considering the 0 and 300 rpm points, respectively. It is concluded that the pulp exhibits satisfactory mechanical performance and high porosity, a desirable characteristic for cigarette papers or in fiber blends for tissue papers.

Keywords: Coffee parchment; Mechanical refining; Cellulose pulp.

1. Introdução

Em 2024, a indústria brasileira de celulose alcançou a produção recorde de 25,5 milhões de toneladas, consolidando o país como maior exportador global do produto (Ibá, 2025). A madeira, sobretudo a de eucalipto, constitui a principal matéria-prima do processo Kraft. Entretanto, a disputa por essa matéria-prima com outros setores industriais reforça a necessidade de diversificar as fontes de fibra. Nesse contexto, o aproveitamento de resíduos de outras cadeias produtivas, como a do café, surge como alternativa promissora para a fabricação de celulose (Coura *et al*., 2024).

A destinação de baixo valor agregado de resíduos agroindustriais ainda é uma prática recorrente que gera impactos ambientais e desperdiça biomassas ricas em fibras vegetais. No cenário da bioeconomia, as biomassas agrícolas residuais surgem como uma importante fonte alternativa de compostos químicos e fibras vegetais para o desenvolvimento de produtos não madeireiros, reduzindo a dependência dos plantios florestais tradicionais.

Nesse contexto, o Brasil se consolida como o maior produtor e exportador mundial de café, setor que gera volumes expressivos de resíduos desde a colheita até o beneficiamento do grão (Conab, 2023; Ico, 2023). Dentre esses subprodutos, o pergaminho (ou endocarpo) destaca-se por ser uma fração lignocelulósica importante do fruto do cafeeiro (Esquivel; Jiménez, 2012). Comumente queimado nas propriedades ou descartado, o pergaminho apresenta uma composição hemicelulósica atrativa para a fabricação de polpa celulósica.

Dentre os resíduos da indústria cafeeira, o pergaminho destaca-se pelo maior teor de celulose. Dessa forma, suas fibras, uma vez isoladas, podem ser aproveitadas como polpa na produção de papel e de outros produtos de alto valor agregado (Reis *et al.*, 2020; Coura *et al.*, 2023). Contudo, apesar do potencial sustentável desse resíduo, o pergaminho de café apresenta limitações morfológicas decorrentes de suas fibras curtas e rígidas, o que pode comprometer a consolidação e a resistência mecânica das folhas de papel.

As características finais do papel dependem diretamente do tipo de fibra utilizada e de como ela foi preparada, envolvendo as etapas de polpação, branqueamento e processamento mecânico (Biermann, 1996). O que define as propriedades ideais varia muito conforme o produto que se deseja fabricar. Contudo, quando o objetivo é alcançar a qualidade necessária usando fontes alternativas, o refino da polpa e o tratamento mecânico das fibras celulósicas surgem como os caminhos mais viáveis para desenvolver essas qualidades (Abtcp, 2015).

Dessa forma, para viabilizar sua aplicação industrial, faz-se necessário o emprego de tratamentos como o refino mecânico em moinho PFI, que modifica a ultraestrutura das fibras,

aumentando a flexibilidade e a capacidade de ligação intercoletiva (D'Almeida, 1988). Por outro lado, a ação de corte do equipamento pode acabar enfraquecendo e reduzindo o comprimento individual das fibras, sendo este um impacto colateral que, na maioria das vezes, busca-se evitar durante o processo (Biermann, 1996).

Diante disso, a eficácia desse tratamento é avaliada por meio de propriedades físicas e mecânicas cruciais sendo grau de Schopper (°SR), que mensura a drenabilidade e a retenção de água pela massa de polpa; a resistência de água pela massa da polpa; a resistência à passagem de ar (RPA), que reflete a porosidade e a densidade da rede fibrosa; e o índice de tração (IT), que quantifica a resistência mecânica e a força das ligações formadas entre as fibras. O objetivo deste trabalho foi caracterizar o desempenho físico-mecânico de fibras não branqueadas provenientes do pergaminho de café, por meio da avaliação da drenabilidade, resistência à passagem de ar e índice de tração em diferentes pontos de refino, visando analisar a viabilidade desse resíduo como matéria-prima alternativa na produção de papel.

2. Material e métodos

Polpa kraft marrom tipo pergaminho número kappa 25 produzida em laboratório.

2.1 Produção de papel

Para a produção de papel, foi utilizada polpa marrom de kappa 25. Três níveis de refino diferentes foram utilizados, com base no número de rotações: 100, 200 e 300 rpm. O refino foi realizado em um refinador PFI, modelo MARK VI da Hamar Norway, seguindo a norma TAPPI T 248 sp-08 (Tappi, 2008).

A determinação da resistência à drenagem, em graus Schopper-Riegler (°SR), foi realizada de acordo com a norma ISO 5267-1:1999 (Iso, 1999). A preparação das folhas de laboratório foi realizada de acordo com a norma TAPPI 205 om-81 (Tappi, 1998). As folhas moldadas foram colocadas em um ambiente com umidade relativa de 50 ± 2% e temperatura de 23 ± 1 °C. Uma gramatura de 180 g/m² foi adotada para a confecção das folhas.

2.2 Testes físico-mecânicos

O papel produzido foi avaliado quanto ao índice de tração (TAPPI 494 om-06) (Tappi, 2006) e resistência ao ar do papel (TAPPI 536 om-07) (Tappi, 2007).

3. Resultados e discussão

3.1 Resistência à Drenagem

A resistência à drenagem mede a facilidade com que uma suspensão de fibras libera água, sendo avaliada em laboratório pelo grau Schopper-Riegler (°SR) segundo a norma ISO 5267-1:1999. Esse parâmetro indica o nível de hidratação e o emaranhamento das fibras antes da fabricação da folha. Acompanhar essa propriedade é fundamental no monitoramento industrial, pois valores altos de °SR mostram que a polpa retém mais água. A Figura 1 apresenta a relação entre a resistência à drenagem (°SR) e o consumo de energia no refino da polpa kraft de pergaminho de café.

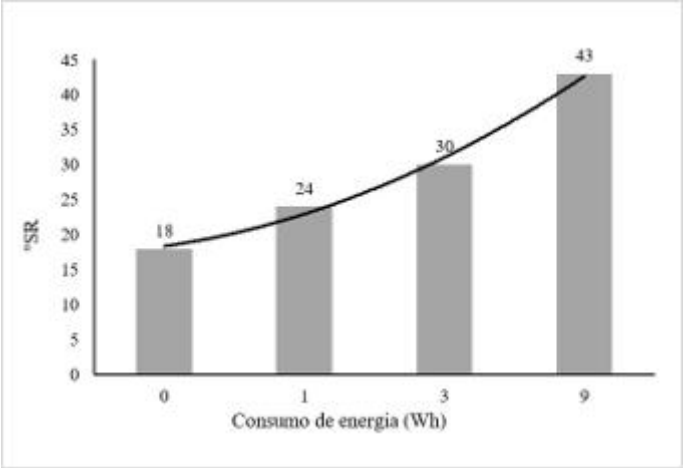


Figura 1 - Resistência à drenagem (°SR) em função do consumo de energia de refino da polpa kraft de pergaminho de café

Todas as polpas estudadas exigiram pouco consumo de energia para alterar significativamente os valores de ºSR. A resistência à drenagem da polpa de pergaminho de café aumentou de forma progressiva e acentuada com o refino, subindo de 18,0 °SR (0 Wh) para 43,0 °SR após 300 rotações no moinho PFI. Esse comportamento decorreu das modificações nas fibras provocadas pelo próprio moinho. O atrito mecânico rompeu a parede primária das fibras e gerou muitos finos secundários, aumentando a sua área exposta (Gullichsen & Paulapuro, 1999). Esse fenômeno faz com que a polpa retivesse mais água e criando uma rede densa que obstruiu os canais da tela formadora na gramatura de 180 g/m², explicando a redução no

escoamento (D'Almeida, 1988). Esse comportamento de hidratação demonstrou estar alinhado às características morfológicas de fibras curtas residuais submetidas a tratamentos mecânicos (Reis *et al.*, 2020).

3.2 Índice de tração

O índice de resistência à tração (IT) é um dos ensaios mais importantes para avaliar a estrutura de polpas celulósicas, segundo a norma TAPPI 494 om-06. Essa propriedade calcula a força necessária para romper uma tira de papel dividida pela sua gramatura, o que elimina a influência da espessura (Biermann, 1996). Na Figura 2, é apresentada a relação entre o índice de resistência à tração e o consumo de energia no refino da polpa kraft de pergaminho de café.

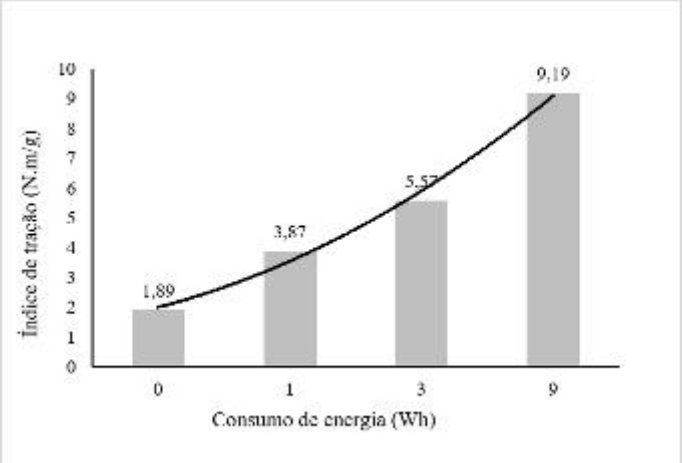


Figura 2 - Índice de resistência à tração em função do consumo de energia de refino da polpa kraft de pergaminho de café

O índice de tração apresentou aumento expressivo com a intensificação do refino, passando de 1,89 N·m/g (0 Wh) para 9,19 N·m/g após 300 rotações no moinho PFI. A polpa não refinada exibiu baixa coesão inicial, visto que as fibras do pergaminho de café possuem elevada rigidez natural e pouco contato entre si (Benitez *et al.*, 2019). A aplicação do tratamento mecânico contornou essa limitação ao provocar a fibrilação externa e soltar as microfibrilas. Esse processo deixou as fibras mais flexíveis, aumentou a área de contato e facilitou a formação de pontes de hidrogênio durante a secagem, o que garante o ganho de resistência (Biermann, 1996; Gullichsen & Paulapuro, 1999). Esse ganho evidenciou o potencial do resíduo dentro do conceito de valorização industrial de subprodutos da cadeia cafeeira (Aristizábal Marulanda *et al.*, 2017)

3.3 Resistência à passagem do ar

A resistência à passagem de ar mede o tempo que um volume padrão de gás leva para atravessar a folha sob pressão controlada, conforme a norma TAPPI 536 om-07. Esse parâmetro reflete diretamente a porosidade, a densidade e o fechamento dos espaços vazios no papel (D'Almeida, 1988). Medir essa propriedade é fundamental para o setor industrial, pois define se o material vai funcionar como uma barreira compacta ou altamente permeável, orientando a sua escolha para embalagens que precisam liberar ar rapidamente ou para papéis de alta porosidade (Casey, 1980). A Figura 3 mostra a relação entre a resistência à passagem de ar e o consumo de energia no refino da polpa kraft de pergaminho de café.

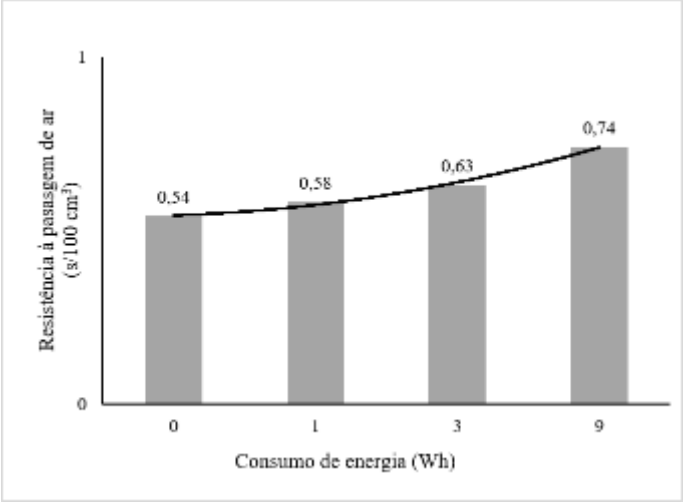


Figura 3 - Resistência do ar em função do consumo de energia de refino da polpa kraft de pergaminho de café

A polpa de pergaminho de café apresentou baixa sensibilidade ao refino, com variação pouco expressiva na resistência à passagem de ar, passando de 0,54 s/100 cm³ (0 Wh) para 0,74 s/100 cm³ após 300 rotações no moinho PFI (Figura 3). Embora, o tratamento mecânico tenda a gerar finos que entopem os poros e aumentam muito o tempo de fluxo do ar (Gullichsen & Paulapuro, 1999), os valores obtidos indicaram que a rede do papel manteve seus canais abertos e sua alta porosidade natural. Esse comportamento pode ser atribuído à morfologia de superfície específica das fibras do resíduo de café (Gonçalves *et al.*, 2021). A manutenção dessa porosidade evidenciou que a polpa atende a aplicações que demandam baixa resistência à passagem de ar, como em papéis específicos que necessitam liberar o ar aprisionado rapidamente (Andrades; Frinhani, 2015), essas características indicam que o pergaminho de

café é uma matéria prima promissora para atuar como fibra de reforço na produção de papéis *tissue* e papéis para cigarro, produtos que exigem controle de permeabilidade.

4. Conclusões

Os ensaios físico-mecânicos indicaram que as fibras de pergaminho cafeeiro possuem capacidade de ligação interfibrilar limitada, o que reduz a resistência mecânica do papel. Em contrapartida, essa característica confere elevada permeabilidade ao ar tornando a polpa promissora para papéis de cigarro e como fibra de reforço em papéis *tissue*.

5. Agradecimentos

A Universidade Federal de Viçosa (UFV), ao Departamento de Engenharia Florestal (DEF), ao Laboratório de Celulose e Papel (LCP) pelo suporte acadêmico e estrutura institucional concedida e as agências de fomento (CAPES, FAPEMIG e CNPq) pela oferta de recursos.

6. Referências bibliográficas

Abtcp – Associação Brasileira Técnica De Celulose E Papel. (2015). Manual de Fabricação de Papel. São Paulo: ABTCP.

Andrades, C., & Frinhani, E. (2015). Propriedades físico-mecânicas de polpas kraft com números kappa 45 e 55 destinadas a fabricação de papel sackraft de baixa gramatura. O PAPEL, 76(7), 53-58.

Aristizábal-Marulanda, V., Chacón-Perez, Y., & Alzate, C. A. C. (2017). The biorefinery concept for the industrial valorization of coffee processing by-products. In Handbook of Coffee Processing By-Products

Benitez, V., Rebollo-Hernanz, M., Hernanz, S., Chanters, S., Aguilera, Y., & Martin Cabrejas, M. A. (2019). Coffee parchment as a new dietary fiber ingredient: Functional and physiological characterization. Food Research International

Biermann, C. J. (1996). Handbook of pulping and papermaking. Elsevier.

Casey, J. P. (1980). Pulp and Paper: Chemistry and Chemical Technology. 3. ed. New York: Wiley-Interscience. v. 2.

Conab. Companhia Nacional de Abastecimento. (2023). Acompanhamento da safra brasileira de café: Quarto levantamento. Conab. https://www.conab.gov.br

Coura, M. R., Demuner, A. J., Demuner, I. F., Blank, D. E., Magalhaes Firmino, M. J., Borges Gomes, F. J., ... & Henrique dos Santos, M. (2023). Technical kraft lignin from coffee parchment. Nordic Pulp & Paper Research Journal, 38(2), 229-241.

Coura, M. R., Demuner, A. J., Demuner, I. F., Firmino, M. J. M., Ribeiro, R. A., Gomes, F. J. B., ... & dos Santos, M. H. (2024). Coffee biomass residue as a raw material for cellulose production and Py-GC/MS analysis. Waste and Biomass Valorization, 15(1), 349-364.

D'almeida, M. L. O. (1988). O papel como estrutura porosa. O Papel, v. 49, n. 8, p. 53-62.

D'Almeida, M. L. O. (Ed.). (1988). Preparo da massa. In Celulose e papel (2a ed., Vol. 2). IPT/SENAI.

Esquivel, P., & Jiménez, V. M. (2012). Functional properties of coffee and coffee by-products**.** Food Research International, v. 46, n. 2.

Gonçalves, B. M. M., Camillo, M. O., Oliveira, M. P., Carreira, L. G., Moulin, J. C., Neto, H. F., de Oliveira, B. F., Pereira, A. C., & Monteiro, S. N. (2021). Surface treatments of coffee husk fiber waste for effect incorporations into polymer biocomposites.

Gullichsen, J.; Paulapuro, H. (1999). Papermaking Part 1: Stock Preparation and Wet End. Helsinki: Fapet Oy (Papermaking Science and Technology, v. 8).

Ibá. (2025). Relatório anual 2025. https://iba.org/wpcontent/uploads/2025/10/relatorioanual2025.pdf

International Coffee Organization. (2023). Coffee report and outlook. ICO. https://icocoffee.org

International Organization for Standardization. (1999). ISO 5267-1**:** Pulps — Determination of drainability — Part 1: Schopper-Riegler method. *Geneva*: ISO.

Page, D. H. (1969). A theory for the tensile strength of paper. Tappi Journal, v. 52, n. 4, p. 674-681.

Reis, R. S., Tienne, L. G., de HS Souza, D., Marques, M. D. F. V., & Monteiro, S. N. (2020). Characterization of coffee parchment and innovative steam explosion treatment to obtain microfibrillated cellulose as potential composite reinforcement. Journal of Materials Research and Technology, 9(4), 9412-9421.

Technical Association of the Pulp and Paper Industry. (1998) T 205 om-81: Forming handsheets for physical tests of pulp. Atlanta: TAPPI Press.

Technical Association of the Pulp and Paper Industry. (2008) T 248 sp-08**:** Laboratory beating of pulp (PFI mill method). Atlanta: TAPPI Press.

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Avaliação de Extratos Tânicos Cationizados de *Anadenanthera colubrina* (Vell.) Brenan no Tratamento de Efluentes de Comunidade Rural

Maria Heloisa dos Santos Silva [1]; Gabriela Wanny Ribeiro Pinheiro [1]; Priscila Olívia de Oliveira Dias [1]; Átila Bruno de Moraes Almeida [1]; Tatiane Kelly Barbosa de Azevêdo[1]; Karen Maria da Costa Mattos [1]; Marcone Geraldo Costa [1]; Sandra Rufino Santos [1]

[1] Universidade Federal do Rio Grande do Norte

Resumo: A presente pesquisa avaliou o desempenho do extrato tânico cationizado de *Anadenanthera colubrina* (Vell.) Brenan como agente coagulante no tratamento de efluentes rurais de biodigestores. Os ensaios de Jar Test foram conduzidos com dosagens de 50, 100 e 150 mg/L, sob condições padronizadas de mistura e sedimentação. Constatou-se elevada estabilidade química do meio, com mínima alteração do pH (7,77 - 7,84) em relação ao efluente bruto (7,84). Em contrapartida, observou-se baixa eficiência na clarificação, registrando-se uma turbidez final equivalente a 104,4% da leitura original nas maiores concentrações avaliadas. Como hipótese explicativa, sugere-se que a suposta elevada carga orgânica da matriz tenha inibido o adensamento, gerando microflocos leves que permaneceram em suspensão. Os resultados evidenciam que a aplicação isolada deste biocoagulante apresenta limitações em matrizes orgânicas complexas. Conclui-se que, para viabilizar o tratamento, é indispensável investigar a otimização do processo mediante sua associação a agentes de lastro ou métodos complementares..

Palavras-chave: Biopolímero; Biodigestor; Turbidez.

Evaluation of Cationized Tannin Extracts from *Anadenanthera colubrina* (Vell.) Brenan in Rural Community Effluent Treatment

Abstract: This research evaluated the performance of the cationized tannin extract from *Anadenanthera colubrina* (Vell.) Brenan as a coagulant agent in the treatment of rural biodigester effluents. Jar test assays were conducted using dosages of 50, 100, and 150 mg/L under controlled mixing and sedimentation conditions. Physicochemical analyses indicated high stability of the medium, with the pH remaining within the range of 7.77 to 7.84 (compared to the raw sample value of 7.84). However, clarification efficiency was unsatisfactory; at higher dosages, final turbidity reached 104.4% of the original matrix value. It is hypothesized that this behavior may be associated with the probable high organic load of the effluent, which would have favored particle dispersion and the formation of low-density microflocs, thereby hindering sedimentation. Results indicate that the standalone use of the biocoagulant is limited in complex matrices, and its application associated with auxiliary agents or complementary treatments is recommended. It is concluded that process optimization and technological combinations are necessary.
Keywords: Biopolymer; Biodigester; Turbidity.

1. Introdução

O tratamento convencional de águas e efluentes utiliza predominantemente sais metálicos, como o sulfato de alumínio. Apesar de eficientes, esses produtos geram lodos com baixa biodegradabilidade e potencial de acúmulo de metais. Além disso, o seu uso tende a reduzir o pH do meio, o que frequentemente exige etapas adicionais de correção química e manejo adequado para a disposição dos resíduos (ANJOS *et al.*, 2024; SILVA *et al.*, 2025).

Como alternativa ecologicamente viável, destacam-se os coagulantes naturais à base de taninos vegetais. Por serem compostos polifenólicos biodegradáveis, geram lodos menos poluentes e não consomem a alcalinidade do meio, preservando o pH original da amostra (MEDEIROS, 2024; SILVA *et al.*, 2025).

O aproveitamento de espécies nativas do bioma Caatinga, como o Angico (*Anadenanthera colubrina* (Vell.) Brenan), valoriza os produtos florestais não madeireiros e fornece insumos diretos para o saneamento ambiental.

Contudo, a eficiência técnica dos taninos depende das características do efluente. Embora garantam estabilidade ao pH, podem apresentar ineficiência na remoção da cor aparente e de compostos orgânicos (MEDEIROS, 2024). A coagulação exige a formação de flocos densos o suficiente para sedimentar (SILVA *et al.*, 2025).

Em determinados cenários, o biocoagulante atua de forma inversa: promove a dispersão de matéria orgânica fina ou forma microflocos suspensos que não decantam, causando o espalhamento da luz e o consequente aumento na leitura da turbidez.

Diante do exposto, o presente trabalho objetiva avaliar o comportamento físico-químico do coagulante natural de Angico (*Anadenanthera colubrina* (Vell.) Brenan) no tratamento de efluentes, avaliando sua capacidade de manutenção do pH e compreendendo os mecanismos operacionais que influenciam as taxas de remoção de turbidez e cor aparente.

2. Material e métodos

A pesquisa utilizou amostras de efluentes oriundos de um sistema de biodigestor instalado em uma residência rural no município de Lajes Pintadas, localizado no Agreste Potiguar. As coletas foram realizadas utilizando galões de 5 litros, os quais foram acondicionados em caixas térmicas durante o transporte até o laboratório.

Para garantir a padronização e a confiabilidade dos ensaios de coagulação, todo o volume coletado foi previamente homogeneizado, formando uma amostra composta representativa do efluente.

O material coagulante utilizado foi obtido a partir da espécie Angico (*Anadenanthera colubrina* (Vell.) Brenan), fornecido pelo Laboratório de Produtos Florestais Não Madeireiros da UFRN.

Para a etapa de extração, soluções aquosas de hidróxido de sódio (3%) e sulfito de sódio (2%) foram preparadas separadamente em água destilada e, em seguida, adicionadas a um béquer de 300 mL contendo 30 g da amostra moída. A mistura foi incubada em banho-maria digital termostatizado a 70 °C durante 3 horas. Decorrido o tempo de reação, o material foi resfriado à temperatura ambiente e submetido à extração e separação manual do licor obtido (Adaptado de Nascimento et al., 2026).

A cationização foi realizada em três etapas sequenciais: (I) reação inicial de NH_4Cl (5,4 g) e formaldeído (24,4 g) a 80 °C por 2 h; (II) adição de 28,0 g de solução aquosa de tanino (diluída 1:1) a 60 °C por 30 min; e (III) incorporação de 0,2 g de monoetanolamina a 50 °C por 3 h. O produto final modificado foi seco em estufa (60 °C por 48 h), homogeneizado e macerado, resultando no coagulante em pó utilizado nos ensaios., conforme adaptação de Konrath e Fava (2006), com a finalidade de aumentar o caráter catiônico do material e, consequentemente, ampliar seu potencial de aplicação nos ensaios de coagulação e floculação.

Para os ensaios práticos em equipamento de *Jar Test*, utilizou-se o volume exato de 1 litro da amostra homogeneizada por jarro, executados em três repetições para cada teste, totalizando 9 litros de efluente analisado. O efluente bruto estabilizou com pH inicial de 7.8 e turbidez de 266 NTU. Foram aplicadas três diferentes concentrações do biocoagulante cationizado de Angico: 50 mg/L, 100 mg/L e 150 mg/L.

O processo mecânico consistiu em uma etapa de mistura rápida com duração de 2 minutos a 130 rpm, seguida imediatamente por uma etapa de mistura lenta com duração de 10 minutos a 30 rpm. Finalizada a agitação, o efluente permaneceu em repouso para decantação, sendo realizadas leituras de turbidez (NTU) e do Potencial Hidrogeniônico (pH) a cada 10 minutos até o tempo máximo de 60 minutos de sedimentação.

Os dados experimentais obtidos foram submetidos à análise de estatística descritiva. Os resultados analíticos foram calculados a partir das médias simples das triplicatas e expressos tanto em valores absolutos quanto em percentual de variação em relação aos parâmetros iniciais do efluente bruto, permitindo aferir a estabilidade química e mensurar a eficiência física do processo.

3. Resultados e discussão

A avaliação física do processo de coagulação e floculação foi monitorada sistematicamente através da leitura óptica do efluente ao longo de 60 minutos de sedimentação. A Tabela 1 apresenta a evolução temporal da turbidez média, o desvio padrão e o coeficiente de variação (CV) para as três dosagens aplicadas do biocoagulante de *Anadenanthera colubrina* (Vell.) Brenan (50 mg/L, 100 mg/L e 150 mg/L).

Tabela 1 – Valores médios, desvio padrão e coeficiente de variação da turbidez do efluente ao longo de 60 minutos de sedimentação sob diferentes concentrações do coagulante de *Anadenanthera colubrina* (Vell.) Brenan.

Concentração de Coagulante	Tempo de Sedimentação	Turbidez Média (NTU)	Desvio Padrão	Coeficiente de Variação - CV (%)
50 mg/L	2 min	257,67	7,90	3,07
	10 min	259,87	8,96	3,45
	20 min	260,43	3,96	1,52
	30 min	264,70	4,26	1,61
	40 min	258,70	4,60	1,78
	50 min	266,13	11,93	4,48
	60 min	**263,13**	**6,02**	**2,29**
100 mg/L	2 min	269,77	3,04	1,13
	10 min	263,67	2,31	0,88
	20 min	269,07	4,65	1,73
	30 min	265,90	3,95	1,49
	40 min	273,97	2,67	0,97
	50 min	273,10	5,60	2,05
	60 min	**269,47**	**7,20**	**2,67**
150 mg/L	2 min	272,87	6,86	2,51
	10 min	273,90	4,91	1,79
	20 min	281,33	2,66	0,95
	30 min	279,03	2,38	0,85
	40 min	278,00	1,00	0,36
	50 min	277,70	1,04	0,37
	60 min	**277,70**	**3,54**	**1,27**

Destaca-se a alta precisão e repetibilidade analítica do ensaio, evidenciada pelos baixos valores do Coeficiente de Variação (todos inferiores a 4,5%), o que confirma a baixa variabilidade dos dados entre as repetições analisadas. Ao analisar os dados da Tabela 1, constata-se que a aplicação do coagulante não promoveu a redução da turbidez do efluente ao longo dos 60 minutos de decantação. Nas dosagens de 100 mg/L e 150 mg/L, os valores médios de turbidez mantiveram-se superiores ao valor inicial da amostra bruta (266 NTU), atingindo picos de 273,97 NTU e 281,33 NTU, respectivamente. A concentração de 50 mg/L apresentou

ligeira oscilação, porém estabilizou-se próxima ao limite absoluto inicial (263,13 NTU aos 60 minutos).

O fato de a turbidez não apresentar um decaimento contínuo e expressivo nas medições temporais sugere uma baixa sedimentação das partículas durante o período de observação. No presente ensaio, infere-se que a interação do tanino catiônico com a matriz do efluente tenha formado partículas sem densidade e peso específico suficientes para sedimentar, o que explicaria a manutenção dos altos valores de turbidez apresentados.

Esse comportamento contrasta com resultados observados no tratamento de águas superficiais de abastecimento com menor carga orgânica. Anjos *et al.* (2024) demonstraram que extratos tânicos cationizados de frutos de *Anadenanthera colubrina* (Vell.) Brenan apresentam eficiência técnica como agentes floculantes, sendo capazes de promover a remoção e reduzir significativamente a turbidez em matrizes aquosas com valores em torno de 150 NTU.

A divergência de resultados evidencia que o desempenho do biocoagulante é altamente sensível à composição da amostra. Em relação aos mecanismos de ação físico-química, sabe-se que os taninos submetidos à cationização ionizam-se no meio aquoso, neutralizando as cargas negativas das partículas coloidais e viabilizando a formação de flocos por meio de pontes de hidrogênio (SILVA *et al.*, 2025).

Contudo, a efetividade da clarificação do fluido exige obrigatoriamente que os aglomerados formados alcancem tamanho, peso e densidade suficientes para possibilitar a sedimentação gravitacional nas etapas posteriores (SILVA *et al.*, 2025).

A fim de elucidar visualmente o saldo final desse fenômeno físico-químico após a conclusão da etapa de decantação, a Figura 1 consolida os valores relativos finais de turbidez e do Potencial Hidrogeniônico (pH) da amostra tratada sob diferentes concentrações de coagulante, expressos em relação ao efluente bruto (100%).

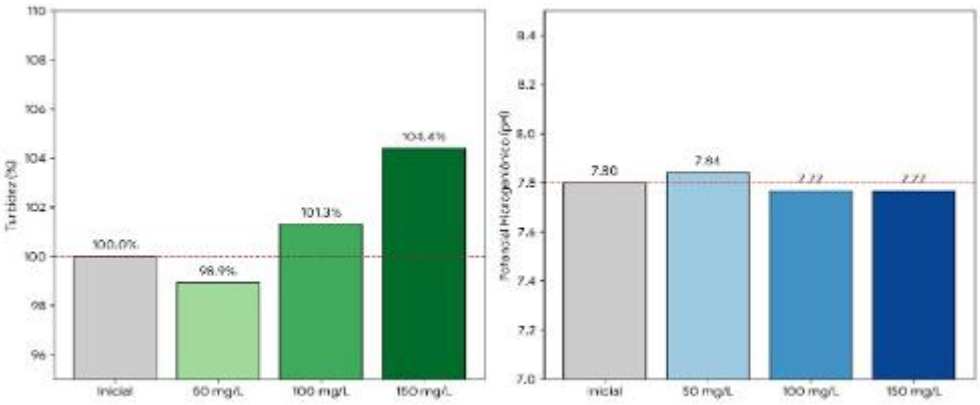


Figura 1 - Valores relativos finais de turbidez e pH (após 60 min) do efluente tratado sob diferentes concentrações de coagulante, expressos em relação ao efluente bruto (100%).

O efluente apresentou mínima oscilação no tocante ao pH, mantendo-se na faixa de 7,77 a 7,84 (frente ao valor inicial de 7,84). Em contrapartida, os valores finais de turbidez evidenciam um incremento óptico nas maiores dosagens, oscilando entre 98,9 e 104,4 NTU e atingindo 104,4% da leitura original na concentração de 150 mg/L.

A estabilidade do pH atesta a baixa interferência do coagulante nas características ácido-base do meio. Tais evidências corroboram os relatos de Silva *et al.* (2025) e Medeiros (2024), que destacam a vantagem técnica e ambiental dos taninos em não consumirem a alcalinidade da matriz, dispensando as etapas de correção química típicas da coagulação com sais metálicos.

Por outro lado, para justificar a elevação das leituras no turbidímetro, levanta-se a hipótese de que o extrato catiônico interaja com a matéria orgânica fina inerente ao efluente de biodigestor, induzindo a aglutinação em microflocos de baixa densidade. Ao permanecerem em suspensão, essas partículas teriam amplificado o espalhamento de luz captado pelo equipamento.

Esse fenômeno de ineficiência física em efluentes complexos alinha-se às limitações relatadas por Medeiros (2024), que demonstrou que os taninos vegetais apresentam dificuldade na remoção de frações de matéria orgânica dissolvida e substâncias húmicas, mantendo a turbidez elevada e prejudicando a remoção da cor aparente.

Portanto, constata-se que a aplicação isolada do biocoagulante de *Anadenanthera colubrina* (Vell.) Brenan enfrenta barreiras fluidodinâmicas em efluentes de biodigestores. Apesar da mínima alteração do pH sob as condições avaliadas, infere-se que o adensamento dos flocos seja limitado pela suposta alta carga orgânica do efluente. Assim, a viabilidade do

tratamento para matrizes com esse perfil exigirá a adoção de agentes de lastro ou a adequação dos gradientes de mistura mecânica, a fim de promover a agregação e a posterior sedimentação do material particulado.

4. Conclusões

O biocoagulante de *Anadenanthera colubrina* (Vell.) Brenan manteve a estabilidade do pH do efluente, confirmando sua baixa interferência no meio. Todavia, a eficiência na remoção de turbidez e cor aparente foi insatisfatória. Sugere-se que as características orgânicas da matriz possam ter dificultado o adensamento, favorecendo a suspensão de microflocos que elevaram as leituras ópticas. Diante disso, a aplicação isolada do coagulante não se mostrou promissora para este efluente específico, recomendando-se estudos futuros associados ao uso de agentes de lastro ou outras etapas físico-químicas para viabilizar a sedimentação.

5. Agradecimentos

Os autores agradecem à Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), pelo suporte institucional e infraestrutura essenciais à realização deste trabalho, e ao Laboratório do Grupo de Estudos Florestais Não Madeireiros, pelo apoio técnico-científico. Agradecem, ainda, à ONG Engenheiros Sem Fronteiras e aos projetos FLOEMA e Saneamento Fértil, pelo suporte e colaboração no desenvolvimento do estudo.

À comunidade de Catolé, especialmente aos proprietários Luiz e Rita, pelo apoio e receptividade durante as atividades de campo. Ao professor Átila Almeida, pela orientação e relevantes contribuições científicas.

6. Referências bibliográficas

Anjos, B. F., Azevedo, T. K. B., Silva, E. C. A., Nascimento, P. E. P., Paiva, K. L. B., Silva, L. C., & Pimenta, A. S. (2024). Assessment of chemically modified vegetable tannins as coagulants for water treatment. Ambiente & Água – An Interdisciplinary Journal of Applied Science, 19, pag, 1-12. https://doi.org/10.4136/ambi-agua.2985

KONRATH, R. A.; FAVA, F. J. Processo de preparação de um agente floculante à base de extrato vegetal. Deposited: Instituto Nacional da Propriedade Industrial - INPI. BR PI0500471-3 A. Depósito: 2006.

Medeiros, G. A. A. (2024). Uso de taninos na mitigação da eutrofização e no tratamento de água de reservatórios do semiárido (Dissertação de mestrado). Universidade Federal do Rio Grande do Norte.

NASCIMENTO, P. E. P. do; AZEVEDO, T. K. B. de; PAIVA, K. L. B. de; SOUZA, D. S. de; NUNES, F. H. F. M.; COSTA, E. de L. M. da; SILVA, E. C. A. da; PIMENTA, A. S.; MIRANDA, N. de O.; MEZA FILHO, J. G. U. Improving the extraction of Anacardium occidentale bark tannins by alkaline and sulphitation processes and their efficiency in coagulation: chemical characterization by HPLC. Ambiente & Água - An Interdisciplinary Journal of Applied Science, Taubaté, v. 2, pag. 1-21. https://doi.org/10.4136/ambi-agua.3145

[4] Silva, L. C., Azevedo, T. K. B., Souza, D. S., Nascimento, P. E. P., Paiva, K. L. B., Meza Filho, J. G. U., & Pimenta, A. S. (2025). Natural coagulant for water treatment based on cationized tannins from Terminalia Catappa bark. Rev. Ambient. Água vol. 20, pag, 1-13. https://doi.org/10.4136/ambi-agua.3060

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Avaliação do potencial do cacho de macaúba (*Acrocomia aculeata*) para a produção de pellets

Amanda Ladeira Carvalho[1]; Saulo Affonso Hygino[1]; Angélica de Cássia Oliveira Carneiro[1]; Fernanda de Jesus Jorge[1]; Felipe de Oliveira Morbi[2]; Ariane Mateus de Souza[1]; Êmilly Wakim de Almeida[1]; Camila Juliana Sampaio Pereira[1]

[1] Universidade Federal de Viçosa
[2] S.OLEUM

Resumo: A demanda por alternativas sustentáveis para a valorização de resíduos agroindustriais tem impulsionado sua utilização na produção de biocombustíveis sólidos. Nesse contexto, o cacho de macaúba (*Acrocomia aculeata*), resíduo gerado durante a exploração dessa palmeira, apresenta potencial para aplicação energética devido à sua natureza lignocelulósica. Este estudo avaliou o potencial do cacho de macaúba para a produção de pellets para bioenergia. Inicialmente, a biomassa foi caracterizada quanto às suas propriedades físicas, químicas e energéticas e, posteriormente, submetida ao processo de peletização. A biomassa apresentou teor de lignina de 32,57% e poder calorífico superior de 18,85 MJ kg^{-1}. Os pellets produzidos apresentaram durabilidade mecânica de 98,88%, teor de finos de 0,015% e aumento expressivo da densidade energética, favorecendo o armazenamento e o transporte. Os resultados demonstram que o cacho de macaúba constitui uma matéria-prima promissora para a produção de pellets, agregando valor a um resíduo agroindustrial e contribuindo para o fortalecimento da cadeia produtiva da macaúba.

Palavras-chave: Densificação; Engaço; Energia da biomassa

Evaluation of the Potential of Macaúba (*Acrocomia aculeata*) Bunches for Pellet Production

Abstract: The growing demand for sustainable alternatives for the valorization of agro-industrial residues has driven their use in the production of solid biofuels. In this context, the macaúba bunch (*Acrocomia aculeata*), a residue generated during the utilization of this palm, has potential for energy applications due to its lignocellulosic nature. This study evaluated the potential of macaúba bunches for pellet production for bioenergy purposes. Initially, the biomass was characterized in terms of its physical, chemical, and energy properties and subsequently subjected to the pelletization process. The biomass presented a lignin content of 32.57% and a higher heating value of 18.85 MJ kg^{-1}. The pellets produced exhibited a mechanical durability of 98.88%, a fines content of 0.015%, and a significant increase in energy density, favoring storage and transportation. The results demonstrate that macaúba bunches are a promising feedstock for pellet production, adding value to an agro-industrial residue and contributing to the strengthening of the macaúba production chain.

Keywords: Densification; Stalk; Energy of biomass

1. Introdução

A expansão da bioeconomia tem impulsionado o desenvolvimento de estratégias voltadas à valorização de biomassas residuais. Nesse contexto, resíduos agroindustriais deixam de ser considerados passivos ambientais e passam a representar importantes fontes renováveis para a produção de energia, contribuindo para a mitigação das emissões de gases de efeito estufa (Toplicean & Datcu, 2024).

A cadeia produtiva da macaúba (*Acrocomia aculeata*) já se insere no contexto da bioeconomia, destacando-se como uma das principais oleaginosas nativas com potencial para a produção de biocombustíveis de aviação no Brasil (Cabrera et al. 2022). Atualmente, estima-se que existam aproximadamente 1.000 ha de plantios comerciais de macaúba no país, com previsão de expansão para cerca de 180.000 ha até 2035. (Lanes et al., 2024; Acelem Renováveis, 2026). Entretanto, a expansão dos plantios comerciais tem sido acompanhada pela geração de resíduos lignocelulósicos, entre eles os cachos.

Estima-se que um hectare de cultivo de macaúba possa gerar aproximadamente 500 kg de cachos por ano (Dietrich, 2022), os quais permanecem, em grande parte, sem aproveitamento econômico (Cheah et al., 2023).

A valorização desses resíduos é fundamental para ampliar a eficiência do sistema produtivo, aumentar o aproveitamento da biomassa e fortalecer os princípios da bioeconomia circular e das biorrefinarias. (Pardo Cuervo et al., 2024).

Entre as alternativas de valorização, a peletização destaca-se por promover a densificação da biomassa, aumentando significativamente sua densidade energética e reduzindo os custos de transporte e armazenamento, além de proporcionar maior uniformidade de queima do combustível (Sarker at al., 2023).

No entanto, a definição de rotas tecnológicas adequadas para o aproveitamento do cacho de macaúba depende, primeiramente, do conhecimento de suas características físicas e químicas. A determinação dessas propriedades possibilita avaliar seu potencial para diferentes aplicações, especialmente para a produção de pellets, uma vez que influenciam diretamente o processo de densificação e a qualidade do biocombustível sólido obtido, incluindo propriedades como durabilidade mecânica, densidade energética e geração de finos (Oro et al., 2026; Silva et al., 2024).

Diante desse cenário, o presente trabalho teve como objetivo avaliar o potencial do cacho de macaúba para a produção de pellets para energia.

2. Material e métodos

Os cachos de macaúba (*Acrocomia aculeata*) utilizados neste estudo foram fornecidos pela empresa S.OLEUM. Após a coleta, o material foi mantido em ambiente externo, sob condições naturais, até atingir massa constante. Em seguida, os cachos foram processados em moinho martelo.

A caracterização da biomassa foi realizada por meio da determinação do teor de umidade em base seca, conforme a norma EN 14774-2 (DIN, 2009). A densidade a granel foi determinada de acordo com a norma EN 15103 (DIN, 2010a). O teor de materiais voláteis foi determinado conforme a ASTM E872-82(2019), o teor de cinzas conforme a ASTM D1102-84(2021), e o teor de carbono fixo foi calculado por diferença. Os teores de lignina insolúvel e lignina solúvel foram determinados de acordo com a norma TAPPI T222 om-02 e TAPPI um-250 (TAPPI, 2002), respectivamente. O teor de sílica foi determinado com base na norma TAPPI 244 om-11 (TAPPI, 1999). O teor de lignina total foi calculado a partir da soma da lignina solúvel e insolúvel, sendo que, na fração insolúvel, foi descontado o teor de sílica.

O teor de hidrogênio elementar foi determinado em analisador elementar TruSpec Micro da LECO, conforme a norma EN 15104 (DIN, 2011). O poder calorífico superior (PCS) foi obtido conforme a norma DIN EN 14918 (DIN, 2010b), utilizando-se uma bomba calorimétrica adiabática IKA C3000®.

O poder calorífico inferior (PCI) foi estimado a partir do PCS e do teor de hidrogênio da biomassa, conforme a Equação 1 (Brand, 2010):

$$PCI = PCS - 600 * (9 * H / 100) \qquad \text{Equação 1}$$

em que PCI é o poder calorífico inferior (MJ kg^{-1}), PCS é o poder calorífico superior (MJ kg^{-1}) e H é o teor de hidrogênio da biomassa (%).

O poder calorífico útil (PCU) foi calculado a partir do PCI e do teor de umidade do combustível, conforme a Equação 2 (Brand, 2010):

$$PCU = PCI * (u - 1) - 600 * u \qquad \text{Equação 2}$$

em que PCU é o poder calorífico útil (MJ kg^{-1}), PCI é o poder calorífico inferior (MJ kg^{-1}) e u é o teor de umidade em base úmida (fração decimal).

Os pellets foram produzidos utilizando uma prensa peletizadora laboratorial Amandus Kahl®, modelo 14-175, com capacidade de produção de aproximadamente 30 kg h^{-1}. A biomassa foi utilizada sem padronização granulométrica específica. O teor de umidade da biomassa utilizado neste ensaio correspondeu ao valor previamente determinado no estudo,

conforme a norma EN 14774-2 (DIN, 2009). Após a peletização, os pellets foram submetidos à caracterização física. A densidade a granel foi determinada de acordo com a norma EN 15103 (DIN, 2010a) e o teor de umidade em base seca foi obtido conforme a norma EN 14774-2 (DIN, 2009).

A durabilidade mecânica e a porcentagem de finos, definida como a fração de partículas com tamanho inferior a 3,15 mm, foram determinadas utilizando o equipamento Ligno-Tester Holmen®, conforme a norma DIN EN 15210-1 (DIN, 2010c).

A densidade energética (GJ m^{-3}) tanto da biomassa in natura quanto as dos pellets foi calculada pela multiplicação do PCU pela densidade a granel do material.

Os resultados foram expressos por meio da média e do coeficiente de variação das repetições realizadas.

3. Resultados e discussão

Na Tabela 1 estão apresentados os resultados da caracterização do cacho da macaúba.

Tabela 1 – Propriedades físicas, químicas e energéticas do cacho de macaúba

Propriedades	**Médias**	**CV (%)**
Umidade (%)	14,67	3,02
Densidade (kg m^{-3})	81,86	14,46
Materiais voláteis (%)	74,63	1,09
Carbono fixo (%)	20,54	2,87
Cinzas (%)	4,70	4,56
Sílica (%)	1,25	8,33
Lignina total (%)	32,57	1,44
Hidrogênio (%)	5,2	2,18
PCS (MJ kg^{-1})	18,85	0,93
PCI (MJ kg^{-1})	17,68	-
PCU (MJ kg^{-1})	14,85	-
Densidade energética (GJ/m^3)	1,21	-

O teor de umidade observado na biomassa é favorável ao processo de peletização. De acordo com Picchio et al (2023), teores entre aproximadamente 10 e 15% proporcionam melhores condições para a compactação da biomassa e favoreçam a atuação da lignina como agente ligante natural. A densidade aparente da biomassa reforça a importância da peletização, uma vez que materiais pouco densos apresentam limitações logísticas relacionadas ao transporte e armazenamento (Sarker et al., 2023).

O teor de materiais voláteis encontra-se dentro da faixa normalmente observada para biomassas lignocelulósicas, indicando elevada reatividade durante a combustão e favorecendo a ignição do combustível (Picchio et al., 2023; Diana et al., 2023). O teor de carbono fixo complementa esse comportamento, contribuindo para maior tempo de residência da chama e manutenção da liberação de energia durante a queima, características desejáveis para combustíveis sólidos destinados à geração de energia térmica (Picchio et al., 2023; Suwan et al., 2024).

O teor de cinzas foi superior ao encontrado em pellets de madeira (Pradhan et al., 2025), porém inferior ao reportado para outros resíduos agrícolas utilizados na produção de pellets. Biomassas como o pergaminho de café, por exemplo, frequentemente apresentam teores de cinzas superiores a 6%, podendo ultrapassar 8%, enquanto resíduos como bagaço de cana-de-açúcar e capim-elefante normalmente apresentam valores entre 3 e 7%, dependendo das condições de cultivo e processamento (Winter et al., 2025; Suwan et al., 2024). De forma semelhante, o cacho vazio da palma de óleo (*Elaeis guineensis*), apresenta teor de cinzas de 6,53%, superior ao observado para o cacho de macaúba (Diana et al., 2023).

O teor de sílica contribui para a composição mineral das cinzas e, juntamente com o teor de cinzas, influencia o desempenho da biomassa em processos termoquímicos. Elevadas concentrações desses constituintes reduzem a fração combustível da biomassa e podem favorecer a formação de incrustações, escórias e depósitos minerais, aumentando o desgaste e a necessidade de manutenção dos equipamentos de combustão (Zhou et al., 2023). Entretanto, o teor observado para o cacho de macaúba ainda se encontra dentro da faixa reportada para outras biomassas residuais amplamente estudadas para fins energéticos (Rupasinghe et al., 2023).

O teor de hidrogênio encontra-se dentro da faixa normalmente reportada para biomassas lignocelulósicas. Esse elemento é considerado no cálculo do poder calorífico inferior (PCI), pois durante a combustão forma vapor d'água, cujo calor latente não é recuperado em condições reais de utilização do combustível. Por esse motivo, o PCI e o poder calorífico útil (PCU) são inferiores ao poder calorífico superior (PCS), representando de forma mais realista a energia efetivamente disponível para geração de calor (Esteves et al., 2023).

O teor de lignina pode ser considerado elevado para uma biomassa residual, sendo semelhante aos valores médios encontrados em madeiras e superior aos normalmente reportados para resíduos agrícolas como o bagaço de cana-de-açúcar (Singh et al., 2022). Valores semelhantes também têm sido reportados para os cachos vazios da palma de óleo (*Elaeis guineensis*), resíduo lignocelulósico já utilizado para fins energéticos, indicando

potencial comparável para processos de densificação e produção de pellets (Diana et al., 2023; Cheah et al., 2023). Além de contribuir para o aumento do poder calorífico da biomassa, o elevado teor de lignina favorece o processo de peletização, uma vez que esse polímero atua como ligante natural durante a compactação, promovendo maior ligação entre as partículas e aumentando a resistência mecânica dos pellets.

Na Tabela 2 estão apresentados os resultados das propriedades dos pellets produzidos.

Tabela 2 – Propriedades físicas, mecânicas e energéticas do cacho de macaúba

Propriedades	**Médias**	**CV(%)**
Umidade (%)	15,19	0,56
Densidade (kg m^{-3})	651,91	1,26
Finos (%)	0,015	47,14
Durabilidade mecânica (%)	98,88	0,14
PCU (MJ kg^{-1})	14,64	-
Densidade energética (GJ/m^3)	9,54	-

O teor de umidade dos pellets obtidos está acima do limite recomendado para comercialização (≤10–12%), estabelecido pelas normas ISO 17225 e ENplus (ISO, 2021; ENplus, 2023), porém ainda é compatível com aplicações energéticas em sistemas de combustão de biomassa (Rupasinghe et al., 2023).

Os pellets apresentaram densidade a granel compatível com os requisitos estabelecido pelas normas internacionais para comercialização, evidenciando a eficiência da compactação e o potencial do material para reduzir custos de transporte e armazenamento. Como consequência da elevada densificação, a densidade energética aumentou de aproximadamente 1,21 para 9,54 GJ m^{-3}, representando um incremento de cerca de sete vezes em relação à biomassa in natura. Esse ganho é uma das principais vantagens da peletização, pois permite transportar maior quantidade de energia por unidade de volume, aumentando a eficiência logística da cadeia de suprimento de biomassa.

Os pellets apresentaram durabilidade mecânica e teor de finos que demonstram elevada resistência ao desgaste mecânico e baixa suscetibilidade à fragmentação durante o transporte e o armazenamento, reduzindo riscos de perdas de material, formação de poeira e problemas em sistemas automáticos de alimentação.

Esses resultados evidenciam que o cacho de macaúba apresenta potencial para a produção de pellets de alta resistência, sendo uma alternativa promissora para valorização energética desse resíduo no contexto da bioeconomia.

4. Conclusões

O cacho de macaúba apresentou potencial para a produção de pellets, com propriedades compatíveis com os requisitos de qualidade para biocombustíveis sólidos. A peletização promoveu aumento da densidade energética e resultou em pellets com elevada resistência mecânica, evidenciando o potencial desse resíduo para agregação de valor e inserção na cadeia da bioenergia.

5. Agradecimentos

À empresa S.OLEUM, aos laboratórios da tecnologia da madeira da UFV (LAPEM, LPM, LCP, LABRIF) e aos órgãos de financiamento: CNPq, CAPES, FAPEMIG, ao DEF/UFV, à EMBRAPII Unidade Fibras Florestais e às fundações de apoio à pesquisa da UFV (SIF, FUNARBE e FACEV).

6. Referências bibliográficas

Acelen Renováveis. *A nova era dos combustíveis renováveis*. Salvador, 2026. Disponível em: https://www.acelenrenovaveis.com.br/

American Society for Testing and Materials. (2019). *ASTM E872-82(2019): Standard test method for volatile matter in the analysis of particulate wood fuels*. ASTM International.

American Society for Testing and Materials. (2021). *ASTM D1102-84(2021): Standard test method for ash in wood*. ASTM International.

Brand, M. A. (2010). *Energia de biomassa florestal*. Interciência.

Cabrera, O. G., Grimaldi, L. M., Grimaldi, R., & Ribeiro, A. P. B. (2022). Macauba (*Acrocomia aculeata*): Biology, oil processing, and technological potential. In *Oilseed crops—Uses, biology and production*. IntechOpen.

Cheah, W. Y., Siti-Dina, R. P., Leng, S. T. K., Er, A. C., & Show, P. L. (2023). Circular bioeconomy in palm oil industry: Current practices and future perspectives. *Environmental Technology & Innovation, 30*, 103050.

Deutsches Institut für Normung. (2009). *DIN EN 14774-2: Solid biofuels—Determination of moisture content—Oven dry method—Part 2: Total moisture—Simplified method*. CEN.

Deutsches Institut für Normung. (2010a). *DIN EN 14774-1: Solid biofuels—Determination of moisture content—Oven dry method—Part 1: Total moisture—Reference method*. CEN.

Deutsches Institut für Normung. (2010b). *DIN EN 14918: Solid biofuels—Determination of calorific value*. CEN.

Deutsches Institut für Normung. (2010c). *DIN EN 15103: Solid biofuels—Determination of bulk density*. CEN.

Deutsches Institut für Normung. (2010d). *DIN EN 15210-1: Solid biofuels—Determination of mechanical durability of pellets and briquettes—Part 1: Pellets*. CEN.

Deutsches Institut für Normung. (2011). *DIN EN 15104: Solid biofuels—Determination of total content of carbon, hydrogen and nitrogen—Instrumental methods*. CEN.

Diana, R., Rusdianasari, & Kalsum, L. (2023). *The effect of palm shell and empty fruit bunch composition ratio on the quality of biopellets for co-firing*. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 1228, 012006.

Dietrich, O. H. S. (2022). *Nutrição mineral da cultura da macaúba: Curva de crescimento e sistema de recomendação de corretivos e fertilizantes* [Tese de doutorado, Universidade Federal de Viçosa].

ENplus®. (2023). *ENplus® handbook: Part 3—Pellet quality requirements* (Version 3.0). European Biomass Association.

Esteves, B., Sen, U., & Pereira, H. (2023). Influence of chemical composition on heating value of biomass: A review and bibliometric analysis. *Energies, 16*(10), 4226.

International Organization for Standardization. (2021). *ISO 17225-6:2021. Solid biofuels—Fuel specifications and classes—Part 6: Graded non-woody pellets*. ISO.

Lanes, E. et al.; Origem, dispersão, história e estado da arte da domesticação. In: Macaúba: Do Plantio À Colheita. [S. L.]: *Oficina de Texto*, 2024. P. 44.

Oro, C. E. D., Mulinari, J., De Oliveira, C. R. S., da Silva Júnior, A. H., Rodrigues, É. F., Dallago, R. M., & Tres, M. V. (2026). Next-generation biomass conversion: thermochemical methods for high-quality products. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, *20*(3), 1310-1332.

Pardo Cuervo, O. H., et al. (2024). Valorization of residual lignocellulosic biomass in South America: A review. *Environmental Science and Pollution Research, 31*, 44575–44607.

Picchio, R., et al. (2023). Pellet production from pruning and alternative forest biomass: A review of the most recent research findings. *Materials, 16*(13), 4689.

Pradhan, P., Mohan, O., Kurian, V., & Kumar, A. (2025). Production and quality analysis of biofuel pellets from Canadian forest and agricultural biomass. *Biomass and Bioenergy, 194*, 107697.

Rupasinghe, R. L., Perera, P., Bandara, R., Amarasekera, H., & Vlosky, R. (2023). Insights into properties of biomass energy pellets made from mixtures of woody and non-woody biomass: A meta-analysis. *Energies, 17*(1), 54.

Sarker, T. R., Nanda, S., Meda, V., & Dalai, A. K. (2023). Densification of waste biomass for manufacturing solid biofuel pellets: a review. *Environmental Chemistry Letters, 21*(1), 231-264.

Silva, T. A. L., Varão, L. H. R., & Pasquini, D. (2024). Lignocellulosic biomass. In *Handbook of biomass* (pp. 105-142). Singapore: Springer Nature Singapore.

Singh, A. D., Gajera, B., & Sarma, A. K. (2022). Appraising the availability of biomass residues in India and their bioenergy potential. *Waste Management, 152*, 38–47.

Suwan, K., et al. (2024). Biomass pellet processing from sugar industry byproducts: A study on pelletizing behavior and energy usage. *Sustainability, 16*, 6035.

TAPPI. (2002). *TAPPI T 222 om-02: Acid-insoluble lignin in wood and pulp*. TAPPI Press.

TAPPI. (2002). *TAPPI UM 250: Acid-soluble lignin in wood and pulp*. TAPPI Press.

TAPPI. (2011). *TAPPI T 244 om-11: Acid-insoluble ash in wood, pulp, paper and paperboard*. TAPPI Press.

Toplicean, I. M., & Datcu, A. D. (2024). An overview on bioeconomy in agricultural sector, biomass production, recycling methods, and circular economy considerations. *Agriculture, 14*(7), 1143.

Winter, S. G., et al. (2025). Sustainable solid biofuel production from coffee byproducts: Characterization and pelletization of husk and parchment. *Resources, 14*(12), 188.

337. Avanços e tendências no uso de nanopartículas de lignina para fotoproteção

Larissa Nara Nascimento de Miranda[1]; Cecília Baldoino Ferreira[1]; Wanderleia Ferreira Silva[1]; Jeymmy Rayena Alves Oliveira[1]; Edgard Geraldo Bertoli Trindade[1]; Maria Lucia Bianchi[1]

[1] Universidade Federal de Lavras (UFLA)

Resumo: A lignina, um dos principais subprodutos da indústria de polpa celulósica, destaca-se como um material renovável e de elevado potencial para aplicações de alto valor agregado. Na forma de nanopartículas, apresenta propriedades antioxidantes e elevada capacidade de absorção da radiação ultravioleta (UV), características que a tornam promissora como bloqueador UV em diferentes materiais, especialmente em revestimentos de papel para embalagens sustentáveis. Nesse contexto, este trabalho teve como objetivo realizar uma análise bibliométrica sobre o uso de nanopartículas de lignina como bloqueador de radiação UV, com ênfase em aplicações voltadas ao setor de embalagens de papel. A pesquisa foi conduzida por meio da análise de publicações científicas indexadas entre os anos de 2017 e 2026, avaliando a evolução temporal das pesquisas, os principais autores, periódicos, tendências de investigação, áreas de aplicação e lacunas existentes na literatura. Os resultados evidenciaram um crescimento expressivo no número de publicações ao longo do período analisado, impulsionado pela crescente demanda por materiais renováveis, sustentáveis e ambientalmente amigáveis. Além disso, foram identificadas oportunidades para ampliar as aplicações da lignina nanoparticulada, sobretudo no desenvolvimento de revestimentos com propriedades de proteção UV para embalagens de papel. Conclui-se que as nanopartículas de lignina representam uma alternativa promissora aos bloqueadores UV sintéticos, contribuindo para o desenvolvimento de materiais mais sustentáveis, embora ainda sejam necessárias pesquisas adicionais para superar desafios relacionados à sua aplicação e ampliar sua utilização em escala industrial.

Palavras-chave: Polímero; Radiação Ultravioleta; Análise Bibliométrica.

338. Advances and trends in the use of lignin nanoparticles for
339. photoprotection

Abstract: Lignin, one of the main by-products of the pulp industry, has attracted increasing attention as a renewable material with high potential for value-added applications. In the form of nanoparticles, lignin exhibits antioxidant properties and a high capacity to absorb ultraviolet (UV) radiation, making it a promising UV-blocking agent for a wide range of materials, particularly paper coatings for sustainable packaging. In this context, the present study aimed to perform a bibliometric analysis of the use of lignin nanoparticles as UV blockers, with emphasis on their application in paper packaging coatings. The analysis was based on scientific publications indexed between 2017 and 2026, evaluating the temporal evolution of research, the leading authors, journals, research trends, application areas, and existing knowledge gaps. The results revealed a significant increase in the number of publications throughout the analyzed period, driven by the growing demand for renewable, sustainable, and environmentally friendly materials. Furthermore, opportunities were identified to expand the application of lignin nanoparticles, especially in the development of UV-protective coatings for paper packaging. It can be concluded that lignin nanoparticles represent a promising renewable alternative to synthetic UV blockers, contributing to the development of more sustainable materials. However, further research is still required to overcome challenges related to their practical application and to enable their broader use on an industrial scale.

Keywords: Polymer; Ultraviolet Radiation; Bibliometric Analysis.

1. Introdução

a.

A crescente demanda por materiais sustentáveis e multifuncionais tem impulsionado pesquisas sobre biopolímeros renováveis de alto valor agregado. Nesse contexto, a lignina, segundo biopolímero mais abundante da Terra e coproduto da indústria de polpa e papel, destaca-se por sua elevada disponibilidade, propriedades antioxidantes, estrutura aromática e capacidade de absorção da radiação ultravioleta (UV) (Sipponen, 2026). Na forma de nanopartículas, a lignina apresenta elevado potencial como agente bloqueador de radiação UV, ampliando suas possibilidades de aplicação em diferentes contextos industriais e ambientais (Sadeghifar; Ragauskas, 2020).

O potencial das nanopartículas de lignina para bloqueio da radiação UV destaca-se em relação a outros materiais convencionais. Sua incorporação em filmes poliméricos para embalagens de alimentos e cosméticos proporciona proteção eficiente contra a degradação induzida pela radiação UV, contribuindo para a preservação da qualidade e o aumento da vida útil dos produtos (Sadeghifar; Ragauskas, 2020; Xing et al., 2019). Além disso, sua aplicação em revestimentos para materiais de construção, como tintas e selantes, aumenta a resistência e a

durabilidade desses materiais quando expostos à radiação solar (Beisl et al., 2017; Sadeghifar; Ragauskas, 2020).

A eficácia das nanopartículas de lignina no bloqueio UV pode ser atribuída a suas propriedades estruturais e químicas (Yang et al., 2018). A lignina possui uma estrutura química rica em grupos fenólicos, que são conhecidos por sua capacidade de absorver e dispersar a radiação UV. Esta estrutura complexa permite que as nanopartículas de lignina não apenas absorvam a radiação UV, mas também dispersem a energia, minimizando a transmissão da radiação para os materiais subjacentes (Sadeghifar; Ragauskas, 2020).

Os avanços na nanotecnologia ampliaram as aplicações da lignina por meio da produção de nanopartículas, que apresentam maior área superficial, elevada estabilidade coloidal e melhor dispersão em diferentes matrizes em comparação à lignina convencional. Essas características aumentam sua eficiência como bloqueador UV, tornando as nanopartículas de lignina uma alternativa promissora aos absorvedores sintéticos utilizados em polímeros, revestimentos, embalagens, cosméticos e outros materiais expostos à radiação solar (Xing et al., 2019).

Além do bloqueio da radiação UV, as nanopartículas de lignina apresentam funcionalidade promissora em compósitos de biopolímeros, contribuindo para a melhoria das propriedades mecânicas e térmicas por meio do fortalecimento da interação com a matriz polimérica (Beisl et al., 2017). Essa multifuncionalidade torna esse material uma alternativa sustentável para diversas aplicações industriais, incluindo embalagens e componentes estruturais para a construção civil (Beisl et al., 2020; Sipponen, 2026).

Apesar do potencial das nanopartículas de lignina, a literatura científica sobre sua aplicação como bloqueador UV ainda é limitada. Embora o interesse pelo tema tenha crescido nos últimos anos, impulsionado pela busca por soluções renováveis que aliem proteção contra a radiação UV, redução do impacto ambiental e valorização de resíduos industriais, ainda há lacunas quanto à evolução da pesquisa, aos principais grupos de investigação, às tendências emergentes e aos desafios tecnológicos. Nesse contexto, estudos bibliométricos são essenciais para mapear a produção científica, identificar autores, instituições, periódicos e redes de colaboração, além de reconhecer tendências e lacunas do conhecimento. Assim, este trabalho teve como objetivo realizar uma análise bibliométrica da literatura sobre o uso de nanopartículas de lignina como bloqueadores de radiação UV, com ênfase na evolução das

publicações nos últimos cinco anos, nos principais autores científicos e nas perspectivas de desenvolvimento da área.

2. Material e métodos

b.

A análise bibliométrica foi baseada na avaliação quantitativa de indicadores científicos extraídos de um conjunto previamente definido de publicações, com o objetivo de organizar e analisar a produção científica relacionada ao uso de nanopartículas de lignina como bloqueadores de radiação ultravioleta (UV). Os parâmetros analisados compreenderam os artigos selecionados, suas referências, autores, número de citações e os periódicos de publicação.

A seleção do portfólio bibliográfico foi realizada por meio do método ProKnow-C *(Knowledge Development Process – Constructivist)*, conforme descrito por Munaro et al. (2024). O método ProKnow-C é composto por quatro etapas: seleção do portfólio bibliográfico, análise bibliométrica, análise sistêmica e definição da pergunta de pesquisa, do objetivo geral e dos objetivos específicos, conforme ilustrado na Figura 1.

Previamente à busca bibliográfica, foram definidos os descritores *nanoparticles*, *lignin* e *UV blocker*, combinados por meio do operador booleano *AND*, resultando na estratégia de busca *(nanoparticles AND lignin AND UV blocker)*. A pesquisa foi realizada na base de dados Web of Science, por sua ampla cobertura de periódicos científicos de relevância internacional e pela disponibilização de informações adequadas para estudos bibliométricos.

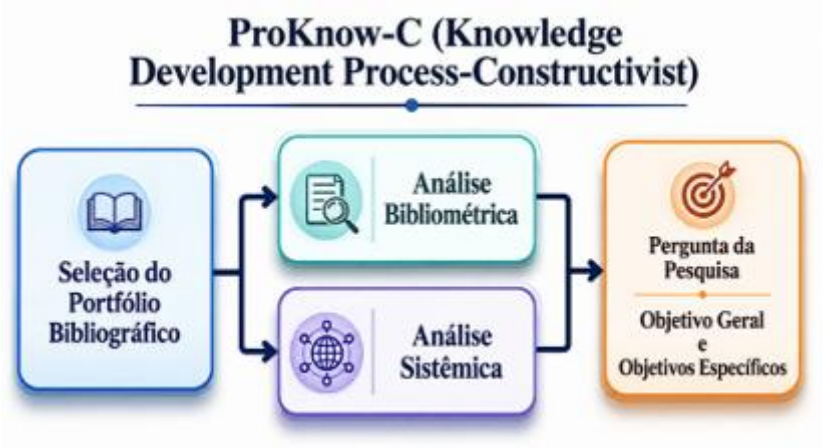


Figura 1 – Etapas do processo ProKnow-C.

A seleção do material bibliográfico foi realizada de forma sistemática, considerando artigos científicos publicados entre janeiro de 2017 e maio de 2026. Esse intervalo corresponde ao período da primeira publicação encontrada na base de dados utilizada até a data de realização da coleta dos dados, permitindo analisar a evolução da produção científica desde as pesquisas iniciais até os estudos mais recentes disponíveis.

Após a definição do portfólio bibliográfico, os registros foram exportados para o *software* VOSviewer, utilizado para a construção e análise das redes bibliométricas. Nessa etapa, foram analisadas as redes de coautoria entre os autores e a coocorrência de palavras-chave, além de indicadores relacionados ao número de citações e aos periódicos de publicação, permitindo identificar as principais tendências e a evolução das pesquisas na área.

3. Resultados e discussão

c.

Após a realização da busca bibliográfica, foram identificados 18 resultados na coleção principal da *Web of Science* para a expressão de busca (*nanoparticles AND lignin AND UV blocker*), dos quais 4 correspondiam a artigos de revisão. Os artigos selecionados (Tabela 1) foram organizados e ranqueados em ordem decrescente de número de citações, sendo posteriormente numerados e classificados de acordo com sua principal área de aplicação das nanopartículas de lignina como bloqueadores de radiação UV.

Tabela 1 - Classificação dos artigos identificados

Nº	Título do artigo	Principal aplicação
1	*Lignin as a UV Light Blocker – A Review*	Revisão sobre lignina como bloqueador UV
2	*Biodegradable UV-Blocking Films through Core-Shell Lignin-Melanin Nanoparticles in Poly (butylene adipate-co-terephthalate)*	Filmes biodegradáveis para embalagens
3	*Lignin from Micro- to Nanosize: Applications*	Revisão de aplicações de lignina micro e nanoestruturada
4	*Natural Components in Sunscreens: Topical Formulations with Sun Protection Factor (SPF)*	Cosméticos e protetores solares
5	*Facile and Green Preparation of High UV-Blocking Lignin/Titanium Dioxide Nanocomposites for*	Protetores solares

Nº	Título do artigo	Principal aplicação
	Developing Natural Sunscreens	
6	*Preparation and Application of Light-Colored Lignin Nanoparticles for Broad-Spectrum Sunscreens*	Protetores solares
7	*Enhancing the Broad-Spectrum Adsorption of Lignin through Methoxyl Activation, Grafting Modification, and Reverse Self-Assembly*	Modificação da lignina para proteção UV
8	*Lignin Nanoparticles with High Phenolic Content as Efficient Antioxidant and Sun-Blocker for Food and Cosmetics*	Cosméticos e embalagens alimentícias
9	*State-of-the-Art: Applications and Industrialization of Lignin Micro/Nano Particles*	Revisão e aplicações industriais
10	*Recent Progress on the Development of Lignin as Future Ingredient Biobased Cosmetics*	Cosméticos de base biológica
11	*Potential of Lignin Multifunctionality for a Sustainable Skincare: Impact of Emulsification Process Parameters and Oil-Phase on the Characteristics of O/W Pickering Emulsions*	Cosméticos e cuidados com a pele
12	*Whey Protein Isolate and Kraft Lignin Multifunctional Films for Potential Food Packaging Application: UV Block and Antioxidant Potential*	Embalagens para alimentos
13	*Spruce Bark Stilbenes as a Nature-Inspired Sun Blocker for Sunscreens*	Protetores solares
14	*Improvement of UV Stability of Thermoplastic Starch Matrix by Addition of Selected Lignin Fraction – Photooxidative Degradation*	Polímeros e materiais biodegradáveis
15	*The Impact of Lignin Biopolymer Sources, Isolation, and Size Reduction from the Macro- to Nanoscale on the Performances of Next-Generation Sunscreen*	Protetores solares
16	*Biobased Hyperbranched Polyesters as Effective Non-Leachable UV Blockers for Sunscreens*	Protetores solares
17	*Lignin Nanoparticles with Improved Dispersive*	Produtos de proteção individual

Nº	Título do artigo	Principal aplicação
18	*Stability as Multifunctional Sun-Blocker for Human Wearable Protection Products* *Ultrasonic Cavitation Driven Fabrication of Organic Solvent Free Lignin/Prochloraz Nanocapsules to Promote Resistance to Photolysis and Rain Wash, and Provide Extended-Release Performance*	Formulações agrícolas

A distribuição anual das publicações é apresentada na Figura 2. Entre 2017 e 2018, observou-se estabilidade, com um artigo publicado por ano. A partir de 2019, houve crescimento gradual, com duas publicações anuais em 2019 e 2020, seguido por novo aumento em 2021, quando foram registrados três artigos. Em 2022, verificou-se redução para uma publicação, enquanto 2023 apresentou o maior número de estudos da série histórica, com cinco artigos. Nos anos de 2024 e 2025, foram identificadas duas publicações anuais. Até a realização da busca bibliográfica, não foram encontradas publicações em 2026 que correlacionassem as palavras-chave pesquisadas.

Figura 2 – Número de publicações por ano no período entre 2017 e 2026.

Em relação aos periódicos de publicação, os periódicos *Polymers*; *ACS Sustainable Chemistry & Engineering* e destacaram-se por apresentarem o maior número de publicações relacionadas ao tema, com três artigos cada. Em seguida, o periódico *International Journal of Biological Macromolecules* apresentou duas publicações. A distribuição de artigos por periódico é apresentada na Tabela 2.

A concentração de publicações em determinados periódicos indica sua relevância e prestígio na área, além de refletir tendências temáticas, maior atuação de pesquisadores e facilidades de disseminação científica, especialmente em revistas como *Polymers* e *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, que evidenciam áreas consolidadas e emergentes de pesquisa e inovação. O número de citações recebidas por artigo dos diferentes autores também é apresentado na Figura 3.

Destacam-se Sadeghifar, H. e Ragauskas, A. como autores mais citados, com mais de 350 citações. Em seguida, Q. Q. Xing e S. Beisl apresentam cerca de 200 e 150 citações, respectivamente, evidenciando significativa influência em suas áreas de pesquisa.

Tabela 2 – Publicações por Periódicos

Nº	Primeiro autor	Citações	DOI	Periódico	JCR (2024)
1	Sadeghifar, H.; Ragauskas, A.	353	10.3390/polym12051134	*Polymers*	4.9
2	Xing, Q.Q.	208	10.1021/acssuschemeng.8b05755	*ACS Sustainable Chemistry & Engineering*	7.3
3	Beisl, S.	154	10.3390/ijms18112367	*International Journal of Molecular Sciences*	4.9
4	He, H.L.	120	10.1016/j.biopha.2020.111161	*Biomedicine & Pharmacotherapy*	7.5
5	Yu, J.	79	10.1021/acs.iecr.8b04101	*Industrial & Engineering Chemistry Research*	3.9
6	Lee, S.C.	72	10.3390/polym12030699	*Polymers*	4.9
7	Wu, Y.	72	10.1021/acssuschemeng.9b02317	*ACS Sustainable Chemistry & Engineering*	7.3
8	Yu, H.A.	51	10.1021/acssuschemeng.2c06070	*ACS Sustainable Chemistry & Engineering*	7.3
9	Chen, K.	47	10.1002/cssc.202002441	*ChemSusChem*	6.6
10	Ariyanta, H.A.	45	10.1016/j.scp.2022.100966	*Sustainable Chemistry and Pharmacy*	5.8
11	Gordobil, O.	31	10.1016/j.ijbiomac.2023.123561	*International Journal of Biological Macromolecules*	8.5
12	Silva, K.F.	28	10.1016/j.fbio.2023.102581	*Food Bioscience*	5.9
13	Dou, J.Z.	20	10.1039/d2gc00287f	*Green Chemistry*	9.2
14	Rodrigues, J.S.	14	10.1016/j.ijbiomac.2023.123142	*International Journal*	8.5

Nº	Primeiro autor	Citações	DOI	Periódico	JCR (2024)
15	Girard, V.	12	10.3390/polym16131901	*of Biological Macromolecules Polymers*	4.9
16	Subramaniyan, S.	2	10.1002/mame.202500085	*Macromolecular Materials and Engineering*	4.6
17	Huang, K.J.	1	10.1016/j.colsurfa.2025.137999	*Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*	5.4
18	Chen, J.T.	1	10.1515/hf-2020-0120	*Holzforschung*	1.6

A distribuição desigual das citações entre os autores pode estar associada a fatores como relevância científica, visibilidade das publicações, impacto do tema estudado e abrangência da comunidade acadêmica envolvida e, a análise da relação entre número de publicações e frequência de citações demonstra que os autores mais citados nem sempre são aqueles com maior volume de trabalhos publicados. Esse resultado evidencia que a relevância, a qualidade e o caráter inovador das pesquisas podem exercer maior influência no impacto científico do que a quantidade de publicações. Em contrapartida, autores com produção acadêmica mais extensa nem sempre apresentam o mesmo nível de reconhecimento em citações, indicando que a visibilidade e a importância temática dos estudos também desempenham papel fundamental no alcance científico das publicações.

Em relação a análise das palavras-chave empregadas pelos autores nas publicações, foram identificados um total de 71 termos correlacionados entre os artigos. Esses termos foram agrupados em 10 redes de correlação, também denominadas *clusters*. O gráfico de coocorrência das palavras-chave está ilustrado na Figura 3:

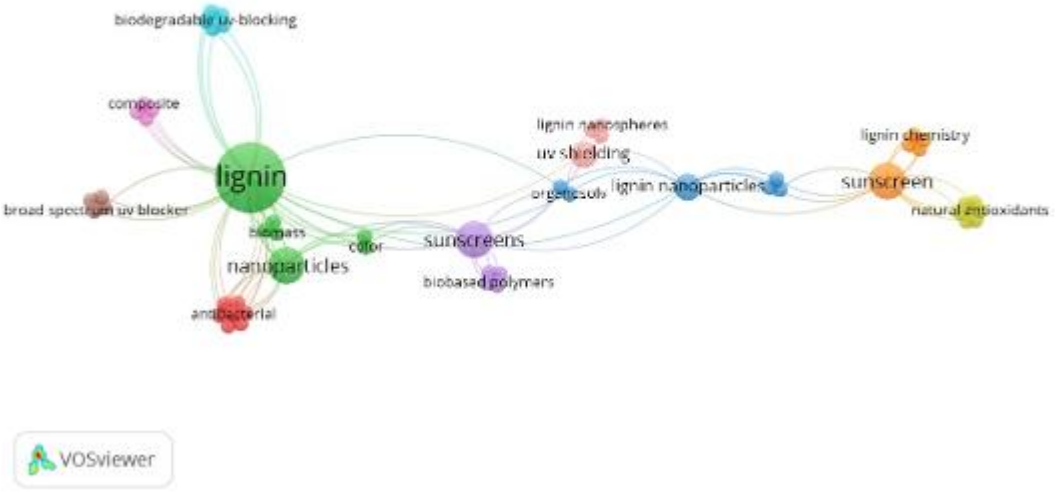


Figura – Palavras-chaves/Co-ocorrência.

Conforme o mapa de densidade (Figura 4), observa-se elevada concentração de termos como *lignin*, *nanoparticles*, *biomass*, *sunscreens*, *broad-spectrum UV blocker*, *natural antioxidants* e *composite*, indicando que esses conceitos constituem o núcleo temático das pesquisas sobre nanopartículas de lignina como bloqueadores de radiação UV. A forte ocorrência do termo *lignin* evidencia que esse biopolímero permanece como o principal objeto de investigação, enquanto a associação com *nanoparticles* demonstra que a nanoestruturação tem sido amplamente explorada como estratégia para potencializar propriedades como estabilidade, dispersão e capacidade de absorção da radiação UV. A proximidade entre os termos *biomass* e *lignin* reflete a crescente valorização de matérias-primas renováveis e do aproveitamento de coprodutos da indústria de polpa, em consonância com os princípios da economia circular e do desenvolvimento de materiais sustentáveis. Esse resultado demonstra que as pesquisas têm buscado não apenas substituir absorvedores UV sintéticos, mas também agregar valor à biomassa lignocelulósica por meio de aplicações de maior valor tecnológico.

Da mesma forma, a associação entre *sunscreens*, *broad-spectrum UV blocker* e *natural antioxidants* evidencia que as investigações concentram-se na exploração simultânea das propriedades fotoprotetoras e antioxidantes da lignina.

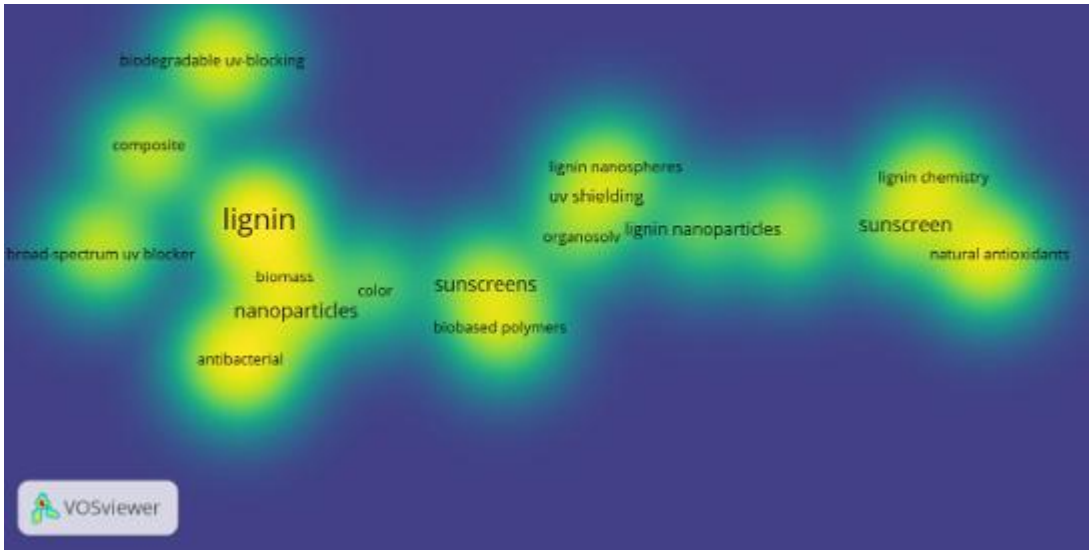


Figura 4 – Palavras-chaves/Correlação predominate.

Além disso, a presença dos termos *composite* e *biobased polymers* indica que as pesquisas têm evoluído da caracterização das nanopartículas para sua incorporação em matrizes poliméricas, evidenciando uma tendência ao desenvolvimento de materiais multifuncionais. Essa evolução demonstra que o foco da área não se restringe ao bloqueio da radiação UV, mas também contempla o aprimoramento das propriedades mecânicas, térmicas e de durabilidade dos materiais, ampliando as possibilidades de aplicação industrial das nanopartículas de lignina. Um exemplo importante é o estudo sobre revestimentos contendo nanopartículas de lignina e amido catiônico aplicados em papel, no qual foi relatada redução superior a seis vezes na taxa de transmissão de vapor d'água, além de elevada resistência à água e óleo, indicando elevado potencial para embalagens sustentáveis.

Embora a aplicação em papel para embalagem seja recorrente nos estudos analisados, esse termo pode não ser observado de forma destacada na imagem de coocorrência de palavras-chave, uma vez que a geração da imagem ocorre com base na frequência de ocorrência dos termos nas pesquisas. Dessa forma, termos mais amplamente utilizados pelos autores como *sunscreens* tendem a apresentar maior evidência visual, enquanto aplicações mais específicas, como *paper packaging*, podem aparecer com menor destaque ou não serem identificadas como termos principais.

4. Conclusões

A análise bibliométrica evidenciou que o uso de nanopartículas de lignina como bloqueadores de radiação UV constitui uma área em expansão, impulsionada pela demanda por materiais sustentáveis e multifuncionais. O estudo identificou as principais tendências, autores, periódicos e temas de pesquisa, fornecendo uma visão abrangente do estado da arte e das lacunas existentes. Embora avanços significativos tenham sido alcançados, ainda são necessários estudos voltados à aplicação industrial, especialmente em revestimentos para papel e embalagens. Assim, este trabalho contribui para orientar futuras pesquisas e reforça o potencial das nanopartículas de lignina como alternativa sustentável aos bloqueadores UV convencionais.

5. Agradecimentos

Agradecemos às agências de fomento CAPES, FAPEMIG e CNPq pelo apoio financeiro e incentivo à pesquisa.

6. Referências bibliográficas

Beisl, S., Friedl, A., & Miltner, A. (2017). Lignin from micro- to nanosize: Applications. International Journal of Molecular Sciences, *18*(11), 2367. https://doi.org/10.3390/ijms18112367

Munaro, H. L. R., Munaro, S. A. P., & Souza, A. A. (2024). Using bibliometrics as a literature review method: Knowing ProKnow-C. Cenas Educacionais, 7, e17037. https://doi.org/10.5281/zenodo.13766140

Sadeghifar, H., & Ragauskas, A. (2020). Lignin as a UV light blocker—A review. Polymers, *12*(5), 1134. https://doi.org/10.3390/polym12051134

Sipponen, M. H. (2026). Leveraging the molecular complexity of lignin for high-performance bio-based materials. Nature Reviews Materials, *11*(4), 255–257. https://doi.org/10.1038/s41578-026-00910-w

VOSviewer. (2023). VOSviewer (Versão 1.6.20). https://www.vosviewer.com

Web of Science. (2026). Web of Science database. https://www.webofscience.com

Xing, Q., et al. (2019). Facile preparation of uniform lignin nanospheres with natural ultraviolet absorption and excellent biocompatibility. ACS Sustainable Chemistry & Engineering, *7*(4), 4147–4155. https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.8b05755

Yang, W., Fortunati, E., Gao, D., Balestra, G. M., Giovanale, G., He, X., Torre, L., Puglia, D., & Kenny, J. M. (2018). Valorization of acid isolated high yield lignin nanoparticles as innovative antioxidant/antimicrobial organic materials. ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 6(3), 3502–3514. https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.7b03754

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

340. BiocarvãodeResíduosFlorestaisModificadocomFerroeCobreparaDegradação de Contaminantes Ambientais

PedroNascimentoTavaresIzola[1],BrunoHenriqueSacomanTorquatodaSilva[1],Regina Maria Gomes[1], Edmar Isaias de Melo[1]

[1]UniversidadeFederaldeUberlândia(UFU)

Resumo: Resíduos florestais podem originar materiais funcionais para biorrefinariasetratamento de efluentes. Objetivou-se sintetizar um catalisador de biocarvão de cascade*Eucalyptus*sp. modificado com ferro e cobre e avaliar a remoção colorimétrica do azuldemetileno.Abiomassafoipirolisadaa300°Cpor1h,tratadacom$HNO_3$0,10molL^{-1},impregnada com Fe^{3+}e Cu^{2+}(0,0375 mol L^{-1}; Fe:Cu = 1:1) e repirolisada a 500 °Cpor1h,originandoBC@Fe@Cu.Aconcentraçãoresidualfoideterminadaporanálisedigitaldeimagememcâmaracomiluminaçãocontrolada.Umplanejamento2^3compontocentral avaliou pH, H_2O_2e dosagem de catalisador. Na condição cinética fotoassistida(2,0g L^{-1} de BC@Fe@Cu, 1,0 mmol L^{-1} de H_2O_2e pH inicial 7,3), obteve-se 90% de decolorização em 60 min; o BMG apresentou o maior R^2 (0,987). O material mostrou potencial para tratamento complementar, mas degradação e mineralização requerem confirmação específica.

Palavras-chave: Biorrefinaria;ProcessosOxidativosAvançados;AzuldeMetileno.

a. IRON-ANDCOPPER-MODIFIEDBIOCHARFROMFORESTRESIDUESFOR THE DEGRADATION OF ENVIRONMENTAL CONTAMINANTS

Abstract: Forestresiduescanyieldfunctionalmaterialsforbiorefineriesandwastewatertreatment. This study synthesized an iron- and copper-modified biochar catalystfrom*Eucalyptus*sp. bark and evaluated the colorimetric removal of methylene blue. The biomass was pyrolyzed at 300 °C for 1 h, treated with 0.10 mol L^{-1} HNO_3, impregnatedwith $Fe^{3+}$and Cu^{2+}(0.0375 mol L^{-1}; Fe:Cu = 1:1), and repyrolyzed at 500 °C for 1 htoobtain BC@Fe@Cu. Residual concentration was determined by digital image analysisunder controlled illumination. A 2^3 factorial design with a center point evaluatedpH,H_2O_2, and catalyst dosage. Under the photo-assisted kinetic condition (2.0 g L^{-1}BC@Fe@Cu, 1.0 mmol L^{-1} H_2O_2, and initial pH 7.3), 90% decolorization was obtainedin 60 min; BMG showed the highest R^2 (0.987). The

material showed potential for com-plementary treatment, but degradation and mineralization require specific confirmation.

Keywords: Biorefinery;AdvancedOxidationProcesses;MethyleneBlue.

1. Introdução

A cadeia produtiva florestal gera cascas, serragem, cavacos finos e outros resíduos lignocelulósicos. Embora uma parcela seja destinada à geração de calor e energia,aconversãotermoquímicapermiteobtersólidoscarbonáceoseampliarovaloragregado

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

desses fluxos, em consonância com o conceito de biorrefinaria (Vamvuka et al.,2023;Pires et al., 2026).

Acascade*Eucalyptus*sp.éabundantenosetorflorestalbrasileiroepodeserconvertida em biocarvão por pirólise sob disponibilidade limitada de oxigênio. O processoconcentracarbonoealteragruposfuncionaisefraçãomineral;posteriormente,tratamentos oxidativos podem ajustar a química superficial, enquanto a impregnação metálicaintroduz sítios catalíticos (Xin et al., 2021; Li et al., 2024; Pires et al., 2026).

Essaspropriedadesconectamavalorizaçãodabiomassaaotratamentodeefluentes, pois o biocarvão pode concentrar moléculas orgânicas junto à superfície e atuar como suporte condutor para espécies metálicas. O azul de metileno é empregadocomomolécula modelo por apresentar cromóforo intenso e permitir comparar a remoção colorimétrica em sistemas oxidativos; catalisadores Cu–Fe suportados em carbono já demonstraram atividade sobre esse corante (Zhao et al., 2021).

Nos processos Fenton-like heterogêneos, Fe e Cu ativam H_2O_2por ciclosFe^{2+}/Fe^{3+}e Cu^{+}/Cu^{2+}. •OH costuma predominar, enquanto $^1O_2$e O_2•$^-$podemcontribuir.O suporte carbonáceo favorece transferência eletrônica, mas as espécies reativas dependem do material, pH e irradiação e devem ser verificadas experimentalmente (Xin etal.,2021; Liu et al., 2022; Li et al., 2024).

Diante disso, objetivou-se sintetizar um catalisador de biocarvão obtido de cascade*Eucalyptus*sp., modificado com ferro e cobre, e avaliar seu desempenho na decoloração de azul de metileno em condição Fenton-like heterogênea fotoassistida.

2. Materialemétodos

2.1 Produçãodobiocarvãoesíntesedocatalisador

Cascasresiduaisde*Eucalyptus*sp.foramcoletadasemumaunidadedeprocessamento de cavacos e serragem, em Monte Carmelo, Minas Gerais, trituradas em ForagierTRE30 e secas a 70 °C por 24 h. Em recipiente metálico fechado, empregado como reator de batelada, a biomassa foi aquecida em mufla Zezimaq a 300 °C e mantida por 1hapós estabilização. Temperatura inicial e taxa de aquecimento não foram registradas;portanto, 1 h corresponde ao patamar isotérmico. Após resfriamento, o sólido foi tritu-rado, peneirado a 0,50 mm e denominado BC300.

BC300 (20,0 g) foi tratado com 150 mL de $HNO_3$0,10 mol L^{-1}, sob agitaçãomagnética contínua em equipamento Hanna, por 12 h, a aproximadamente 25 °C eemrecipiente fechado. O pH inicial da suspensão não foi registrado. O material foi filtrado

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

e lavado com água deionizada até pH 7,0 no filtrado, medido em pHmetro LineLab,eseco a 90 °C por 24 h, originando BC300–HNO_3.

Uma massa do BC300–HNO_3seco foi impregnada com $FeCl_3 \cdot 6H_2O$ e Cu-$SO_4 \cdot 5H_2O$, ambos a 0,0375 mol L^{-1}, conforme Xin et al. (2021). Massa transferidaevolumesindividuaisnãoconstavamnoregistroexperimental;Fe:Cu=1:1indicaapenasa razão molar nominal das soluções. A suspensão foi agitada por 30 min, mantidaemrepouso por 24 h, filtrada, seca a 70 °C por 24 h e repirolisada em cadinho de porcelanatampado a 500 °C por 1 h, originando BC@Fe@Cu.

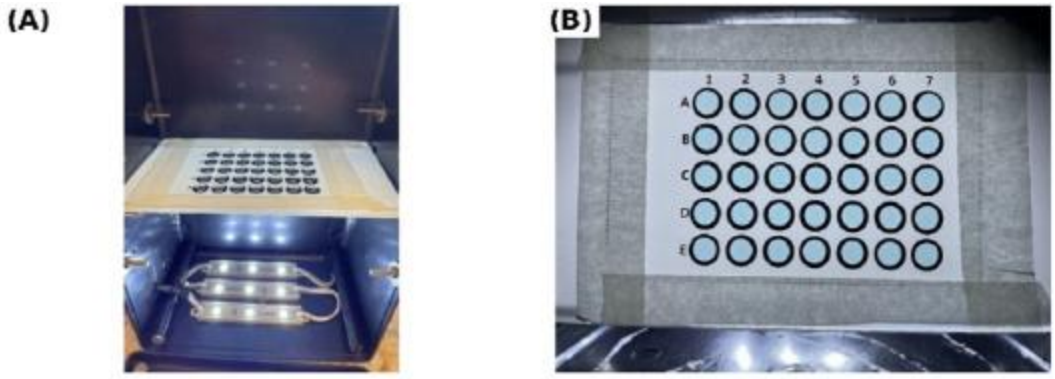
2.2 Soluçõesquímicas

Foramutilizadosreagentesdegrauanalíticoeáguadeionizada.Preparou-sesolução estoque de azul de metileno a 1000 mg L^{-1} e solução estoque de H_2O_2a 1000mmolL^{-1},

posteriormente diluídas de acordo com cada ensaio. As soluções de $FeCl_3 \cdot 6H_2O$, $CuSO_4 \cdot 5H_2O$ e HNO_3 foram preparadas nas concentrações descritas na síntese.

2.3 Câmaradeanálisedeimagem

A câmara foi construída em caixa de polietileno preto (18 × 15 × 9 cm; altura×largura × profundidade). Nove emissores de LED branco, distribuídos em três barrasnabase, foram alimentados por fonte de 9 V regulada por potenciômetro; o diâmetro individualnãoconstavanoregistroexperimental.Umaplacadevidrode14,0×8,0cme1,5mm de espessura, recoberta por filme difusor branco, sustentou uma microplaca de35poços circulares (6 mm; 50 µL), impressa em filme de poliéster transparente.



Câmaradeanálisedeimagem:(A)vistainternacomiluminaçãocontrolada;(B)microplacade35poços.

Atampafoifechadaporímãs,reduzindoainterferênciadeluzexterna,erecebeuabertura circular de 2 cm para posicionamento da câmera do smartphone. Os arquivosoriginaisforamtransferidosaocomputadoreprocessadosnoImageJporrotinaemJava.Paracadagota,registrou-seaintensidademédiaInocanalselecionadoecalculou-se

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

RPA = 255 − I. A correção de fundo foi obtida em regiões externas à gota por Branco=255 − Ibranco; o sinal final correspondeu a RPA − Branco.

Auniformidadeespacialdacâmarafoiavaliadacomfucsinaácidaa25,0mgL^{-1}.Avalidaçãocolorimétricautilizoucurvasdefucsinaácidaentre1e5mgL^{-1}porimagemdigital e entre 0,5 e 4 mg L^{-1} por espectrofotometria UV–Vis. Os sinais foram ajustadospor regressão linear.

2.4 Planejamentofatorialeanáliseestatística

A influência do pH, da concentração de H_2O_2e da dosagem de BC@Fe@Cufoiavaliadaemplanejamentofatorial2^3,acrescidodetriplicatanopontocentral,totalizando11 ensaios em batelada (Tabela 1). A resposta foi a decolorização percentual do azuldemetileno após 60 min, a partir de concentração inicial de 10 mg L^{-1}, em temperaturaaproximada de 25 °C.

Tabela1–Variáveiseníveisdoplanejamento2^3paraoprocessoFenton-likeheterogêneo.

Variáveis	Níveis		
	−1	**0**	**+1**
ConcentraçãodeH₂O₂(mmolL⁻¹)	1,0	5,0	9,0
Dosagemdecatalisador(gL⁻¹)	1,0	2,0	3,0
pH	3,0	5,0	7,0

Os oito pontos fatoriais foram usados para estimar efeitos principais e interaçõesnosfatorescodificados;astrêsrepetiçõescentraisestimaramavariabilidadeexperimental.Assuperfíciesforamobtidasporajustepolinomialnosoftware Reavaliadaspor R^2,inspeçãodosresíduosecoerênciafísica.Devidoàestruturadodelineamento,ainterpretação foi exploratória, restrita ao domínio estudado e sem extrapolação. Para a uniformidadedacâmara,asregiõesforamcomparadasporANOVAseguidadotestedeTukeya 5%, além do coeficiente de variação.

2.5 Estudocinético

A cinética foi avaliada em 0, 1, 2, 3, 4, 5, 7, 9, 11, 13, 15, 20, 25, 30, 40, 50 e60min, com três réplicas analíticas por tempo. Usaram-se azul de metileno a 10 mg L^{-1},BC@Fe@Cu a 2,0 g L^{-1} e H_2O_2a 1,0 mmol L^{-1}, em pH inicial 7,3, sob agitação,luzsolarnaturaleaproximadamente25°C.Comoairradiânciannãofoimonitorada,osdadosrepresentam condição fotoassistida e não isolam a reação no escuro.

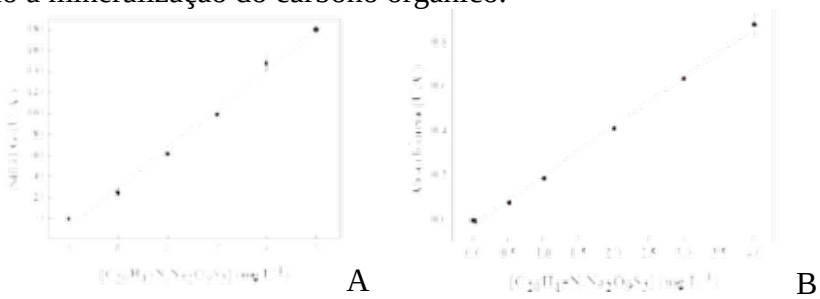
Em cada tempo, coletou-se alíquota de 1,0 mL, separando o catalisador por passagem reversa em ponteira preenchida com fibras de poliéster. O filtrado foidistribuídoem três poços e analisado na câmara. A concentração foi estimada pela curva de azuldemetileno preparada em 1,0; 5,0; 10,0 e 20,0 mg L^{-1}. A decolorização foi calculadapor$100\cdot(C_0 - C_t)/C_0$.

3. Resultadosediscussão

3.1 Desempenhodaanálisedigitaldeimagem

Com 50 µL por poço, tensão de 9,6 V e placa posicionada a 10 cm dos LEDs,aleitura da fucsina ácida apresentou coeficiente de variação de 6,77%. Não houve diferença significativa entre as regiões pelo teste de Tukey a 5%, indicando iluminação suficientemente uniforme para a rotina analítica.

A curva porimagem digital,entre 1e 5 mgL^{-1}, foidescrita porSinal G =37,4·C − 8,06, com R^2 = 0,99. A curva por UV–Vis, entre 0,5 e 4 mg L^{-1}, apresentou ABS=0,22·C − 0,022 e R^2 = 0,99 (Figura 1). A linearidade obtida pelos dois métodos sustentao uso da câmara para monitorar a concentração residual. Métodos recentes baseadosemsmartphone também alcançaram elevada correspondência com espectrofotometrianoacompanhamento de corantes em água, desde que iluminação e geometria sejam controladas(Cardozoetal.,2025).Ressalta-sequeaperdadecorquantificaodesaparecimentodo cromóforo, não a mineralização do carbono orgânico.



A B

Figura1–Curvasdecalibraçãodafucsinaácidapor:(A)análisedigitaldeimagem; (B)espectrofotometriaUV–Vis.

3.2 Planejamentofatorial

As superfícies indicaram maior sensibilidade da resposta ao pH e à dosagemdecatalisadorqueaoH_2O_2(Figura2).EmH_2O_2×pHecatalisador×pH(Figura2A–

D),asmaioresrespostasprevistasocorreram,emgeral,entrepH5e6.OpHalteraaespeciaçãometálica,opotencialredoxeacargasuperficial;acombinaçãoCu–Fesuportadaemmatriz carbonácea pode ampliar a faixa de atuação em relação ao Fenton homogêneo ácido

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

(Xin et al., 2021; Zhao et al., 2021). Por se tratar de triagem, as tendências foram confrontadas com os pontos experimentais.

Em catalisador × H_2O_2(Figura 2E–F), a resposta aumentou com a dosagemdeBC@Fe@Cumesmoemmenorteordeoxidante,compatívelcommaiordisponibilidade de sítios potencialmente ativos. Sistemas Fe–Cu suportados em biocarvão favorecemaativaçãodoH_2O_2,enquantooexcessodooxidantepodeconsumir•OH(Liuetal.,2022; Shen et al., 2023; Li et al., 2024). Predições acima de 100% são artefatos do ajuste polinomial.Selecionaram-se2,0gL^{-1}decatalisadore1,0$mmolL^{-1}$deH_2O_2;pH7,3foio valor natural após a mistura, não o máximo previsto.

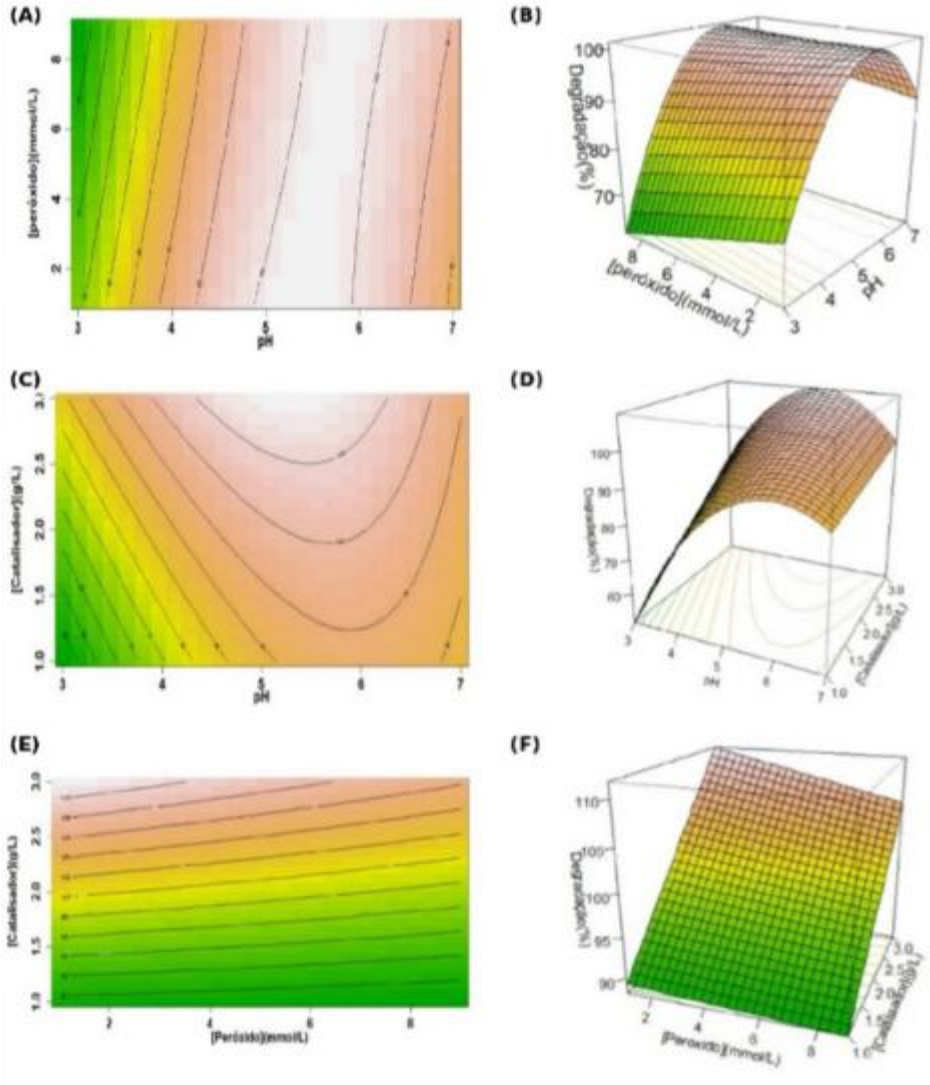


Figura2–Gráficosdecontornoesuperfíciesderespostaparaasinterações:H_2O_2×pH(A–B), catalisador × pH (C–D) e catalisador × H_2O_2(E–F). Resposta colorimétrica: de-colorizaçãodoazuldemetilenoapós60min;“degradação”noseixoscorrespondeaessecálculo.

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

3.3 Estudocinético

C/Codiminuiurapidamentenosprimeiros20mineatingiu90%dedecolorizaçãoem 60 min (Figura 3). A desaceleração é compatível com o consumo do oxidante edosubstrato e com a competição superficial. Sem controles de adsorção, H_2O_2isolado, fo-tólise e condição

escura, porém, não se quantifica cada contribuição. Perfis bifásicossemelhantes ocorrem em sistemas Fenton-like com biocarvão (Liu et al., 2022; Shenetal., 2023).

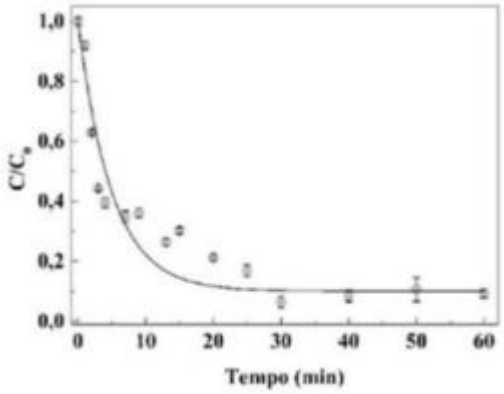


Figura3–VariaçãodeC/C₀doazuldemetilenoemfunçãodotempo.Condições:C₀=10 mg L^{-1}, BC@Fe@Cu = 2,0 g L^{-1}, H_2O_2= 1,0 mmol L^{-1} e pH inicial 7,3. Barras:desvio-padrão de três réplicas analíticas.

Osdadosforamtestadospelosmodelosdeordemzero,pseudo-primeiraordemepseudo-segunda ordem, cujas formas integradas são apresentadas na Tabela 2.

Tabela2–Equaçõesintegradasempregadasnaavaliaçãocinética.

Ordem$_{zero}$	$[C]=[C]_0-k_0t$
Pseudo-primeiraordem	$[C]=[C]_0e^{-k_1t}$
Pseudo-segundaordem	$\frac{1}{[C]}=\frac{1}{[C]_0^2}+kt$

EmqueCéaconcentraçãonotempot;C₀éaconcentraçãoinicial;k₀,k_1e$k_2$sãoas constantes aparentes dos modelos de ordem zero, pseudo-primeira ordem e pseudo-segunda ordem, respectivamente.

Aplicou-se também o modelo de Behnajady–Modirshahla–Ghanbary (BMG),propostoparaperfisbifásicosdeFenton.Naformulaçãooriginal,1/mcorrespondeàtaxain icial normalizada e 1/b à capacidade assintótica; tais parâmetros dependem da normalização e não recebem unidades mássicas (Chan & Chu, 2003):

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

$$\frac{t}{\left[1-\left(\frac{C}{C0}\right)\right]} = m + bt \qquad \text{Equação1}$$

O modelo de ordem zero não representou a curvatura observada. Os ajustesdepseudo-primeira ordem, pseudo-segunda ordem e BMG são apresentados na Figura 4.

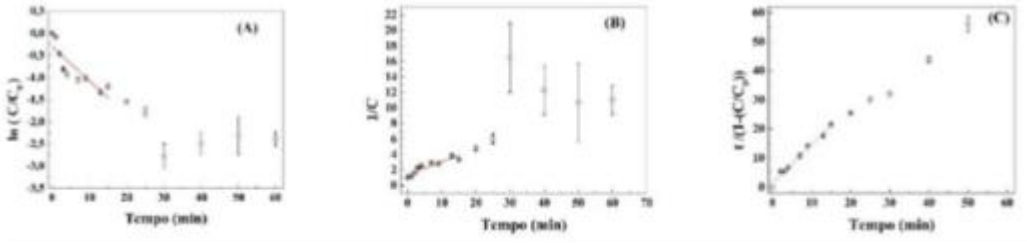


Figura4–Linearizaçõesdosmodelos:(A)pseudo-primeiraordem;(B)pseudo-segundaordem; (C)BMG.Pontos:médiasexperimentais;barras:desvio-padrãodetrêsréplicas analíticas.

OBMGapresentouomaiorR^2(0,987),seguidopelosmodelosdepseudo-segunda ordem (0,770) e pseudo-primeira ordem (0,650) (Tabela 3). Como a linearização altera a estrutura dos erros, a comparação é descritiva e não demonstra mecanismo cinético.

Tabela3–Coeficientesdedeterminaçãodaslinearizaçõesaplicadasaosdadosexperimentais.

Modelo	R^2
Pseudo-primeiraordem	0,650
Pseudo-segundaordem	0,770
BMG	0,987

O BMG descreve a queda inicial rápida e o patamar posterior previstos emsuaformulação (Chan & Chu, 2003). O ajuste não distingue adsorção de oxidação radicalarnem comprova ciclos Fe/Cu; por isso, foi empregado somente para descrever o perfiltemporal.

4. Conclusões

OBC@Fe@Cuproduzidoapartirdecascade*Eucalyptus*sp.apresentoudesem-penhopromissornaremoçãocolorimétricadoazuldemetilenoporprocessoFenton-likeheterogêneo, alcançando 90% de remoção em 60 min, com 2,0 g L^{-1} de

catalisador,1,0mmol L^{-1} de H_2O_2e pH inicial 7,3, sob exposição à luz solar. A triagem fatorial evidenciou maior influência do pH e da dosagem de catalisador, enquanto o modelo BMG apresentou o melhor ajuste descritivo da cinética (R^2=0,987). Esses resultados sustentam o potencial de valorização da casca de eucalipto na obtenção de materiais catalíticos destinados ao tratamento complementar de efluentes contendo corantes.

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

5. Referências bibliográficas

Cardozo, J. C., Barbosa Segundo, I. D., de Medeiros Leandro, M. E., Gondim, A. D., Cavalcanti, L.N., dos Santos, E. V., & Martínez-Huitle, C. A. (2025). Decentralized and cost-effective colorimetry analysis by smartphone-based method digital image for monitoring electrochemical elimination of dye from water matrices. Journal of Solid State Electrochemistry, 29, 873–885. doi:10.1007/s10008-024-06146-4.

Chan, K.H., & Chu, W. (2003). Modeling the reaction kinetics of Fenton's process on the removal of atrazine. Chemosphere, 51(4), 305–311. doi: 10.1016/S0045-6535(02)00812-3.

Li, X., Xie, G., Gu, X., Zhang, G., Da, Y., Wang, Y., Liang, H., Li, Y., & Wang, B. (2024). A tartaric acid (TA)-coated iron-based biochar as heterogeneous Fenton catalyst for enhanced degradation of dibutyl phthalate. Environmental Pollution, 362, 124976. doi:10.1016/j.envpol.2024.124976.

Liu, H., Liu, Y., Li, X., Zheng, X., Feng, X., & Yu, A. (2022). Adsorption and Fenton-like degradation of ciprofloxacin using corncob biochar-based magnetic iron–copper bimetallic nanomateri-al in aqueous solutions. Nanomaterials, 12(4), 579. doi: 10.3390/nano12040579.

Pires, A.A.F., Resende, R.S., Barros, J.L., Silva, D.A., Nakashima, G.T., Belini, G.B., & Yamaji, F. M. (2026). Eucalyptus bark biochar: Production and characterization. ACS Omega, 11(8), 13320–13331. doi: 10.1021/acsomega.5c10258.

Shen, Y., Xiao, Y., Zhang, H., Fan, H., Li, Y., Yan, Z., & Zhang, W.-H. (2023). Synthesis of magnetic biochar-supported Fe–Cu bimetallic catalyst from pulp and paper mill wastes for the Fenton-like removal of rhodamine B dye. Chemical Engineering Journal, 477, 146823. doi:10.1016/j.cej.2023.146823.

Vamvuka, D., Esser, K., & Marinakis, D. (2023). Characterization of pyrolysis products of forest residues and refuse-

derivedfuelandevaluationoftheirsuitabilityasbioenergysources.AppliedSciences, 13(3), 1482. doi: 10.3390/app13031482.

Xin, S., Ma, B., Liu, G., Ma, X., Zhang, C., Ma, X., Gao, M., & Xin, Y. (2021). Enhanced heterogeneousphoto-Fenton-likedegradationoftetracyclineoverCuFeO$_2$/biocharcatalystthroughaccelerating electron transfer under visible light. Journal of Environmental Management,285,112093. doi: 10.1016/j.jenvman.2021.112093.

Zhao,Z.,Cai,X.,Fan,S.,Zhang,Y.,Huang,Z.,Hu,H.,Liang,J.,&Qin,Y.(2021).Constructionofa stable Cu–Fe@C composite catalyst with enhanced performance and recyclability for visible-light-driven photo-Fenton reaction. Journal of Alloys and Compounds, 877, 160260.doi:10.1016/j.jallcom.2021.160260.

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Biochar de Resíduo de Serraria de Madeira Nativa da Amazônia

Pietra Bibiano Nascimento[1]; Patrícia Gomes Ribeiro[1]; Angélica de Cássia Oliveira Carneiro[2]; Letícia Costa Peres[2]; Geisianne de Carvalho Almeida[2]

[1] Universidade Federal do Acre (UFAC) 01
[2] Universidade Federal de Viçosa (UFV) 02

Resumo: A geração de resíduos da indústria madeireira amazônica demanda alternativas sustentáveis para sua valorização. Este trabalho objetivou avaliar o potencial de produção de biochar a partir de resíduos de serraria de espécies nativas da Amazônia visando projetos de remoção de carbono. O experimento foi conduzido em esquema fatorial 2×3, com temperaturas de pirólise de 500 e 600 °C e tempos de residência de 30, 45 e 60 min, com três repetições. O aumento da temperatura reduziu os materiais voláteis e elevou os teores de carbono fixo e carbono orgânico. As razões H/C, O/C e H/Corg também foram reduzidas, indicando maior grau de carbonização e estabilidade estrutural a 600 °C. Nessa temperatura, o carbono estocado apresentou média de 3,13 $tCO_2e\ t^{-1}$ de biochar, frente a 2,92 $tCO_2e\ t^{-1}$ a 500 °C. Os resultados indicam maior estabilidade e capacidade de estocagem de carbono nos biochars produzidos a 600 °C.

Palavras-chave: Sequestro de carbono; Pirólise; Biomassa lignocelulósica.

Biochar From Amazonian Sawmill Wood Residues

Abstract: The generation of residues from the Amazonian wood industry requires sustainable alternatives for their valorization. This study aimed to evaluate the potential for biochar production from sawmill residues of native Amazonian species for carbon removal projects. The experiment followed a 2×3 factorial design, with pyrolysis temperatures of 500 and 600 °C and residence times of 30, 45, and 60 min, with three replicates. Increasing the temperature reduced volatile matter and increased fixed and organic carbon contents. The H/C, O/C, and H/Corg ratios also decreased, indicating a higher degree of carbonization and structural stability at 600 °C. At this temperature, stored carbon averaged 3.13 $tCO_2e\ t^{-1}$ of biochar, compared with 2.92 $tCO_2e\ t^{-1}$ at 500 °C. The results indicate greater stability and carbon storage capacity in biochars produced at 600 °C.

Keywords: Carbon sequestration; Pyrolysis; Amazonian forest biomass.

1. Introdução

Esforços têm sido intensificados nas últimas décadas para enfrentar os desafios ambientais contemporâneos, entre os quais se destacam a redução da dependência de combustíveis fósseis, a mitigação das mudanças climáticas associadas às emissões de gases de efeito estufa e a transição para modelos de desenvolvimento mais sustentáveis. Relatórios recentes indicam que a limitação do aquecimento global exige, além da redução das emissões, a adoção de estratégias complementares voltadas à mitigação e à remoção de carbono da

atmosfera, de modo a atender às metas climáticas estabelecidas para as próximas décadas (IPCC, 2021; IPCC, 2022).

Nesse contexto, os resíduos lignocelulósicos assumem papel relevante, uma vez que representam uma fração expressiva da matéria-prima processada pela indústria de base florestal. Esses resíduos são gerados em larga escala durante as etapas de desdobro, beneficiamento e transformação da madeira em produtos finais. Dados consolidados pelo Sistema Nacional de Informações Florestais (SNIF), coordenado pelo Serviço Florestal Brasileiro (SFB, 2024), associados a levantamentos setoriais recentes, indicam que a produção madeireira no Brasil permanece robusta, reforçando a importância econômica do setor e, simultaneamente, evidenciando o volume significativo de biomassa residual gerada ao longo da cadeia produtiva.

Entre os impactos ambientais associados à geração e à destinação inadequada de resíduos de serraria destacam-se a degradação da qualidade de corpos d'água, decorrente do lançamento de resíduos orgânicos e substâncias associadas (EL HAJAM et al., 2020), a poluição atmosférica resultante da queima aberta (BRAND et al. 2005), causando emissões de gases tóxicos, bem como a ocupação e degradação de áreas de solo destinadas ao armazenamento ou descarte desses materiais, com potencial alteração de suas propriedades físicas e químicas (ALVES, 2022).

Diante desse cenário, a conversão termoquímica de resíduos lignocelulósicos por meio da pirólise apresenta-se como uma alternativa tecnológica promissora para agregar valor à biomassa residual e mitigar impactos ambientais. A pirólise consiste na decomposição térmica da biomassa sob condições controladas ou ausentes de oxigênio, resultando na formação de uma fração sólida rica em carbono, denominada de biocarvão, carvão vegetal ou biochar, a depender da aplicação, sendo o termo biochar, usado principalmente quando o produto carbonáceo é aplicado ao solo.

O biochar tem sido estudado como alternativa para armazenamento de carbono no solo, em função da maior estabilidade do carbono quando comparado à biomassa não carbonizada (LEHMANN et al., 2006; IPCC, 2022). Nesse contexto, os parâmetros operacionais do processo de pirólise, especialmente a temperatura e o tempo de residência, exercem influência significativa sobre as propriedades físico-químicas do material produzido. A variação desses parâmetros afeta o teor de carbono fixo, o grau de aromatização da estrutura carbonácea, a estabilidade química e a presença de grupos funcionais superficiais, aspectos que influenciam sua adequação a diferentes aplicações ambientais e agrícolas (WEBER; QUICKER, 2018; SINGH et al., 2017).

Nesse contexto, a produção de biochar a partir de resíduos de serraria de madeira nativa da Amazônia configura-se como uma alternativa capaz de integrar a gestão sustentável de resíduos, a valorização da biomassa residual e a geração de benefícios ambientais associados ao sequestro de carbono, alinhando-se aos princípios da bioeconomia circular e do desenvolvimento sustentável.

Avaliar o potencial de produção de biochar a partir de resíduos de serraria de espécies nativas da Amazônia visando aplicação em projetos de remoção de carbono.

2. Material e métodos

O resíduo de serraria foi coletado em diferentes pontos de pilhas de disposição de resíduos em duas serrarias localizadas no município de Rio Branco, Acre, correspondendo a um mix de espécies processadas nas serrarias, incluindo Cedro (*Cedrela odorata*), Angelim-pedra (*Hymenolobium petraeum*), Cumaru (*Dipteryx odorata*) e Jatobá (*Hymenaea courbaril*). O experimento foi desenvolvido no Laboratório de Painéis e Energia da Madeira (LAPEM), vinculado ao Departamento de Engenharia Florestal da Universidade Federal de Viçosa (DEF/UFV), em Viçosa, MG.

Foram avaliados seis tratamentos em esquema fatorial 2×3, correspondentes a duas temperaturas finais de pirólise (500 e 600 °C) e três tempos de residência (30, 45 e 60 min), em delineamento inteiramente casualizado, com três repetições. As carbonizações foram realizadas em forno elétrico tipo mufla, utilizando aproximadamente 150 g de biomassa por repetição, acondicionada em recipiente metálico cilíndrico.

A composição química imediata do biochar, constituída pelos teores de materiais voláteis, cinzas e carbono fixo, foi determinada conforme a ASTM D1762-84 (Reapproved 2007), em base seca, com adaptação do procedimento, substituindo-se o cadinho de platina por porcelana. A composição elementar (C, H, N e S) foi determinada conforme a norma DIN EN 15104 (Deutsches Institut fur Normung, 2011), utilizando o equipamento Vario Micro Cube CHNS (Elementar®), sendo o teor de oxigênio (O) obtido por diferença. A partir dos resultados da composição química elementar foram calculadas as relações molares H/C e O/C.

Para a relação H/Corg foi utilizada a seguinte equação:

$$H/Corg = (H \times 12) / Corg$$

O teor de carbono orgânico (Corg) foi determinado pela diferença entre o carbono total (Ctotal), obtido por análise elementar, e o carbono inorgânico (Cinorg). Adotou-se o valor fixo de 0,5% para Cinorg, conforme a metodologia recomendada pela Puro.earth (Puro.Earth, 2025):

$$Corg = Ctotal - Cinorg$$

O carbono estocado no biochar (Cstored) foi calculado conforme a metodologia da Puro.earth (PURO.EARTH, 2025):

Cstored = Qbiochar × Corg × (44/12)

em que Qbiochar é a massa seca total de biochar (t) e Corg é o teor de carbono orgânico em base seca (fração). Para expressar os resultados por 1 tonelada de biochar, adotou-se Qbiochar = 1 t, sendo os resultados expressos em $tCO_2e\ t^{-1}$ de biochar.

Os dados foram submetidos ao teste de normalidade dos resíduos (Shapiro–Wilk) e, quando as pressuposições foram atendidas, foi realizada análise de variância (ANOVA). Quando identificadas diferenças significativas, aplicou-se o teste de Tukey a 5% de significância. As análises foram realizadas no software R, utilizando o pacote ExpDes.pt.

3. Resultados e discussão

A composição química imediata do biochar foi influenciada pela temperatura e pelo tempo de pirólise, sem interação significativa entre esses fatores. O teor de materiais voláteis apresentou redução com o aumento da temperatura, passando de 24,75% a 500 °C para 15,05% a 600 °C. Em relação ao tempo, observou-se maior valor aos 30 minutos, enquanto os tempos de 45 e 60 minutos não diferiram entre si. Comportamento semelhante foi reportado por Morais et al. (2024), que verificaram redução dos materiais voláteis em resíduos amazônicos com a elevação da temperatura de pirólise.

O teor de carbono fixo aumentou de 74,04% a 500 °C para 82,91% a 600 °C, sendo os maiores valores observados aos 45 e 60 minutos. Esse comportamento indica que temperaturas mais elevadas e maior tempo de residência promovem intensificação da desvolatilização e, consequentemente, concentração de carbono. Resultados semelhantes foram observados por Barros et al. (2025), reforçando que o incremento da temperatura favorece maior carbonização e formação de estruturas aromáticas mais estáveis no biochar. O teor de cinzas também aumentou com a elevação da temperatura, passando de 1,22% para 2,03%.

O teor de carbono orgânico apresentou interação significativa entre temperatura e tempo, com valores superiores a 600 °C em todos os tempos avaliados. A média aumentou de 79,6% para 85,4% com a elevação da temperatura, indicando maior concentração de carbono em condições mais elevadas de temperatura.

Na composição elementar, a elevação da temperatura de 500 para 600 °C aumentou o teor médio de carbono de 80,0% para 85,9%, enquanto o teor de hidrogênio foi reduzido de 3,2% para 2,5% e o teor de oxigênio de 15,4% para 9,4%. De modo geral, o maior teor de

carbono a 600 °C, associado à redução de H e O, indica maior concentração da matriz carbonosa e maior grau de carbonização do biochar (Lehmann & Joseph, 2015).

A razão H/C foi influenciada pela temperatura, com redução da média de 0,47 a 500 °C para 0,34 a 600 °C. A razão O/C também diminuiu com o aumento da temperatura de pirólise, apresentando média de 0,14 a 500 °C e 0,08 a 600 °C. A diminuição dessas relações indica maior aromaticidade, condensação estrutural e grau de carbonização dos biochars obtidos em temperaturas mais elevadas.

Tabela 1 – Valores médios da relação H/Corg e da quantidade de carbono estocado dos biochars em função dos tratamentos

Parâmetro	Tempo (min)	500 °C	600 °C	Média
H/Corg	30	0,49	0,36	0,42 a
	45	0,47	0,34	0,41 b
	60	0,46	0,34	0,40 b
	Média	0,47 A	0,35 B	
Carbono estocado ($tCO_2e\ t^{-1}$ de biochar)	30	2,90 Bb	3,09 Ab	2,99
	45	2,90 Bb	3,17 Aa	3,04
	60	2,94 Ba	3,14 Aa	3,04
	Média	2,92	3,13	

Médias seguidas pela mesma letra, maiúscula na linha e minúscula na coluna, não diferem a 95% de probabilidade, pelo teste de Tukey.

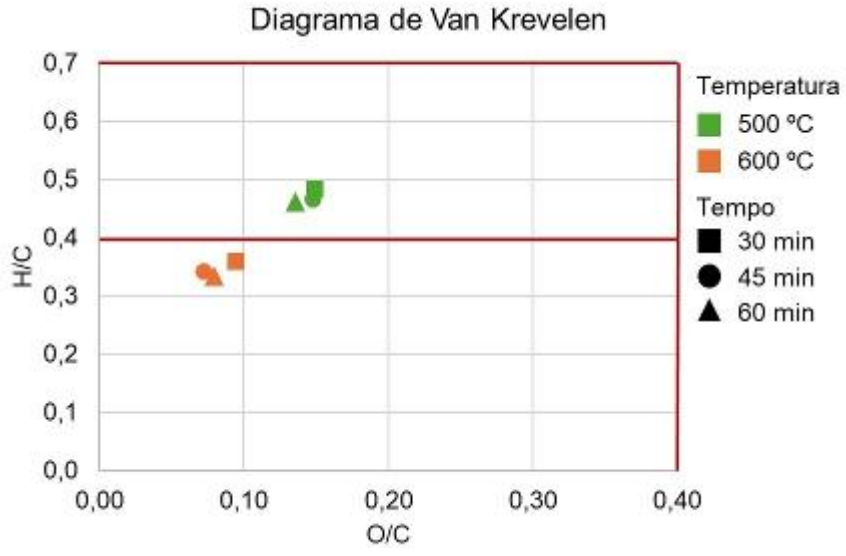


Figura 1 – Diagrama de Van Krevelen evidenciando o efeito da temperatura e do tempo de pirólise nas razões H/C e O/C do biochar.

A redução das razões H/C e O/C, evidenciada no diagrama de Van Krevelen, demonstra que o efeito mais consistente foi o da temperatura, indicando maior grau de carbonização dos

biochars obtidos a 600 °C. A diminuição da razão H/C indica maior aromaticidade e condensação estrutural do biochar, enquanto os menores valores de O/C estão associados a biochars mais aromáticos e, em geral, mais estáveis.

A razão H/Corg também foi influenciada principalmente pela temperatura, com redução da média de 0,47 para 0,35 quando a pirólise ocorreu a 600 °C. O tempo apresentou pequenas variações, porém o principal fator determinante foi a severidade térmica. Todos os tratamentos apresentaram H/Corg inferior a 0,7, valor utilizado como referência em critérios de estabilidade (European Biochar Foundation [EBC], 2023), e os biochars produzidos a 600 °C apresentaram H/Corg inferior a 0,4, indicando maior grau de carbonização e maior potencial de estabilidade quando comparados aos produzidos a 500 °C.

Os tratamentos conduzidos a 600 °C apresentaram maiores valores de carbono estocado em comparação aos obtidos a 500 °C, com médias de 3,13 e 2,92 $tCO_2e\ t^{-1}$ de biochar, respectivamente. O aumento do carbono estocado em temperaturas mais elevadas está relacionado ao maior grau de carbonização do material, com redução das razões H/Corg e O/C e formação de estruturas aromáticas mais condensadas, que conferem maior estabilidade ao biochar (LEHMANN; JOSEPH, 2015). Biochars produzidos sob maior temperatura tendem a apresentar maior proporção de carbono estável e menor suscetibilidade à degradação, favorecendo o armazenamento de carbono no longo prazo (ROBERTS et al., 2010).

De modo geral, os resultados indicam que a produção de biochar a 600 °C promove maior eficiência no armazenamento de carbono quando comparada à temperatura de 500 °C, evidenciando o potencial dos resíduos de madeira da Amazônia como matéria-prima para tecnologias de remoção de CO_2 atmosférico.

4. Conclusões

A produção de biochar a partir de resíduos de serraria de madeira nativa da Amazônia mostrou-se tecnicamente viável. A temperatura de pirólise foi o principal fator responsável pelas alterações nas propriedades do biochar, sendo que a elevação de 500 para 600 °C promoveu redução dos materiais voláteis e aumento dos teores de carbono fixo e carbono orgânico, indicando maior grau de carbonização e formação de estruturas mais aromáticas e estáveis. A redução das razões H/C, O/C e H/Corg reforçou a indicação de maior estabilidade estrutural dos biochars produzidos a 600 °C.

Os biochars produzidos a 600 °C apresentaram maiores valores de carbono estocado, evidenciando maior potencial para aplicações relacionadas ao sequestro de carbono e às

estratégias de remoção de CO_2 atmosférico. De modo geral, os resultados indicam que resíduos de serraria amazônicos constituem matéria-prima promissora para a produção de biochar com maior capacidade de estocagem de carbono.

5. Agradecimentos

Ao Laboratório de Painéis e Energia da Madeira LAPEM, a Universidade Federal de Viçosa, e a Universidade Federal do Acre.

6. Referências bibliográficas

Alves, C. L. S. (2022). Avaliação dos impactos ambientais causados por resíduos de serrarias. *Brazilian Journal of Environmental Assessment and Research, 5*.

American Society for Testing and Materials. (2007). *ASTM D1762–84 (Reapproved 2007): Standard test method for chemical analysis of wood charcoal*. ASTM International.

Barros, D. S., Lima, M. D. R., Massuque, J., Santos, E. V., Guirardi, B. D., Dias Junior, A. F., Bufalino, L., Silveira, E. A., Carneiro, A. C. O., Trugilho, P. F., & Protásio, T. P. (2025). Advancing circular economy in Amazonian forest management: A comparative study of the effects of wood waste segregation and traditional carbonization on charcoal properties, combustibility, and spontaneous combustion risk. *Circular Economy, 4*, 100152.

Brand, M. A., Muniz, G. I. B., Silva, D. A., & Klock, U. (2005). Caracterização do rendimento e quantificação dos resíduos gerados em serraria através do balanço de materiais. *Floresta, 32*(2), 193–201.

Deutsches Institut für Normung. (2011). *EN 15104: Determination of total content of carbon, hydrogen and nitrogen – Instrumental methods*. CEN.

El Hajam, M., Plavan, G.-I., Idrissi Kandri, N., Dumitru, G., Nicoara, M. N., Zerouale, A., & Faggio, C. (2020). Evaluation of softwood and hardwood sawmill wastes impact on the common carp *Cyprinus carpio* and its aquatic environment: An oxidative stress study. *Environmental Toxicology and Pharmacology, 75*, 103327. https://doi.org/10.1016/j.etap.2020.103327

European Biochar Foundation. (2023). *European Biochar Certificate – Guidelines for a sustainable production of biochar* (Version 11.1).

IPCC. (2021). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis*. Cambridge University Press.

IPCC. (2022). *Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change*. Cambridge University Press.

Lehmann, J., Gaunt, J., & Rondon, M. (2006). Bio-char sequestration in terrestrial ecosystems – A review. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change, 11*(2), 403–427.

Lehmann, J., & Joseph, S. (Eds.). (2015). *Biochar for environmental management: Science, technology and implementation* (2nd ed.). Routledge.

Morais, W. W. C., Brito, J. O., Lana, A. Q., Andrade, C. R., Dias Júnior, A. F., & Morais, J. B. F. (2024). Qualidade de resíduos madeireiros estocados em serrarias na Amazônia para fins energéticos. *Advances in Forestry Science*, *11*(1), 2176–2182. https://doi.org/10.34062/afs.v11i1.16403

Puro.earth. (2025). *Biochar methodology for CO_2 removal* (Edition 2025 v1). Puro Standard.

Roberts, K. G., Glover, B., Joseph, S., Scott, N. R., & Lehmann, J. (2010). Life cycle assessment of biochar systems: Estimating the energetic, economic, and climate change potential. *Environmental Science & Technology*, *44*(2), 827–833.

Serviço Florestal Brasileiro. (2024). *Sistema Nacional de Informações Florestais – SNIF*.

Singh, B., Camps-Arbestain, M., & Lehmann, J. (2017). *Biochar: A guide to analytical methods*. CSIRO Publishing.

Weber, K., & Quicker, P. (2018). Properties of biochar. *Fuel*, *217*, 240–261.

Característicasdefilmesdecelulosemicrofibriladaetanino

EmmillydeAlmeidaSantos[1];AleffeNevesLeite[1];EraldoAntonioBonfatti Júnior[2,3]; Elaine Cristina Lengowski[1]

[1]UniversidadeFederaldeMatoGrosso(UFMT),FaculdadedeEngenhariaFlorestal,Cuiabá, MT, Brasil

[2]Universidade Estadual Paulista (UNESP), Engenharia Florestal, Botucatu, SP, Brasil[3]UniversidadeEstadualdoCentro-Oeste(Unicentro),ProgramadePós-graduaçãoemCiências Florestais, Irati, PR, Brasil

Resumo: Este trabalho teve como objetivo avaliar o efeito da incorporação de tanino em filmes de celulose microfibrilada (MFC) nas propriedades físicas, ópticas e mecânicas do material. A incorporação dos teores de tanino 0,01%, 0,1%, 0,25% e 1% em relação à massa seca de MFC foi realizada na suspensão de 3% de consistência.Os filmes foram produzidos pelo método*casting*com espessura úmida padronizada de 2 mm, seguida de secagem inicial em estufa a 103°Ceposteriorsecagememsecadordefolhastipo RAPID.Foramavaliadasa permeabilidade ao vapor de água, opacidade, resistência à tração, elongação, módulo de elasticidade e deformação. A adição de tanino reduziu a permeabilidadeaovapordeáguaeaumentouaopacidadeindicandoformaçãode uma rede mais compacta e a coloração por influência da característica do tanino. As propriedades mecânicas foram pouco afetadas, sem prejuízo da resistência à tração edadeformação. Conclui-sequeo tanino podeatuar como aditivo natural promissor para melhoria das propriedades de barreira de filmes MFC, embora o controle da dispersão e da secagem seja essencial para garantir uniformidade ereprodutibilidade.

Palavras-chave: Biopolímeros;Embalagensativas;Permeabilidade.

Characteristicsofmicrofibrillatedcelluloseandtanninfilms

Abstract: This study focuses on the use of natural compounds to develop new products as alternatives to fossil-based materials. The objective was to evaluate the effect of incorporating tannin into microfibrillated cellulose films on the material's physical, optical, and mechanical properties. Tannin was incorporated into a 3% consistency at levels of 0.01%, 0.1%, 0.25%, and 1% relative to the MFC dry mass. The films were produced via the casting method with a standardizedwetthicknessof2mm,followedbyinitialovendryingat103°Cand subsequent drying in a RAPID-type sheet dryer. Water vapor permeability, opacity,tensilestrength,elongation,modulusofelasticity,anddeformationwere evaluated. Tannin addition reduced water vapor permeability and increased opacity, indicating the formation of a more compact network and coloration influenced by the tannin's characteristics. Mechanicalproperties were minimally affected, with no compromise to tensile strength or deformation. It is concluded thattannincanserveasapromisingnaturaladditivetoimprovethebarrier

propertiesofmicrofibrillatedcellulosefilms,althoughcontrollingdispersionand drying is essential to ensure uniformity and reproducibility.

Keywords: Biopolymers;Activepackaging;Permeability.

1. Introdução

Asubstituiçãoparcialdepolímerossintéticospormateriaisrenováveistemsido uma demanda central no desenvolvimento de embalagens com menor impactoambiental.Nessecontexto,aceluloseéamplamenteapontadacomouma base promissora para soluções mais sustentáveis (DE LIMA et al., 2025).

Entre as alternativas de base lignocelulósica, a celulose microfibrilada (MFC) se destaca em filmes e revestimentos por formar estruturas densas, com alta resistência mecânica e bom desempenho de barreira. Filmes puros de MFC apresentam,porexemplo, OTR (Taxade transmissãodeoxigênio)de 17mLm^{-2} dia^{-1}, alémdefortereduçãodeporosidade epermeabilidadeao arquandousados como camada superficial (SYVERUD; STENIUS, 2009). Esses filmes também exibem boa resistência mecânica e elongação, com índice de tração de 146 ± 18 Nm/g, elongação de 8,6 ± 1,6% e módulo de 17,5 ± 1,0 GPa em estruturas de fibrilas orientadas aleatoriamente (SYVERUD; STENIUS, 2009).

Apesardessepotencial,osfilmesdeMFCaindaapresentamumalimitação importante: a afinidade por água e a resistência insuficiente à umidade, o que restringe suas aplicações práticas em embalagem (CAINGLET et al., 2025; CHERPINSKI et al., 2018). Essa sensibilidade decorre da abundância de grupos hidroxila acessíveis, que interagem fortemente entre si e com moléculas de água (NASIRI et al., 2024). Por isso, melhorar a barreira ao vapor de água sem comprometer o desempenho mecânico tem sido um objetivo recorrente na área. Estratégias como reticulação, revestimentos multicamadas e modificação superficial já alcançaram reduções de 38% a 67,4% em WVTR/WVP (Taxa de Transmissão de Vapor d'Água) em alguns casos mantendo ou até elevando a resistência mecânica dos filmes (ARAFAT et al., 2025).

Umaestratégiapromissoraparasuperaressalimitaçãoéaincorporaçãode aditivos naturais capazes de interagir com a matriz celulósica e modificar sua organizaçãoestrutural.Nessesentido,revisõesrecentesdestacamostaninosentre os aditivos explorados para agregar funcionalidade a embalagens ativas de celulose(DELIMAetal.,2025). O tanino éumpolifenolvegetalrenovávelcom

múltiplos grupos funcionais, capazes de estabelecer diversas interações, — incluindo ligações de hidrogênio com a celulose. Em sistemas nanoestruturados, essas interações já foram associadas ao fortalecimento estrutural da rede (DAI et al.,2021).Alémdopapelestrutural,ousodetaninoemfilmescelulósicostambém tem sido relacionado à atividade antioxidante e ao bloqueio UV, reforçando seu interesseparaaplicaçõesemembalagensativas(HUANGetal.,2022;QINetal.,2024).

AinteraçãoentretaninoeMFCtendeafavoreceraformaçãodeumarede mais compacta e menos permeável. Diversos estudos com filmes de tanino-celulose ou compósitos de MFC mostram aumento de densidade, maior hidrofobicidadesuperficiale redução de WVTR,solubilidadee inchamento. Em um desses trabalhos, filmes de MFC-tanino apresentaram melhoria de seis vezes na barreira ao ar, sem perda mecânica significativa (MISSIO et al., 2018). Em outro sistema, a reticulação tanino-MFC em gelatina reduziu a hidrofobicidade superficial, o WVTR e a solubilidade, efeito atribuído ao aumento de ligações químicas e físicas dentro do filme. Esses resultados reforçam a ideia de que a

redução de espaços livres e de grupos hidroxila acessíveis dificulta a difusão de água e gases em filmes de MFC (NASIRI et al., 2024).

Por outro lado, a incorporação de tanino também pode alterar as propriedades ópticas e mecânicas dos filmes, e o sentido dessas mudanças dependediretamentedaformulaçãoempregada.Emfilmesdebasecelulósica,por exemplo,apresençadetaninotemsidoassociadaaelevadobloqueiodaradiação UVeàmodulaçãodaspropriedadesópticasconformeacomposiçãodosistema

— ainda que filmes de CNC modificados possam preservar alta transparência óptica quando adequadamente formulados (NASIRI et al., 2024). Já em relação às propriedades mecânicas, o efeito não segue um padrão único: em filme celulósico regenerado, o tanino reduziu a resistência à tração a seco, mas aumentou fortementearesistênciaúmidaeadeformação naruptura(HUANGet al., 2022). Em contrapartida, matrizes de tanino-MFC apresentaram aumento expressivo da resistência à tração e da tenacidade, enquanto outros sistemas de plastificação em MFC mostraram maior alongamento e resistência máxima (NASIRI et al., 2024).

Diante desse cenário, este trabalho teve como objetivo avaliar o efeito da incorporação de diferentes teores de tanino nas propriedades físicas, ópticas e mecânicas de filmes de MFC.

2. MaterialeMétodos

Os filmes foramproduzidos apartir deumasuspensão deMFC obtidade fibras de eucalipto, a 3% de consistência, empregando-se o método casting.

A espessura úmida foi padronizada em 2 mm para todos os tratamentos, com o objetivo de reduzir variações associadas à massa aplicada e à etapa de conformação dos filmes.

A incorporação de tanino foi realizada nas proporções de 0,01%, 0,1%, 0,25% e 1%, calculadas em relação à massa seca de MFC.

Assuspensõesforamhomogeneizadasmanualmentenasproporçõesestabeleci das para cada tratamento. Em seguida, foram distribuídas em moldes

paraconformaçãoinicialdosfilmes.Asecagemocorreuemduasetapas: inicialmente,osfilmesforamsubmetidosàestufaporaproximadamente20 minutosa103°C,parapromoveraevaporaçãoinicialdaáguaeestabilizararede formada;posteriormente,foramtransferidosparasecadoresdepapelaté completarasecagem emsecadordefolhastipoRAPID,modeloTD-RKa90°C. Osfilmesforam acondicionadosemambiente de65%de umidadea 25 °C, posteriormente foram avaliadas propriedades físicas e ópticas, incluindo permeabilidade ao vapor de água (PVA) e opacidade. Também foram determinadaspropriedadesmecânicas:resistênciaàtração,elongação,módulode elasticidade e deformação.

A permeabilidade ao vapor de água (PVA) foi determinada gravimetricamente a 25°C de acordo com o método da ASTM E96/E96M – 10 (2011), adaptado. Para tanto, foi adicionado sílica gel em frascos de acrílico transparentes(célulasdepermeação) de capacidade de30 mL, eentão osfrascos foram selados com os filmes e colocados em dessecador contendo solução supersaturada de cloreto de sódio (NaCl).

A opacidade aparente dos filmes foi determinada em espectrofotômetro (Metash, UV-Vis 5100). Os valores para opacidade aparente foram calculados como a razão entre a leitura realizada em comprimento de onda a 600 nm pela espessura dos filmes.

As propriedades mecânicas dos filmes foram avaliadas por ensaios de tração e perfuração. No ensaio de tração, determinaram-se a tensão de ruptura (máxima tensão suportada antes da ruptura), a elongação (máxima variação de comprimento antes da ruptura) e o módulo de elasticidade (rigidez dos filmes). Os corpos de prova, em formato retangular (120 mm de comprimento entre os ganchos e 10 mm de largura), foram acondicionados conforme a norma ASTM D882-12(2012).Osensaiosforamrealizadosemmáquinauniversal Instron,com carga de 1 kN, velocidade de 12 mm min^{-1}, separação entre garras de 100 mm e célula de carga de 500 N. Foram obtidos os valores de tensão máxima à tração (MPa),

elongação (%) e módulo de elasticidade (MPa), utilizando 10 repetições por tratamento.

No ensaio de perfuração, os corpos de prova cilíndricos (6,5 cm de diâmetro)foramacondicionadosconformeaASTMD882-12(2012).Asamostras foramperfuradascomprobeesféricade5mmdediâmetroecapacidadede50N, fixadas em suportes para evitar rugosidades e submetidas à velocidade de penetração de 0,2 mm s^{-1}. Foram determinados a força máxima de perfuração (MPa) e a deformação (%), a partir das curvas de força e deformação, com sete repetições por tratamento. Os resultados foram submetidos à análise estatística, com comparação das médias pelo teste de Tukey a 95% de probabilidade.

3. ResultadoseDiscussão

A incorporação de tanino influenciou diretamente as propriedades físicas e ópticas dos filmes de MFC (Tabela 1). A permeabilidade ao vapor de água apresentoureduçãonostratamentoscomtanino,especialmentenasconcentrações de 0,1% 0,25% e 1%, que diferiram estatisticamente da testemunha. Esse comportamentosugerequeotaninocontribuiuparamaiorcompactaçãodamatriz duranteasecagem,possivelmenteporfavorecerinteraçõesintermolecularescom a celulose e reduzir pequenos espaços entre as microfibras.

A redução da permeabilidade ao vapor de água dos filmes pode ser atribuída às interações entre o tanino e a MFC. Os grupos fenólicos do tanino apresentam elevada capacidade de formar ligações de hidrogênio com os grupos hidroxila da celulose, promovendo uma estrutura mais coesa e compacta e dificultando a difusão das moléculas de água pela matriz. Além disso, a hidrofobizaçãodasuperfíciepodeserexplicadapelasinteraçõesnainterface

tanino-celulose. O tanino possui uma estrutura macromolecular composta por domínios hidrofílicos e hidrofóbicos; sua adsorção na superfície da MFC ocorre por meio dos domínios hidrofílicos, via ligações de hidrogênio, enquanto os domínios hidrofóbicos permanecem mais expostos na superfície (MISSIO et al., 2018). Esse rearranjo reduz a afinidade do filme pela água e aumenta a

tortuosidade do caminho percorrido pelo vapor, contribuindo para a diminuição da permeabilidade ao vapor de água.

Tabela 1– Permeabilidade ao vapor de água e opacidade dos filmes de MFC etanino

Amostra	PVA(g/h.m².mm/kPa)	Opacidade(%)
Testemunha	0,26 a(22,53)	34,04 c(7,34)
Tanino0,01%	0,25 a(23,46)	34,49 c(8,03)
Tanino0,1%	0,20 c(19,24)	51,25 a(8,92)
Tanino0,25%	0,22 b(21,67)	39,90 b(7,17)
Tanino1%	0,19 c(17,68)	48,92 a(10,60)

PVA=permeabilidade aovapor deágua.
Médias seguidas de mesma letra namesma coluna não diferemestatisticamente pelo teste de Tukey a95% de probabilidade. Valores entre parênteses referem-se ao coeficiente de variação percentual das amostras.

Aopacidadeaumentoudeformasignificativacomapresençadetanino, sobretudonostratamentosde0,1%,0,25%e1%.Esseresultadoécoerentecoma coloração característica do composto fenólico e com a possibilidade de maior dispersãodeluznamatriz.Entretanto,arespostanãofoiestritamentelinear,pois o tratamento com 0,25% apresentou opacidade intermediária. Isso indica que a distribuição do tanino na suspensão e a uniformidade da secagem podem ter influenciado a estrutura óptica dos filmes.

A redução da transparência dos filmes pode ser atribuída à presença dos compostos fenólicos do tanino, que absorvem radiação na região do visível, conferindocoloraçãomaisescuraaomaterial.Adicionalmente,aincorporaçãodo tanino pode aumentar a dispersão da luz devido às heterogeneidades estruturais formadas na matriz, contribuindo para o aumento da opacidade dos filmes.

Quanto às propriedades mecânicas, aadição de tanino não prejudicou a resistênciaàtraçãonemadeformaçãodosfilmes.Esseresultadoérelevante,pois indica que a adição de tanino nestas proporções manteve a coesão das microfibrilas.Paraaelongação,observou-sereduçãonotratamentocom0,1%,

enquanto o módulo de elasticidade apresentou aumento no tratamento com 1%, indicando tendência de maior rigidez em maiores teores de tanino.

Esse resultado difere do encontrado por Missio et al. (2018) que apresentou uma diminuição das propriedades mecânicas com a adição de tanino em filmes de FMC e possivelmente está relacionado ao menor teor de tanino ao usado neste estudo.

Tabela2–Propriedadesmecânicasdosfilmesde MFCetanino.

Amostra	Resistênciaàtração (MPa)	Elongação (%)	Moduloelástico (MPa)	Deformação(%)
Testemunha	89,55 a29(56)	1,90ab(35,59)	42,49 b(27,95)	3,46 a(8,13)
Tanino0,01%	75,87 a(26,23)	1,76 b(39,45)	43,18 b(32,92)	3,35 a(10,25)
Tanino0,25%	83,54 a(27,62)	1,83ab(41,67)	48,61ab(18,29)	3,06 a(21,29)
Tanino0,01%	86,12 a(35,54)	1,87ab(46,13)	52,28 a(38,84)	3,39 a(14,49)

Médias seguidas de mesma letra na mesma coluna não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 95% de probabilidade. Valores entre parênteses referem-se ao coeficiente de variação percentual das amostras.

Osresultadosindicamqueotaninopodeatuarcomoaditivofuncionalem filmesdeMFC,favorecendoa reduçãoda permeabilidade aovaporde águae aumentandoaopacidade.AreduçãodaPVAéumarespostapositivapara aplicaçõesemembalagens,poissugeremaiorresistênciaàpassagemdeumidade. Todavia,oaumentodaopacidadedeveserinterpretadoconformeaaplicação final:podeserdesejávelemembalagensquenecessitamdeproteção contraaluz, maspodeserlimitantequandoatransparênciaforrequisitoestéticooufuncional. Entre as dificuldades observadas durante o processamento, destaca-se a homogeneização manual das suspensões, que pode ter provocado variações nadispersãodotanino,especialmenteemmaioresconcentrações.Alémdisso,a secagem inicial em estufa exigiu controle cuidadoso para evitar empenamento, formaçãodetensõesinternasouirregularidadessuperficiais.Essesfatores reforçamaimportânciadepadronizaropreparodasuspensãoeascondiçõesde

secagemparamelhorarareprodutibilidadedosfilmes.

4. Conclusões

Aincorporaçãodetaninoemfilmesde MFCproduzidospor*casting* promoveureduçãodapermeabilidadeaovapordeágua,principalmentenos tratamentos com 0,1%, 0,25% e 1%, indicando melhoria das propriedades debarreira.

O tanino aumentou a opacidade dos filmes, com maior efeito nas concentrações de 0,1% e 1%. Esse comportamento deve ser considerado conforme a aplicação final do material, pois pode ser vantajoso para proteção contra a luz, mas pode limitar usos que exijam elevada transparência.

Aspropriedadesmecânicasforampreservadasemtermosderesistênciaà tração e deformação. A principal alteração mecânica foi a tendência de aumento do módulo de elasticidade no tratamento com 1%, sugerindo maior rigidez domaterial.

Os resultados demonstram que o tanino é um aditivo natural promissor para o desenvolvimento de filmes de MFC com melhor desempenho de barreira. Entretanto,adispersãodoaditivoeocontroledasecagemdevemseraprimorados para reduzir variações e melhorar a reprodutibilidade.

5. Agradecimentos

A autora agradece à Universidade Federal de Mato Grosso (UFMT), ao Laboratório de Tecnologia da Madeira, ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), aFundação de Amparo à PesquisadoEstadodeMatoGrosso(FAPEMAT),peloapoionodesenvolvimento deste estudo.

6. ReferênciasBibliográficas

ASTM International. (2011). ASTM E96/E96M-10: Standard test methods for water vapor transmission of materials. ASTM International.

ASTM International. (2012). ASTM D882-12: Standard test method for tensile properties of thin plastic sheeting. ASTM International.

Arafat,K.M.Y.,Salem,K.S.,Bera,S.,Jameel,H.,Lucia,L.A.,&Pal,L.(2025). Surfactant-modified microfibrillated cellulose reinforcement of high-barrier sustainable packaging films. Carbohydrate Polymers, 357, 123471.https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2025.123471

Cainglet,H.E.,Black,J.R.,Udugoda,H.,Nasiri,N.,Diaz-Arenas,G.L.,Garnier, G.,Batchelor,W.,&Tanner,J.(2025).Canpurecellulosenanofibrilfilmsreplace polyolefinsaswatervaporbarriersinpackaging?JournalofColloidandInterface Science, 678, 547–555.https://doi.org/10.1016/j.jcis.2024.09.060

Cherpinski, A., Torres-Giner, S., Vartiainen, J., Peresin, M. S., Lahtinen, P., & Lagaron, J. M. (2018). Improving the water resistance of nanocellulose-based films with polyhydroxyalkanoates processed by the electrospinning coating technique. Cellulose, 25(2), 1291–1307.https://doi.org/10.1007/s10570-018-1648-z

Dai, H., Chen, Y., Zhang, S., Feng, X., Cui, B., Ma, L., & Zhang, Y. (2021). Enhanced interface properties and stability of lignocellulose nanocrystals stabilized Pickering emulsions: The leading role of tannic acid. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 69(48), 14650–14661.https://doi.org/10.1021/acs.jafc.1c04930

De Lima, G. G., Zakaluk, I. C. B., Artner, M., Pedro, A. C., De Cademartori, P. H., & Tondi, G. (2025). Enhancing barrier and antioxidant properties of nanocellulose films for coatings and active packaging: A review. ACS Applied Nano Materials, 8(7), 4397–4421.https://doi.org/10.1021/acsanm.4c05984

Huang,X.,Ji,Y.,Guo,L.,Xu,Q.,Jin,L.,Fu,Y.,&Wang,Y.(2022). Incorporating tannin onto regenerated cellulose film towards sustainable active packaging. Industrial Crops and Products, 180, 114710.https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2022.114710

Missio,A.L.,Mattos,B.D.,Ferreira,D.F.,Magalhães,W.L.E.,Bertuol,D.A., Petutschnigg, A., & Tondi, G. (2018). Nanocellulose-tannin films: From trees to sustainable active packaging. Journal of Cleaner Production, 184, 143–151.https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.02.205

Nasiri, N., Cainglet, H. E., Garnier, G., & Batchelor, W. (2024). Transparent maltitol–cellulose nanocrystal film for high performance barrier. Cellulose, 31, 7421–7436.https://doi.org/10.1007/s10570-024-06022-4

Qin, J., Huang,X., Xu,Q., &Jin, L. (2024). Active polyvinyl alcohol films with enhanced strength, antioxidant and antibacterial properties by incorporating nanocellulose and tannin. International Journal of Biological Macromolecules, 283, 137873.https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.137873

Syverud, K., &Stenius, P. (2009). Strength and barrier properties of MFC films. Cellulose, 16(1), 75–85.https://doi.org/10.1007/s10570-008-9244-2

ASTM INTERNATIONAL. ASTM E96/E96M-10: Standard Test Methods for Water Vapor Transmission of Materials. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2011.

Li, P., Sirviö, J. A., Haapala, A., Khakalo, A., & Liimatainen, H. (2019). Anti-oxidative and UV-absorbing biohybrid film of cellulose nanofibrils and tanninextract. Food Hydrocolloids, 92, 208–217.https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2019.02.002

Qin, J., Huang,X., Xu,Q., &Jin, L. (2024). Active polyvinyl alcohol films with enhanced strength, antioxidant and antibacterial properties by incorporating nanocellulose and tannin.*International Journal of Biological Macromolecules, 283,* 137873.https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.137873

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Caracterização da composição físico-química dos nós gerados na produção de celulose Kraft

Carlos Henrique Reis dos Santos Silva[1]; Nicolle De Filippo Brumano[2]; Marisa Nunes Assis da Silva[2]; Raquel Julia Cipriano dos Santos[2]; Luiza Xavier Tomaz Lima[3]; Eric Rodrigues de Araújo[2]; Lara Luisa Mendes Nascimento[4]; João Gilberto Meza Ucella Filho[2]

[1] Departamento de Química, Universidade Federal de Viçosa
[2] Departamento de Engenharia Florestal, Universidade Federal de Viçosa
[3] Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa
[4] Departamento de Biologia, Universidade Federal de Viçosa

Resumo: A indústria de celulose kraft gera resíduos fibrosos, como os nós, cujo reaproveitamento eficiente ainda representa um desafio operacional. Diante disso, este trabalho objetivou realizar a caracterização físico-química de nós industriais de eucalipto para identificar possíveis rotas de valorização. A metodologia consistiu na coleta de amostras em fábrica, seguidas de análises de umidade, densidade aparente, perfil granulométrico e composição química estrutural. Os resultados revelaram uma biomassa com alta umidade (59,19%), baixa densidade aparente (0,402 g/cm³) e granulometria majoritariamente fina (93% retidos nas malhas de 4 e 8 mm). A composição química destacou um elevado teor de extrativos totais (15,67%) e holocelulose (67,51%), além de 16,82% de lignina total. Conclui-se que tais características limitam a reinserção direta do material no digestor (recozimento). Contudo, evidenciam o excelente potencial do resíduo como matéria-prima em biorrefinarias, seja para a extração de compostos bioativos ou para a conversão de carboidratos, promovendo a economia circular no setor florestal.
Palavras-chave: Biorrefinaria; Resíduos florestais; Economia circular.

Physicochemical characterization of knots generated in Kraft pulp production

Abstract: The kraft pulp industry generates fibrous residues, such as knots, whose efficient reuse still represents an operational challenge. Therefore, this study aimed to perform the physicochemical characterization of industrial eucalyptus knots to identify potential valorization routes. The methodology consisted of collecting samples from a mill, followed by analyses of moisture content, bulk density, particle size distribution, and structural chemical composition. The results revealed a biomass with high moisture content (59.19%), low bulk density (0.402 g/cm³), and predominantly fine particle size (93% retained on 4 and 8 mm meshes). The chemical composition highlighted a high content of total extractives (15.67%) and holocellulose (67.51%), in addition to 16.82% of total lignin. It is concluded that these characteristics limit the direct reinsertion of the material into the digester (recooking). However, they demonstrate the excellent potential of the residue as a raw material in biorefineries, whether for the extraction of bioactive compounds or for carbohydrate conversion, promoting the circular economy in the forestry sector.
Keywords: Biorefinery; Forest residues; Circular economy.

1. Introdução

A indústria de celulose movimenta milhões de toneladas anualmente, sendo o Brasil o segundo maior produtor e principal exportador mundial, com o recorde de 25,5 milhões de toneladas em 2024 (IBÁ, 2025). A obtenção da polpa ocorre majoritariamente pelo processo químico kraft, reconhecido pela alta qualidade da celulose e recuperação eficiente de reagentes (Bjapai, 2015). Contudo, a elevada escala desse processo gera expressivas quantidades de resíduos sólidos e subprodutos em suas diversas etapas. Segundo Monte et al. (2009), produzem-se cerca de 100 toneladas de resíduos para cada 550 toneladas de celulose, o que impõe um desafio ambiental e demanda estratégias de valorização alinhadas à economia circular.

Entre os resíduos orgânicos fibrosos, destacam-se os nós (incozidos ou rejeitos do digestor), que consistem em fragmentos de madeira parcialmente deslignificados. Sua formação decorre de características anatômicas, como áreas de inserção de galhos, ou de fatores operacionais, incluindo cavacos de grandes dimensões ou deficiência na impregnação pelo licor (Foelkel, 2007). Estratégias como o descarte em aterros ou a queima direta são tecnicamente ineficientes para esses resíduos, principalmente devido à alta umidade e alcalinidade residual ativa devido ao processo kraft. Assim, a reciclagem interna por meio do recozimento tem sido a alternativa mais ecoeficiente adotada para reincorporar o material e transformar esse passivo ambiental em incremento produtivo (Foelkel, 2007).

Apesar de o recozimento ser a principal prática industrial, ainda são escassos os estudos que caracterizam de forma abrangente as propriedades dos nós para investigar seu potencial em aplicações de maior valor agregado. Nesse contexto, este trabalho tem como objetivo realizar a caracterização físico-química, englobando densidade, teor de umidade, distribuição granulométrica e composição química estrutural, dos nós provenientes do processo de celulose kraft. Com base nos resultados, pretende-se identificar possíveis aplicações industriais, energéticas e tecnológicas para esse resíduo, fornecendo subsídios para sua valorização como matéria-prima alternativa e contribuindo para a sustentabilidade no setor.

2. Material e métodos

Os nós foram coletados em uma fábrica de celulose kraft, localizada no estado do Mato Grosso do Sul. Após a coleta, o material foi encaminhado à Universidade Federal de Viçosa (UFV), onde foi armazenado no Laboratório de Solos (UEPE – UFV) para posterior realização das análises de caracterização físico-química.

Inicialmente, retirou-se uma fração do material *in natura* para a determinação da umidade. O restante do resíduo foi homogeneizado e disposto em lona para secagem prévia, visando à redução do excesso de umidade e posteriormente foi submetido às análises de densidade, granulometria e Análise Química Estrutural.

Para a determinação do teor de umidade, uma alíquota de aproximadamente 4,5g do material foi pesada em balança analítica (Shimadzu, modelo ATX224R) e transferida para um cadinho de porcelana previamente seco em estufa. A amostra foi mantida em estufa a 100°C até atingir massa constante, sendo o teor de umidade calculado por diferença de massa utilizando a fórmula: Teor de Umidade (%) = [(Massa do cadinho com amostra úmida - Massa do cadinho com amostra seca) / Massa da amostra úmida] × 100.

A densidade aparente do material foi determinada utilizando-se um recipiente de volume conhecido (1000 cm^3). O resíduo foi adicionado até o preenchimento total do recipiente e, em seguida, a massa foi registrada. O cálculo da densidade foi realizado pela razão entre a massa do material e o volume ocupado.

A classificação granulométrica foi determinada com base na norma ISO 17827-1 (ISO, 2024). Para a realização do ensaio, foi separado um volume de 400 mL do material, o qual foi submetido à separação de partículas utilizando um agitador eletromagnético de peneiras, operando durante 10 minutos a uma rotação de 10 rpm. As peneiras utilizadas no experimento apresentaram aberturas de 50 mm, 31,5mm, 16mm, 8mm, 4mm, 2mm e 1 mm, além do fundo coletor. Após o peneiramento, as frações retidas em cada peneira foram pesadas individualmente utilizando béquer de 1 L como ,recipiente auxiliar e uma balança analítica.

Para a determinação da composição química estrutural do resíduo de nós, as amostras foram previamente moídas em um moinho de facas (Thomas Scientific, Modelo 4, EUA), utilizando-se a fração que passou pela peneira com malha de 40 mesh e ficou retida na peneira com malha de 60 mesh (ASTM, 1982). A determinação do teor absolutamente seco da madeira foi realizada conforme a norma TAPPI 264 om-88 (TAPPI, 1998). Os teores de extrativos foram determinados em duplicata, conforme a norma TAPPI 204 om-88 (TAPPI, 1996), utilizando-se o método de determinação de extrativos totais. Para a extração, empregou-se a mistura de etanol/tolueno como solvente, em substituição à mistura etanol/benzeno prevista na metodologia original, mantendo-se o material em contato com os solventes por um período de cinco horas.

Os teores de lignina insolúvel, por sua vez, foram determinados em duplicata pelo método Klason, modificado de acordo com o procedimento proposto por Gomide e

Demuner (1986). A lignina solúvel foi determinada por espectrometria, conforme Goldschimid (1971), a partir da diluição do filtrado proveniente do procedimento para obtenção da lignina insolúvel. O teor de lignina total foi obtido por meio da soma dos valores de lignina solúvel e insolúvel. O teor de holocelulose foi estimado por diferença, subtraindo-se do total os teores de extrativos e de lignina total, utilizando a fórmula: Holocelulose (%)=100−[Extrativos (%) +Lignina total (%)].

Os resultados foram apresentados por meio de estatística descritiva (média ± desvio padrão). Os dados foram processados e analisados no software Microsoft Excel.

3. Resultados e discussão

3.1. Propriedades Físicas e Distribuição Granulométrica

A caracterização física e dimensional é o primeiro passo para compreender os desafios de processabilidade dos nós e avaliar seu potencial energético e tecnológico, conforme proposto nos objetivos. Então, foram avaliados o teor de umidade, a densidade e o perfil granulométrico dos nós de *Eucalyptus spp*. A determinação do teor de umidade das amostras (Tabela 1) revelou um valor médio de 59,19% ± 0,32%

Tabela 1 – Resultados da determinação do teor de umidade e densidade das amostras de nós de *Eucalyptus* spp.

Análise	**Média**	**Desvio Padrão**
Teor de Umidade (%)	59,19	0,32
Densidade (g/cm³)	0,402	0,006

Embora existam poucos estudos específicos sobre esse resíduo, esse valor indica uma biomassa com elevada umidade, característica que pode limitar sua reinserção no processo de polpação kraft. Sob a perspectiva operacional, biomassa com elevada umidade tende a promover a diluição do licor branco durante a etapa de impregnação, reduzindo a concentração efetiva de álcali disponível para as reações de deslignificação (Gomide et al., 2005). Além disso, a maior quantidade de água presente no material demanda maior aporte de energia térmica para que o sistema atinja a temperatura de cozimento, o que pode comprometer a eficiência energética do processo (Gomide et al., 2005). Quando destinada ao aproveitamento energético por combustão, a elevada umidade também reduz o poder calorífico útil da biomassa, uma vez que parte significativa da energia liberada é consumida na evaporação da água, tornando

necessária uma etapa prévia de secagem para melhorar seu desempenho energético (Magaton et al., 2009; Gomide et al., 2005).

A determinação da densidade aparente das amostras (Tabela 1) revelou um valor médio de 0,402 ± 0,006 g cm^{-3}. Ao contrastar esse resultado com a densidade básica do lenho de clones de *Eucalyptus* destinados à produção de celulose, que normalmente varia entre 0,450 e 0,550 g cm^{-3} (Gomide et al., 2005; Coêlho, 2021), é importante ressaltar que se trata de grandezas metodologicamente distintas, uma vez que a primeira corresponde à densidade aparente de um material fragmentado, enquanto a segunda se refere à densidade básica da madeira sólida. Dessa forma, parte da diferença observada é esperada em razão da presença de espaços vazios entre as partículas e das diferenças inerentes aos métodos de determinação, não devendo ser interpretada isoladamente como indicativo de degradação ou baixa qualidade do material. Ainda assim, essa comparação permite uma avaliação qualitativa das características físicas dos nós e de seu comportamento esperado durante a polpação kraft, considerando que as propriedades físicas da madeira e dos cavacos estão relacionadas à quantidade de biomassa inserida no digestor, à impregnação pelo licor de cozimento e à eficiência operacional do processo. Regiões da madeira que apresentam características anatômicas distintas, como os nós, podem apresentar maior resistência à penetração do licor, favorecendo a ocorrência de cozimento incompleto e a permanência de fragmentos parcialmente cozidos após a polpação. Dessa forma, a geração de nós como resíduo está relacionada às características físicas e estruturais da madeira, sendo importante compreender essas propriedades para avaliar alternativas de aproveitamento desse material (Gomide et al., 2005; Coêlho, 2021).

Nesse contexto, a avaliação do perfil dimensional dos nós revelou que a massa se concentra quase em sua totalidade nas frações menores, com retenção majoritária nas malhas de 4 mm (48%) e 8 mm (45%), conforme demonstrado na Figura 1. Na operação industrial de polpação contínua, o controle dimensional dos cavacos é crítico, uma vez que a distribuição inadequada do tamanho das partículas pode comprometer a circulação do licor de cozimento e a uniformidade do processo. Partículas com dimensões reduzidas, próximas à classificação de *pin chips* (palitos) e finos, como aquelas retidas na malha de 4 mm, tendem a aumentar a compactação do leito no interior do digestor. Esse adensamento pode prejudicar a circulação homogênea do licor de cozimento, favorecendo a formação de regiões de subcozimento e supercozimento, além de aumentar o risco de entupimento das telas de extração (Magaton et al., 2009). Assim, considerando o predomínio de partículas de menores dimensões observado neste estudo, a reintrodução dos nós por meio do recozimento no digestor contínuo pode representar

um desafio operacional, especialmente em razão de seu comportamento semelhante ao das frações indesejadas de cavacos.

Figura 1 – Distribuição das frações granulométricas

Por outro lado, a mesma característica granulométrica pode ser considerada vantajosa quando o material é avaliado sob a perspectiva de uma biorrefinaria. A redução do tamanho das partículas promove o aumento da área superficial específica, favorecendo a penetração de solventes durante processos de extração de biocompostos e ampliando o acesso enzimático à matriz celulósica durante etapas de hidrólise (Zhu & Phan, 2010; Lima et al., 2023). Dessa maneira, embora a predominância de partículas menores possa limitar a eficiência da reintrodução dos nós no processo convencional de polpação kraft, essa mesma característica física pode contribuir para estratégias alternativas de valorização do resíduo, especialmente aquelas baseadas na extração de compostos de interesse e no aproveitamento de seus constituintes lignocelulósicos.

3.2. Composição Química Estrutural

O aspecto mais discrepante e limitante da composição macromolecular dos nós foi o expressivo teor de extrativos totais, quantificado em 15,67% (Tabela 2). Em madeiras de diferentes espécies de *Eucalyptus* destinadas à produção de celulose, o teor de extrativos geralmente apresenta variações conforme a espécie e as características do material avaliado. Neiva et al. (2015), ao analisarem diferentes espécies de *Eucalyptus*, encontraram teor médio de extrativos de 15,67% para nós, valor superior ao observado neste estudo (15,67%). Apesar da diferença entre os valores, os resultados indicam que os nós apresentam composição química diferenciada em relação ao lenho convencional, devido às suas características anatômicas e estruturais, que podem influenciar a concentração de compostos extrativos.

Tabela 2 – Composição química estrutural das amostras de nós de *Eucalyptus* spp.

Componente	Teor de Extrativo	Teor de Lignina Insolúvel	Teor de Lignina Solúvel	Teor de lignina total	Teor de holocelulose
Média	15,67	15,89	0,93	16,82	67,51

O teor de extrativos observado neste estudo ajuda a explicar as limitações técnicas associadas ao recozimento dos nós. Durante a polpação kraft, parte desses compostos consome álcali por meio de reações paralelas, reduzindo a eficiência da deslignificação e aumentando a demanda por reagentes químicos (Sarto & Sansígolo, 2010). Além disso, compostos lipofílicos presentes nos extrativos podem permanecer na polpa e nas correntes de processo, favorecendo a formação de depósitos conhecidos como *pitch*, que comprometem a operação industrial e a qualidade da celulose produzida (Freire et al., 2005; Gutiérrez et al., 1998; Gutiérrez et al., 2001).

A análise química revelou ainda um teor de lignina total de 16,82%, sendo 15,89% correspondente à fração insolúvel e 0,93% à fração solúvel, um valor notavelmente inferior aos reportados tradicionalmente para o gênero (Gomide et al., 2005). O menor teor percentual de lignina pode estar relacionado à elevada participação
dos extrativos na composição química dos nós, alterando a proporção relativa entre os principais constituintes da biomassa.

3.3. Potencial de Aplicação e Perspectivas

Os resultados obtidos indicam que os nós provenientes da polpação kraft apresentam potencial para aplicações de maior valor agregado, ampliando as possibilidades de aproveitamento desse resíduo em estratégias de biorrefinaria e economia circular. O elevado teor de extrativos totais (15,67%) confere a esse subproduto potencial para a recuperação de compostos bioativos de interesse industrial. (Domingues et al., 2011). Entre esses constituintes destacam-se ácidos triterpênicos, compostos fenólicos e outras moléculas bioativas naturalmente presentes nos tecidos lenhosos de *Eucalyptus*, que apresentam potencial de aplicação nas indústrias química, cosmética, farmacêutica e de materiais, agregando valor à biomassa antes destinada apenas ao recozimento ou ao aproveitamento energético (Domingues et al., 2011).

Após a remoção desses extrativos, a matriz sólida residual mantém um expressivo teor de holocelulose (67,51%), tornando-se uma matéria-prima promissora para rotas de conversão biotecnológica. Essa fração carboidratada pode ser empregada em processos como a hidrólise enzimática para produção de etanol de segunda geração e outros bioprodutos de base lignocelulósica, em razão da elevada disponibilidade de polissacarídeos fermentescíveis (Zhu & Phan 2010). Dessa forma, o aproveitamento sequencial dos extrativos e da fração carboidratada

evidencia o potencial dos nós como matéria-prima para processos integrados de biorrefinaria, contribuindo para a valorização desse resíduo e para o desenvolvimento de uma cadeia produtiva mais sustentável.

4. Conclusões

A caracterização físico-química dos nós provenientes do processo de celulose kraft evidenciou que suas propriedades intrínsecas impõem limitações técnicas à sua tradicional reinserção na polpação (recozimento) ou à queima direta. O elevado teor de umidade, a baixa densidade aparente, a granulometria majoritariamente fina e, principalmente, o alto teor de extrativos totais justificam os desafios operacionais relatados na indústria, como o maior consumo de reagentes químicos, prejuízos na circulação do licor e redução do rendimento volumétrico.

Por outro lado, o estudo demonstra que essas mesmas características conferem aos nós um potencial para aplicações de maior valor agregado no conceito de biorrefinaria. Conclui-se, portanto, que redirecionar o aproveitamento dos nós para além do recozimento convencional é uma estratégia promissora para fomentar a economia circular e a sustentabilidade no setor de celulose.

5. Agradecimentos

À Universidade Federal de Viçosa (UFV), ao Departamento de Engenharia Florestal (DEF), ao Laboratório de Resíduos da Indústria Florestal (LABRIF), ao Laboratório de Painéis e Energia da Madeira (LAPEM), à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG), à Empresa Brasileira de Pesquisa e Inovação Industrial (EMBRAPII) e à Arauco Celulose do Brasil S.A.

6. Referências bibliográficas

American Society for Testing and Materials. (1982). *Standard methods of evaluating properties of wood-base fiber and particle materials*. ASTM.

Bajpai, P. (2015). *Pulp and paper industry: Energy conservation*. Elsevier.

Coêlho, M. U. (2021). *Impacto da densidade básica da madeira de Eucalyptus na eficiência dos processos de polpação kraft estendidos* (Dissertação de mestrado). Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba.

Domingues, R. M. A., Patinha, D. J. S., Sousa, G. D. A., Villaverde, J. J., Silva, C. M., Freire, C. S. R., Silvestre, A. J. D., & Neto, C. P. (2011). Eucalyptus biomass residues from agro-forest and pulping industries as sources of high-value triterpenic compounds. *Cellulose Chemistry and Technology*, 45(7-8), 475-481.

Foelkel, C. (2007). Resíduos sólidos industriais da produção de celulose kraft de eucalipto. *Eucalyptus Online Book & Newsletter*, 5(5), 1-52.

Freire, C. S. R., Silvestre, A. J. D., Neto, C. P., & Cavaleiro, J. A. S. (2005). Lipophilic extractives in Eucalyptus globulus kraft pulps. *Journal of Wood Chemistry and Technology*, 25(1), 67-80. https://doi.org/10.1081/WCT-200053915

Goldschmidt, O. (1971). Ultraviolet spectra. Em K. V. Sarkanen & C. H. Ludwig (Eds.), Lignins: Occurrence, formation, structure and reactions (pp. 241–266). John Wiley & Sons.

Gomide, J. L., & Demuner, B. J. (1986). Determinação do teor de lignina em material lenhoso: Método Klason modificado. *O Papel*, 47(8), 36-38.

Gomide, J. L., Colodette, J. L., Oliveira, R. C., & Silva, C. M. (2005). Caracterização tecnológica, para produção de celulose, da nova geração de clones de Eucalyptus no Brasil. *Revista Árvore*, 29(1), 129-137. https://doi.org/10.1590/S0100-67622005000100014

Gutiérrez, A., del Río, J. C., González-Vila, F. J., & Martín, F. (1998). Analysis of lipophilic extractives from wood and pitch deposits by solid-phase extraction and gas chromatography. *Journal of Chromatography A*, 823(1-2), 449-455. https://doi.org/10.1016/S0021-9673(98)00472-3

Gutiérrez, A., del Río, J. C., Martínez, A. T., & Martínez, M. J. (2001). The biotechnological control of pitch in paper pulp manufacturing. *Trends in Biotechnology*, 19(9), 340-348. https://doi.org/10.1016/S0167-7799(01)01704-2

Indústria Brasileira de Árvores. (2025). *Relatório anual 2025*. IBÁ. https://iba.org/relatorios

Magaton, A. S., Colodette, J. L., Gouvêa, A. F. G., & Gomide, J. L. (2009). Eucalyptus wood quality and its impact on kraft pulp production and use. *TAPPI Journal*, 8(8), 32-39.

Monte, M. C., Fuente, E., Blanco, A., & Negro, C. (2009). Waste management from pulp and paper production in the European Union. *Waste Management*, 29(1), 293-308. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2008.02.002

Neiva, D. M., Araújo, S., Gominho, J., de Sousa, A. P., & Pereira, H. (2015). Pulping potential of young eucalypts: a comparative study of wood and pulp properties of 12 eucalypt species. *BioResources*, 10(3), 5227-5236.

Sarto, C., & Sansígolo, C. A. (2010). Cinética da remoção de lignina, hexenuronanas e carboidratos no cozimento kraft de Eucalyptus urograndis. *Scientia Forestalis*, 38(88), 643-652.

Technical Association of the Pulp and Paper Industry. (1996). *TAPPI T 204 om-88: Solvent extractives of wood and pulp*. TAPPI Press.

Technical Association of the Pulp and Paper Industry. (1998). *TAPPI T 264 om-88: Preparation of wood for chemical analysis*. TAPPI Press.

Wallis, A. F. A., Wearne, R. H., & Wright, P. J. (1996). Chemical analysis of polysaccharides in plantation eucalypt woods and pulps. *Appita Journal*, 49(4), 258-262.

Zhu, J. Y., & Pan, X. (2010). Woody biomass pretreatment for cellulosic ethanol production: technology and energy consumption evaluation. *Bioresource Technology*, 101(13), 4992-5002. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.11.007

International Organization for Standardization. (2024). ISO 17827-1:2024: Solid biofuels Determination of particle size distribution for uncompressed fuels. https://standards.iteh.ai/catalog/standards/cen/fb9d11d8-a4c8-496e-9e5d-f3bf8ed1f781/en-iso-17827-1-2024?srsltid=AfmBOop4j7A7SbpRwzEuf0IpFbn9RYGGvdw9yuK97Ne0N3lXy881F16q

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Caracterização de biomassas de bambu e ligninas kraft em uma abordagem de biorrefinaria

Mathias Teixeira Marçal[1]; Ana Márcia Macedo Ladeira Carvalho[1]; Marcelo Moreira da Costa[1]

[1] Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, Brasil

Resumo: O bambu é uma matéria-prima lignocelulósica de rápido crescimento com potencial para a produção integrada de polpa e coprodutos em uma abordagem de biorrefinaria. Este trabalho objetivou caracterizar as biomassas de *Bambusa nutans* e *Dendrocalamus asper*, avaliar seu desempenho na polpação kraft e determinar propriedades do licor preto fraco e das ligninas recuperadas. A composição química foi determinada por métodos normalizados, e a estrutura da lignina foi avaliada por Py-GC/MS. Foram realizados dois cozimentos independentes por biomassa, utilizando 18% de álcali efetivo, 35,7% de sulfidez, relação licor/biomassa de 4:1 e temperatura de 155 °C por 180 min. Os resultados foram analisados descritivamente. As biomassas apresentaram aproximadamente 71% de holocelulose, 26% de lignina total e 5% de extrativos. Nas condições avaliadas, *B. nutans* apresentou menor número kappa (11,1), maior alvura (33,1%) e seletividade (3,79), enquanto *D. asper* apresentou maior rendimento depurado (49,1%) e viscosidade intrínseca (1.415 $dm^3\ kg^{-1}$). Os licores pretos fracos apresentaram 15,8–18,8% de sólidos totais e 41,0–44,4% de materiais inorgânicos. As ligninas kraft recuperadas continham 52–53% de carbono e poder calorífico superior entre 22,4 e 22,5 MJ kg^{-1}. Em conjunto, os resultados indicaram maior extensão de deslignificação para *B. nutans*, maiores valores de rendimento e viscosidade para *D. asper* e potencial energético semelhante para as ligninas.

Palavras-chave: Licor preto; Polpação química; Py-GC/MS

Characterization of Bamboo Biomasses and Kraft Lignins in a Biorefinery Approach

Abstract: Bamboo is a fast-growing lignocellulosic feedstock with potential for the integrated production of pulp and coproducts within a biorefinery approach. This study aimed to characterize the biomasses of *Bambusa nutans* and *Dendrocalamus asper*, evaluate their performance in kraft pulping, and determine the properties of weak black liquor and recovered lignins. Chemical composition was determined using standard methods, and lignin structure was evaluated by Py-GC/MS. Two independent cooks were conducted per feedstock using 18% effective alkali, 35.7% sulfidity, a liquor-to-biomass ratio of 4:1, and a temperature of 155 °C maintained for 180 min. The results were analyzed descriptively. The biomass samples contained approximately 71% holocellulose, 26% total lignin, and 5% extractives. Under the evaluated conditions, *B. nutans* showed a lower kappa number (11.1), higher brightness (33.1%), and higher selectivity (3.79), whereas *D. asper* showed a higher screened yield (49.1%) and intrinsic viscosity (1,415 $dm^3\ kg^{-1}$). The weak black liquors contained 15.8–18.8% total solids and 41.0–44.4% inorganic matter. The recovered kraft lignins contained 52–53% carbon and exhibited higher heating values ranging from 22.4 to 22.5 MJ kg^{-1}. Overall, the results indicated a greater extent of delignification for *B. nutans*, higher yield and viscosity values for *D. asper*, and similar energy potential for both lignins.

Keywords: Black liquor; Chemical pulping; Py-GC/MS

1. Introdução

A diversificação das matérias-primas utilizadas pela indústria de celulose é relevante para ampliar a disponibilidade de fibras renováveis e favorecer sistemas produtivos adaptados às condições regionais. Entre as biomassas não madeireiras, o bambu se destaca pelo rápido crescimento, elevada produtividade e composição lignocelulósica compatível com a fabricação de polpa. Dependendo da espécie, idade e posição no colmo, podem ser observados teores elevados de carboidratos estruturais, dimensões fibrosas adequadas e níveis de lignina semelhantes aos encontrados em algumas matérias-primas tradicionalmente utilizadas na indústria (Chaudhary et al., 2024; Khantayanuwong et al., 2023; Scurlock et al., 2000).

A aptidão de uma biomassa para polpação kraft não depende apenas do teor de celulose ou lignina. Extrativos, materiais inorgânicos, hemiceluloses e arquitetura da lignina influenciam o consumo de reagentes, a formação de depósitos, a deslignificação e a qualidade da polpa. A distribuição das unidades p-hidroxifenila (H), guaiacila (G) e siringila (S), bem como a proporção entre S e G, constitui um indicador estrutural útil, embora o comportamento no cozimento também seja condicionado pela acessibilidade da parede celular e pelas ligações lignina-carboidrato (Lourenço et al., 2012; Sharma et al., 2018).

Além da polpa, o processo kraft gera licor preto, que contém lignina dissolvida, carboidratos degradados e compostos inorgânicos provenientes do licor de cozimento. Em unidades integradas, parte da lignina pode ser recuperada por acidificação, reduzindo a carga do sistema de recuperação e originando uma matéria-prima renovável para combustíveis, materiais poliméricos, adsorventes e compostos aromáticos. A composição da lignina kraft depende da espécie, das condições de cozimento e da estratégia de precipitação, o que torna necessária sua caracterização antes da definição de aplicações (Argyropoulos et al., 2023; Jardim et al., 2022).

Nesse contexto, o objetivo deste trabalho foi caracterizar química e estruturalmente as biomassas de *Bambusa nutans* e *Dendrocalamus asper*, avaliar seu desempenho em polpação kraft convencional e determinar propriedades do licor preto fraco e das ligninas kraft recuperadas, discutindo o potencial de integração desses produtos em uma abordagem de biorrefinaria.

2. Material e métodos

a. Materiais e preparação das biomassas

Foram utilizadas amostras de *Bambusa nutans* Wall. ex Munro e *Dendrocalamus asper* (Schult. & Schult.f.) Backer, com idade aproximada de dois a três anos. O material de D. asper foi coletado no setor de Silvicultura do Departamento de Engenharia Florestal da Universidade Federal de Viçosa, em Viçosa, Minas Gerais, e o material de *B. nutans* foi obtido em São João do Oeste, Santa Catarina. Os colmos foram transformados em cavacos e classificados conforme a TAPPI T 257 sp-21. Uma fração foi destinada à polpação e outra foi moída em moinho Wiley, peneirada entre 40 e 60 mesh e acondicionada a 25 °C e 50% de umidade relativa por 24 h.

b. Caracterização química e estrutural

Os teores de extrativos totais foram determinados segundo a TAPPI T 204 om-88. A lignina insolúvel e a lignina solúvel foram determinadas segundo a TAPPI T 222 om-83 e a TAPPI UM 250, respectivamente. A lignina total foi calculada pela soma das frações solúvel e insolúvel. Também foram determinados holocelulose, pentosanas, materiais inorgânicos e material insolúvel em ácido clorídrico. Carbono, hidrogênio, nitrogênio e enxofre foram quantificados em analisador LECO TruSpec CHNS-O; o oxigênio foi estimado por diferença.

A composição estrutural da lignina foi avaliada por pirólise acoplada à cromatografia gasosa e espectrometria de massas. Aproximadamente 0,1 mg de amostra foi pirolisado a 550 °C por 6 s. Os compostos foram identificados por comparação com a biblioteca NIST, utilizando similaridade superior a 90%, e classificados como derivados das unidades H, G ou S. A relação S/G foi calculada a partir das áreas relativas dos marcadores correspondentes.

c. Polpação kraft e caracterização das polpas

Foram realizados dois cozimentos independentes para cada espécie em digestor MK 610-2, utilizando 1 kg de biomassa seca por batelada, 18% de álcali efetivo, 35,7% de sulfidez e relação licor/biomassa de 4:1. A temperatura foi elevada até 155 °C em aproximadamente 60 min e mantida por 180 min. Após o cozimento, as polpas foram lavadas e depuradas em equipamento Voith com placa ranhurada de 0,2 mm. Determinaram-se rendimento depurado, número kappa (TAPPI T 236 cm-85), álcali efetivo residual, viscosidade intrínseca (TAPPI T 230 cm-89), alvura (TAPPI T 525 om-22), ácidos hexenurônicos (TAPPI T 282 om-23) e teor de pentosanas. A seletividade foi expressa pela razão entre rendimento depurado e número kappa.

d. Recuperação e caracterização da lignina kraft

O licor preto fraco foi concentrado até 30–40% de sólidos e acidificado inicialmente com dióxido de carbono até pH 7–8. A lignina parcialmente precipitada foi resuspensa em solução de ácido sulfúrico, com ajuste final para pH 2–3, seguida de filtração e lavagem com

água acidificada. No licor foram determinados pH, sólidos totais, materiais inorgânicos, fração insolúvel em HCl e poderes caloríficos superior e inferior. As ligninas kraft foram analisadas quanto à composição elementar e aos poderes caloríficos segundo a TAPPI T 684 om-22.

e. Tratamento dos dados

Os resultados da polpação e de pH, sólidos totais e álcali efetivo residual do licor preto fraco foram expressos como média ± desvio-padrão de dois cozimentos independentes por biomassa (n = 2). As demais determinações apresentadas com variabilidade foram realizadas em duplicata analítica e expressas como média ± desvio-padrão amostral (n = 2); essas leituras caracterizam a repetibilidade analítica e não constituem unidades experimentais independentes. Os resultados de Py-GC/MS foram tratados descritivamente. Devido ao número reduzido de cozimentos, não foram aplicados testes inferenciais, e as comparações entre biomassas foram descritivas.

3. Resultados e discussão

a. Composição elementar e química das biomassas

As duas biomassas apresentaram composição elementar típica de materiais lignocelulósicos, com carbono próximo de 45%, hidrogênio em torno de 6% e baixos teores de nitrogênio e enxofre (Tabela 1). Os valores de materiais inorgânicos foram próximos de 2%, condição favorável ao processamento, pois cargas minerais elevadas podem aumentar incrustações e dificultar a recuperação química. A semelhança entre carbono e oxigênio indica potencial energético comparável, embora a aplicação principal dependa da fração fibrosa e do comportamento no cozimento (Vassilev et al., 2010).

Tabela 1 – Composição elementar e química das biomassas de bambu

Parâmetro	Bn	Da
Carbono (%)	45,10 ± 0,28	44,92 ± 0,06
Hidrogênio (%)	6,32 ± 0,16	6,20 ± 0,19
Oxigênio (%)	45,93 ± 0,02	46,25 ± 0,04
Nitrogênio (%)	0,439 ± 0,001	0,350 ± 0,013
Enxofre (%)	0,137 ± 0,001	0,146 ± 0,019
Extrativos totais (%)	4,97 ± 0,03	5,14 ± 0,11
Lignina total (%)	26,19 ± 0,44	25,58 ± 0,15
Holocelulose (%)	70,93 ± 0,93	71,21 ± 0,25
Pentosanas (%)	17,54 ± 0,43	18,24 ± 0,18
Materiais inorgânicos (%)	2,07 ± 0,20	2,13 ± 0,03

Bn = Bambusa nutans; Da = Dendrocalamus asper.

Os teores de holocelulose foram semelhantes e superiores a 70%, confirmando a disponibilidade de carboidratos estruturais para produção de polpa. A lignina total também foi próxima entre as espécies, com 26,19 ± 0,44% em *B. nutans* e 25,58 ± 0,15% em *D. asper*. Os teores de extrativos totais também foram próximos, com 4,97 ± 0,03% em *B. nutans* e 5,14 ± 0,11% em *D. asper*. Embora os extrativos possam consumir reagentes, participar da formação de depósitos e alterar a molhabilidade dos cavacos, a proximidade entre os teores totais indica que esse parâmetro, isoladamente, não explica o desempenho distinto observado na polpação (Chaudhary et al., 2024).

b. Estrutura da lignina das biomassas

A análise por Py-GC/MS mostrou predominância conjunta de unidades G e S, com baixa participação de unidades H. As relações S/G foram inferiores a 1 para ambas as espécies, indicando leve predominância de marcadores guaiacílicos. Embora valores mais elevados de S/G sejam frequentemente associados à maior frequência de ligações éter suscetíveis à clivagem, a deslignificação não pode ser explicada isoladamente por essa razão, pois condensação, distribuição das ligações e acessibilidade do licor também influenciam o processo (Lourenço et al., 2012; Nunes et al., 2010).

Tabela 2 – Composição estrutural da lignina nas biomassas de bambu

Parâmetro estrutural	***B. nutans***	***D. asper***
Unidades S – área (%)	17,72	15,94
Unidades G – área (%)	19,48	16,15
Unidades H – área (%)	2,59	2,75
Relação S/G	0,91	0,99

Resultados de Py-GC/MS apresentados de forma descritiva, sem medida de variabilidade.

c. Desempenho na polpação kraft

Os valores médios e os respectivos desvios-padrão dos principais indicadores obtidos na polpação kraft são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 – Indicadores descritivos da polpação kraft das biomassas de bambu

Parâmetro de polpação	***B. nutans***	***D. asper***
Número kappa	11,1 ± 0,5	18,2 ± 0,8
Rendimento depurado (%)	41,8 ± 1,8	49,1 ± 0,0
Viscosidade intrínseca ($dm^3\ kg^{-1}$)	1.294 ± 14	1.415 ± 31
Alvura (%)	33,1 ± 0,7	27,1 ± 1,1
Pentosana (%)	17,8 ± 0,4	14,2 ± 0,7
HexA (mmol/g)	9,45 ± 0,8	12,40 ± 0,6
Seletividade	3,79 ± 0,34	2,71 ± 0,11

Nas condições avaliadas, os valores médios de número kappa, alvura e seletividade foram, respectivamente, 11,1, 33,1% e 3,79 para *B. nutans*, e 18,2, 27,1% e 2,71 para *D. asper*. A maior alvura de *B. nutans* foi coerente com a remoção mais intensa de lignina. Em contrapartida, *D. asper* apresentou maiores médias de rendimento depurado e viscosidade, indicando maior preservação de massa e da viscosidade da polpa, embora parte do rendimento possa estar associada ao maior teor de lignina residual. Esses contrastes representam tendências dos dois cozimentos realizados por biomassa e não evidência de diferença estatística entre populações. O compromisso entre rendimento e deslignificação é típico da polpação kraft e deve ser considerado na comparação entre matérias-primas (Favaro et al., 2021).

O valor de ácidos hexenurônicos foi maior na polpa de *D. asper*. Como essas estruturas consomem permanganato durante a determinação do número kappa, uma fração do contraste observado não representa exclusivamente lignina residual (Li & Gellerstedt, 1997). Ainda assim, a Py-GC/MS da polpa detectou marcadores fenólicos residuais em *D. asper*, enquanto não foram identificados marcadores de lignina nas condições analíticas empregadas na polpa de *B. nutans*, resultado coerente com a maior extensão de deslignificação desta biomassa nas condições avaliadas.

Os valores de pentosanas também contrastaram entre as polpas: *B. nutans* apresentou 17,8%, valor próximo ao da biomassa original, ao passo que *D. asper* apresentou 14,2%. A preservação de hemiceluloses pode favorecer ligações interfibras e rendimento, desde que não seja acompanhada por lignina residual excessiva. No conjunto das determinações, a polpa de *B. nutans* reuniu menor kappa, maior seletividade e maior retenção de pentosanas nas condições avaliadas (Pere et al., 2019).

d. Características do licor preto fraco e das ligninas kraft

Os licores pretos apresentaram pH alcalino, elevados teores de sólidos e grande participação de materiais inorgânicos (Tabela 4). O álcali efetivo residual médio foi 3,1 ± 0,1 g L^{-1} no LPF-Bn, enquanto no LPF-Da foi registrado 0,0 ± 0,0 g L^{-1}. Esse contraste sugere maior consumo do álcali disponível no cozimento de *D. asper* e deve ser considerado na interpretação do maior número kappa. A fração inorgânica reflete a presença de sais de sódio do processo kraft e reduz o poder calorífico do licor em base seca. A composição de licores industriais depende da carga alcalina, do grau de deslignificação e da matéria-prima processada (Cardoso et al., 2009).

Tabela 4 – Caracterização do licor preto fraco e das ligninas kraft recuperadas

Parâmetro	LPF- *B.nutans*	LPF- *D.asper*	LK- *B.nutans*	LK- *D.asper*
Carbono (%)	38,1 ± 0,1	38,1 ± 0,1	53,1 ± 0,1	52,2 ± 0,1
Hidrogênio (%)	3,72 ± 0,01	3,71 ± 0,00	4,82 ± 0,02	4,69 ± 0,07
Nitrogênio (%)	0,23 ± 0,01	0,57 ± 0,02	0,26 ± 0,01	0,67 ± 0,02
Enxofre (%)	4,87 ± 0,01	4,28 ± 0,01	6,38 ± 0,04	7,17 ± 0,22
pH	12,2 ± 0,3	11,3 ± 0,0	–	–
Sólidos totais (%)	15,78 ± 0,04	18,83 ± 0,02	–	–
Álcali efetivo residual (g L^{-1})	3,1 ± 0,1	0,0 ± 0,0	–	–
PCS (MJ kg^{-1})	15,5 ± 0,1	15,1 ± 0,3	22,5 ± 0,1	22,4 ± 0,1
PCI (MJ kg^{-1})	14,7 ± 0,1	14,4 ± 0,4	21,4 ± 0,0	21,4 ± 0,1
Materiais inorgânicos (%)	44,37 ± 0,17	40,99 ± 0,17	–	–
Insolúveis em HCl (%)	1,48 ± 0,04	1,44 ± 0,03	–	–

A precipitação promoveu enriquecimento da fração aromática: o teor de carbono foi de 38,1 ± 0,1% nos dois licores e aumentou para 53,1 ± 0,1% e 52,2 ± 0,1% nas ligninas de *B. nutans* e *D. asper*, respectivamente. O poder calorífico superior aumentou de 15,5 ± 0,1 e 15,1 ± 0,3 MJ kg^{-1} nos licores para 22,5 ± 0,1 e 22,4 ± 0,1 MJ kg^{-1} nas ligninas correspondentes. Os resultados indicam que a lignina recuperada pode ser utilizada como combustível sólido de maior densidade energética ou como insumo para rotas de valorização química.

Os teores de enxofre das ligninas foram superiores aos observados nas biomassas, característica relacionada ao uso de sulfeto no processo kraft. Esse aspecto deve ser considerado em aplicações térmicas, catalíticas ou poliméricas. Ainda assim, a lignina kraft representa uma plataforma renovável relevante, desde que sejam estabelecidas especificações de pureza, massa molar, grupos funcionais e estabilidade térmica para cada aplicação (Argyropoulos et al., 2023).

De forma integrada, os dados descritivos indicam que, nas condições avaliadas, *B. nutans* apresentou maior extensão de deslignificação, enquanto *D. asper* apresentou maior rendimento depurado e viscosidade. As ligninas das duas biomassas exibiram composição elementar e potencial energético semelhantes. Como os materiais foram obtidos em locais distintos, os contrastes observados não devem ser atribuídos exclusivamente à espécie. Ainda assim, os resultados sustentam uma estratégia de biorrefinaria em que a polpa constitui o produto principal e a lignina recuperada amplia o aproveitamento do carbono da biomassa.

4. Conclusões

As biomassas de *Bambusa nutans* e *Dendrocalamus asper* apresentaram altos teores de holocelulose, lignina total próxima de 26%, extrativos totais próximos de 5% e baixos teores de

materiais inorgânicos, confirmando seu potencial para polpação química. Nos dois cozimentos independentes realizados por biomassa, *B. nutans* apresentou menores valores médios de número kappa e maiores valores médios de alvura e seletividade, enquanto *D. asper* apresentou maiores médias de rendimento depurado e viscosidade. Esses resultados indicam maior extensão de deslignificação para *B. nutans* e maior preservação de massa para *D. asper* nas condições estudadas; devido ao número reduzido de repetições e às diferentes origens dos materiais, devem ser interpretados como tendências experimentais, e não como superioridade geral de uma espécie. As ligninas kraft recuperadas apresentaram cerca de 52–53% de carbono e poder calorífico superior próximo de 22,5 MJ kg^{-1}, evidenciando potencial energético semelhante. A recuperação de lignina amplia o aproveitamento do bambu em uma abordagem de biorrefinaria, embora aplicações de maior valor agregado exijam caracterizações adicionais de pureza e propriedades moleculares.

5. Agradecimentos

Os autores agradecem à Universidade Federal de Viçosa, ao Departamento de Engenharia Florestal e ao Laboratório de Celulose e Papel pelo apoio institucional e laboratorial durante a preparação, a polpação e a caracterização das amostras.

6. Referências bibliográficas

Argyropoulos, D. D. S., Crestini, C., Dahlstrand, C., Furusjö, E., Gioia, C., Jedvert, K., Henriksson, G., Hulteberg, C., Lawoko, M., Pierrou, C., Samec, J. S. M., Subbotina, E., Wallmo, H., & Wimby, M. (2023). Kraft lignin: A valuable, sustainable resource, opportunities and challenges. ChemSusChem, 16(23), e202300492. https://doi.org/10.1002/cssc.202300492

Cardoso, M., de Oliveira, É. D., & Passos, M. L. (2009). Chemical composition and physical properties of black liquors and their effects on liquor recovery operation in Brazilian pulp mills. Fuel, 88(4), 756–763. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2008.10.016

Chaudhary, U., Malik, S., Rana, V., & Joshi, G. (2024). Bamboo in the pulp, paper and allied industries. Advances in Bamboo Science, 7, 100069. https://doi.org/10.1016/j.bamboo.2024.100069

Favaro, J. S. C., Ventorim, G., de Oliveira, I. R., & de Oliveira, C. R. (2021). Temperature and effective alkali effect on brown pulp kraft cooking. Nordic Pulp & Paper Research Journal, 36(2), 227–233. https://doi.org/10.1515/npprj-2020-0085

Jardim, J. M., Hart, P. W., Lucia, L. A., Jameel, H., & Chang, H.-M. (2022). The effect of the kraft pulping process, wood species, and pH on lignin recovery from black liquor. Fibers, 10(2), 16. https://doi.org/10.3390/fib10020016

Khantayanuwong, S., Yimlamai, P., Chitbanyong, K., Wanitpinyo, K., Pisutpiched, S., Sungkaew, S., Sukyai, P., & Puangsin, B. (2023). Fiber morphology, chemical composition, and properties of kraft pulping handsheet made from four Thailand bamboo species. Journal of Natural Fibers, 20(1), 2150924. https://doi.org/10.1080/15440478.2022.2150924

Li, J., & Gellerstedt, G. (1997). The contribution to kappa number from hexeneuronic acid groups in pulp xylan. Carbohydrate Research, 302(3–4), 213–218. https://doi.org/10.1016/S0008-6215(97)00125-0

Lourenço, A., Gominho, J., Marques, A. V., & Pereira, H. (2012). Reactivity of syringyl and guaiacyl lignin units and delignification kinetics in the kraft pulping of Eucalyptus globulus wood using Py-GC–MS/FID. Bioresource Technology, 123, 296–302. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.07.092

Nunes, C. A., Lima, C. F., Barbosa, L. C. A., Colodette, J. L., Gouveia, A. F. G., & Silvério, F. O. (2010). Determination of Eucalyptus spp. lignin S/G ratio: A comparison between methods. Bioresource Technology, 101(11), 4056–4061. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.01.012

Pere, J., Pääkkönen, E., Ji, Y., & Retulainen, E. (2019). Influence of the hemicellulose content on the fiber properties, strength, and formability of handsheets. BioResources, 14(1), 251–263. https://doi.org/10.15376/biores.14.1.251-263

Scurlock, J. M. O., Dayton, D. C., & Hames, B. (2000). Bamboo: An overlooked biomass resource? Biomass and Bioenergy, 19(4), 229–244. https://doi.org/10.1016/S0961-9534(00)00038-6

Sharma, B., Shah, D. U., Beaugrand, J., Janeček, E. R., Scherman, O. A., & Ramage, M. H. (2018). Chemical composition of processed bamboo for structural applications. Cellulose, 25(6), 3255–3266. https://doi.org/10.1007/s10570-018-1789-0

Technical Association of the Pulp and Paper Industry. (1983). Acid-insoluble lignin in wood and pulp (TAPPI T 222 om-83). TAPPI Press.

Technical Association of the Pulp and Paper Industry. (1985). Kappa number of pulp (TAPPI T 236 cm-85). TAPPI Press.

Technical Association of the Pulp and Paper Industry. (1988). Solvent extractives of wood and pulp (TAPPI T 204 om-88). TAPPI Press.

Technical Association of the Pulp and Paper Industry. (1989). Viscosity of pulp (capillary viscometer method) (TAPPI T 230 cm-89). TAPPI Press.

Technical Association of the Pulp and Paper Industry. (2011). Acid-soluble lignin in wood and pulp (TAPPI UM 250). TAPPI Press.

Technical Association of the Pulp and Paper Industry. (2021). Sampling and preparing wood for analysis (TAPPI T 257 sp-21). TAPPI Press.

Technical Association of the Pulp and Paper Industry. (2022a). Diffuse brightness of paper, paperboard and pulp (d/0) - ultraviolet level C (TAPPI T 525 om-22). TAPPI Press.

Technical Association of the Pulp and Paper Industry. (2022b). Gross heating value of black liquor (TAPPI T 684 om-22). TAPPI Press.

Technical Association of the Pulp and Paper Industry. (2023). Hexeneuronic acid content of chemical pulp (TAPPI T 282 om-23). TAPPI Press.

Vassilev, S. V., Baxter, D., Andersen, L. K., & Vassileva, C. G. (2010). An overview of the chemical composition of biomass. Fuel, 89(5), 913–933. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2009.10.022

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Caracterização energética de biocarvões de resíduos de madeira de seringueira (*Hevea brasiliensis*) em diferentes parâmetros de pirólise

Isabella Santana Sampaio[1]; Raquel Julia Cipriano dos Santos[1]; Vitoria Cristina Avelino Faria[1]; Braulio da Silva de Oliveira[1]; Renata Lopes Moreira[1]; Kleryton Luiz Alves de Oliveira[1]; Antônio de Pádua Alvarenga[1]; Juliana Dias de Melo[1]

[1] Universidade Federal de Viçosa

Resumo: Este trabalho teve como objetivo produzir e caracterizar biocarvões de resíduos de madeira de seringueira (*Hevea brasiliensis*), avaliando a influência da temperatura e tempo de residência de pirólise. Os biocarvões foram produzidos em mufla avaliando-se a temperatura final (450, 550 e 650ºC) e tempero de residência (40, 45 e 60 minutos). Os biocarvões foram avaliados quanto a sua composição química imediata, poder calorífico superior, densidade a granel e densidade energética. O aumento da temperatura promoveu aumento do carbono fixo, redução dos materiais voláteis e aumento do poder calorífico superior. A densidade energética variou de 3257,40 a 3651,31 MJ m^{-3}. Os biocarvões produzidos a 650ºC e 60 minutos tiveram os maiores desempenhos energéticos em relação aos demais. Os resultados confirmam o potencial da madeira de seringueira para produção de biocarvão destinado a aplicações energéticas. Além disso, os resultados obtidos contribuem para ampliar o conhecimento sobre o uso sustentável desses resíduos lignocelulósicos.

Palavras-chave: Carbonização; Biomassa residual; Poder Calorífico Superior.

Energy characterization of biochars produced from rubber tree wood (*Hevea brasiliensis*)

Abstract: This study aimed to produce and characterize biochars produced from rubber tree wood residues (Hevea brasiliensis), assessing the effects of pyrolysis temperature and residence time. The biochars were produced in a muffle furnace by varying the final temperature (450, 550, and 650 °C) and residence time (40, 45, and 60 minutes). The biochars were evaluated through proximate analysis, higher heating value, bulk density, and energy density. Increasing pyrolysis temperature promoted an increase in fixed carbon content, a reduction in volatile matter, and an increase in higher heating value. Energy density ranged from 3257.40 to 3651.31 MJ m^{-3}. Biochars produced at 650 °C with a residence time of 60 minutes exhibited the highest energetic performance among the evaluated treatments. The results confirm the potential of rubber tree wood residues for biochar production aimed at energy applications. Furthermore, the results obtained contribute to expanding knowledge regarding the sustainable use of these lignocellulosic residues.

Keywords: Carbonization; Residual Biomass; Higher Calorific Value.

1. Introdução

A seringueira (*Hevea brasiliensis*) apresenta grande importância histórica e econômica para o Brasil, sendo uma das principais espécies utilizadas na produção de borracha natural, matéria-prima fundamental para a fabricação de produtos hospitalares e diversos componentes industriais (Gonçalves; Cardoso; Cabral júnior, 2021). Embora seja uma espécie originária da região amazônica, os cultivos comerciais brasileiros expandiram-se para diferentes regiões do país, com destaque para estados como São Paulo, Bahia e Mato Grosso (Confederação da Agricultura e Pecuária do Brasil, 2024).

Além da produção de látex, a renovação dos seringais ao final do ciclo produtivo resulta na geração de biomassa lenhosa, a qual apresenta potencial para aproveitamento em processos de conversão termoquímica, como a pirólise, permitindo a obtenção de materiais carbonáceos de maior valor agregado com propriedades energéticas aprimoradas (Zhang *et al*., 2022). Nesse contexto, a conversão da madeira de seringueira em biocarvão apresenta-se como uma alternativa tecnológica para o aproveitamento energético dessa biomassa residual, permitindo a obtenção de um combustível sólido renovável com elevado teor de carbono fixo, maior densidade energética e propriedades adequadas para aplicações térmicas.

A utilização de biocarvões como fonte energética pode contribuir para processos de descarbonização do setor energético, especialmente por meio da substituição parcial de combustíveis fósseis em sistemas industriais, como no processo de *co-firing* (combustão conjunta de biomassa e carvão mineral). Essa estratégia possibilita a redução da dependência de fontes não renováveis, além de promover o aproveitamento de resíduos lignocelulósicos provenientes de cadeias produtivas florestais (Mukherjee et al., 2022; Mohanty et al., 2024).

Diante desse contexto, o presente trabalho teve como objetivo produzir e caracterizar biocarvões obtidos a partir da pirólise da madeira de seringueira (*Hevea brasiliensis*) em diferentes tempos e temperaturas, avaliando suas propriedades energéticas por meio da composição química imediata, poder calorífico superior e densidade a granel, visando determinar o seu potencial como combustível sólido renovável.

2. Material e métodos

O estudo foi conduzido no Laboratório de Painéis e Energia da Madeira (LAPEM) da Universidade Federal de Viçosa (DEF/UFV), em Viçosa, Minas Gerais. A biomassa residual de *Hevea brasiliensis*, com granulometria predominantemente entre 8 e 16 mm, foi seca em estufa a 103 ± 2 °C até atingir umidade aproximada de 5%, visando à redução da umidade e adequação

para a produção dos biocarvões. A pirólise foi realizada em reator elétrico de bancada do tipo mufla (GP Científica–2000), equipado com controlador digital de temperatura. Em cada ensaio, cerca de 0,700 kg de biomassa seca foi acondicionado em recipiente metálico de aproximadamente 0,011 m³ e submetido a pirólise, avaliando-se três tempos (30, 45 e 60 minutos) e três temperaturas finais de pirólise (450°C, 550°C e 650°C). D

Os gases condensáveis gerados foram conduzidos a um condensador com circulação contínua de água para recuperação da fração líquida, enquanto os gases não condensáveis foram direcionados à queima controlada. Após a pirólise, o material carbonizado foi resfriado à temperatura ambiente, com auxílio de manta de algodão umedecida, e posteriormente pesado para determinação do rendimento gravimétrico e realização das análises físico-químicas.

A composição química imediata foi determinada conforme a ASTM D1762-84 (ASTM, 2021), sendo quantificados os teores de materiais voláteis, cinzas e carbono fixo, este último obtido por diferença. O poder calorífico superior (PCS) foi determinado em bomba calorimétrica IKA 300, seguindo a norma ASTM D5865-19 (ASTM, 2019). A densidade a granel dos biocarvões foi avaliada conforme a ISO 17828 (ISO, 2015). A densidade energética foi obtida a partir da multiplicação entre os valores obtidos de PCS e densidade a granel.

O experimento foi conduzido em delineamento inteiramente casualizado (DIC), em esquema fatorial 3 x 3, com três temperaturas de pirólise (450, 550 e 650 °C) e três tempos de residência (30, 45 e 60 min), em três repetições, totalizando 27 unidades amostrais. Os dados foram submetidos aos testes de Shapiro-Wilk (normalidade) e Bartlett (homogeneidade de variâncias). Atendidos os pressupostos, aplicou-se a análise de variância (ANOVA) e, quando estabelecido efeito significativo, aplicou-se o teste de Tukey a 5% de significância. Os dados foram processados e analisados nos softwares Microsoft Excel e R (RStudio).

3. Resultados e discussão

3.1. Composição química imediata

Na Tabela 1 são apresentados os valores médios dos teores de materiais voláteis, cinzas e carbono fixo dos biocarvões produzidos em função da temperatura de pirólise e do tempo de residência. De acordo com a análise de variância não houve efeito significativo da interação, somente efeito isolado do tempo e temperatura nos materiais voláteis e carbono fixo, o teor de cinzas não foi afetado pelos tratamentos, tendo valor médio de 7,0%.

Tabela 1. Composição química imediata dos biocarvões de seringueira em função da temperatura de pirólise e do tempo de residência

Temperatura (°C)	Tempo (minutos)			
	30	45	60	Média
	Voláteis (%)			
450	29,23	28,45	27,75	28,48 a
550	20,5	18,97	15,09	18,19 b
650	12,32	11,98	10,44	11,58 c
Média	20,68 A	19,80 A	17,76 B	
	Carbono Fixo (%)			
450	63,83	64,45	64,74	64,34 c
550	72,52	74,32	78,82	75,22 b
650	79,78	80,97	82,77	81,17 a
Média	72,04 B	73,25 AB	75,44 A	
	Cinzas (%)			
450	6,94	7,1	7,51	7,18 a
550	6,98	6,7	6,08	6,59 a
650	7,91	7,05	6,79	7,25 a
Média	7,27 A	6,95 A	6,79 A	

Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey, considerando o nível de 5% de significância. Letras minúsculas representam as temperaturas de pirólise e letras maiúsculas os tempos de residência. Para o teor de cinzas, não houve efeito significativo dos fatores avaliados.

O teor de materiais voláteis dos biocarvões produzidos com o tempo de residência de 60 minutos foram significativamente menores em relação aos demais. Por outro lado, o teor de carbono fixo dos biocarvões produzidos com 30 minutos tiveram os menores valores, diferindo dos produzidos com 60 minutos.

O teor de materiais voláteis e carbono fixo foram reduzidos e incrementados significativamente, respectivamente, com o aumento da temperatura de pirólise. O aumento da temperatura de 450 para 650 °C promoveu redução significativa do teor de materiais voláteis, de 28,48 para 11,58%, e aumento do teor de carbono fixo, de 64,34 para 81,17%, indicando maior degradação térmica da biomassa residual de seringueira. Os resultados corroboram com os relatos de Mukherjee et al. (2022), que salientam que a conversão termoquímica da biomassa por meio da pirólise promove alterações significativas na composição química do material, principalmente pela degradação térmica dos constituintes lignocelulósicos, como hemiceluloses e celulose, resultando na remoção de compostos voláteis e no enriquecimento relativo da fração carbonosa. O aumento da temperatura intensifica a liberação desses compostos voláteis e favorece a concentração do carbono fixo, promovendo a formação de biocarvões com maior

estabilidade química e melhores propriedades energéticas. Dessa forma, os valores obtidos neste estudo demonstram que a pirólise foi eficiente na transformação da biomassa residual de seringueira em um material com características energéticas superiores à biomassa original.

O teor de carbono fixo apresenta relação direta com a qualidade energética do biocarvão, pois representa a fração carbonácea responsável pela combustão prolongada e pela liberação de energia durante sua utilização como combustível sólido. De acordo com Kumar e Strezov (2019), o aumento do teor de carbono fixo está associado à melhoria das propriedades energéticas do biocarvão, uma vez que temperaturas mais elevadas de pirólise favorecem a formação de estruturas carbonáceas mais estáveis e com maior potencial energético. Dessa forma, o aumento do carbono fixo dos tratamentos submetidos a temperaturas mais elevadas contribuiu para a melhoria das propriedades energéticas do material, favorecendo maiores valores de poder calorífico superior e densidade energética.

Os teores de cinzas apresentados na Tabela 1 variaram entre 6,08 e 7,91%, não apresentando diferença estatística significativa entre os tratamentos. Entretanto, observou-se uma tendência de aumento do conteúdo de cinzas com a elevação dos parâmetros de pirólise, comportamento associado à concentração relativa da fração mineral após a degradação da matéria orgânica durante o processo térmico. Embora a fração mineral não contribua diretamente para o aumento do potencial energético do biocarvão, seu teor é um parâmetro relevante na avaliação de sua qualidade como combustível sólido, uma vez que elevados conteúdos de cinzas podem reduzir a participação relativa da fração carbonosa e influenciar negativamente suas propriedades energéticas (Tomczyk et al., 2020).

Entretanto, os valores obtidos neste estudo encontram-se dentro de faixas consideradas adequadas para aplicações energéticas. Os resultados indicam que o teor de cinzas observado não representa uma limitação significativa ao uso do biocarvão como combustível sólido, especialmente quando associado aos elevados teores de carbono fixo encontrados (Kumar; Strezov, 2019).

3.2. Poder calorífico superior e densidade a granel

Na Tabela 2 são apresentados os valores de poder calorífico superior (PCS) e densidade a granel dos biocarvões produzidos a partir da biomassa residual da madeira de seringueira em função da temperatura de pirólise e do tempo de residência. De acordo com a análise estatística houve efeito significativo apenas da temperatura de pirólise.

Tabela 2. Médias do poder calorífico superior (PCS) e da densidade a granel do biocarvão de seringueira em função da temperatura de pirólise e do tempo de residência

Temperatura (°C)	Tempo (minutos)			
	30	**45**	**60**	**Média**
	PCS (MJ kg^{-1})			
450	26,93	26,49	26,75	26,72 b
550	28,81	29,59	30,58	29,66 a
650	29,96	30,42	30,88	30,42 a
Média	28,57 A	28,83 A	29,40 A	
	Densidade a granel (kg m^{-3})			
450	126,95	122,09	121,83	123,63 a
550	114,67	117,3	119,31	117,09 b
650	110,37	113,25	115,06	112,89 b
Média	117,33 A	117,55 A	118,73 A	

Médias seguidas pela mesma letra minúscula não diferem entre si pelo teste de Tukey, considerando o nível de 5% de significância. Letras minúsculas representam as temperaturas de pirólise e letras maiúsculas os tempos de residência. O tempo de residência não apresentou efeito significativo, considerando o nível de 5% de significância.

O poder calorífico superior aumentou com a elevação da temperatura de pirólise, variando de 26,72 MJ kg^{-1} (450 °C) a 30,42 MJ kg^{-1} (650 °C). Os biocarvões produzidos a 550 e 650 °C apresentaram os maiores valores de PCS, não diferindo estatisticamente entre si, indicando que temperaturas mais elevadas favoreceram a concentração de estruturas carbonáceas mais estáveis termicamente.

Essa tendência está relacionada ao aumento do teor de carbono fixo e à redução dos materiais voláteis observados na Tabela 1. Durante a pirólise, ocorre a degradação progressiva de compostos oxigenados presentes na hemicelulose e celulose, com liberação de água, dióxido de carbono, monóxido de carbono e outros compostos voláteis, promovendo o enriquecimento relativo da matriz carbonosa do biocarvão (Tomczyk et al., 2020).

O aumento do carbono fixo contribui para a elevação do poder calorífico superior (PCS), favorecendo a disponibilidade de energia durante a combustão, enquanto a redução de grupos oxigenados e materiais voláteis diminui a presença de componentes de menor contribuição energética (Tomczyk et al., 2020). Durante o processo de pirólise, ocorre a redução da razão oxigênio/carbono, promovendo o enriquecimento da fração carbonosa e aumento do potencial energético do material (Mukherjee *et al*., 2022).

Dessa forma, temperaturas mais elevadas de pirólise tendem a produzir biocarvões com maior estabilidade térmica e melhor desempenho como combustível sólido (Zhang *et al*., 2022). O aumento do potencial energético está associado às transformações promovidas durante a pirólise, que favorecem a remoção de componentes voláteis e a concentração relativa da fração carbonosa, elevando o teor de carbono fixo e melhorando as propriedades energéticas do biocarvão (Mukherjee et al., 2022).

A densidade a granel dos biocarvões produzidos com temperatura de 450 ºC foram significativamente maiores em relação aos demais. Isso se deve à maior degradação térmica da biomassa em temperaturas elevadas, promovendo maior remoção de compostos voláteis e favorecendo a formação de uma estrutura carbonácea mais porosa, resultando em menor massa por unidade de volume (Tomczyk et al., 2020).

A diminuição da densidade a granel é um comportamento frequentemente observado durante a produção de biocarvões, uma vez que a intensificação do processo de pirólise provoca alterações estruturais no material, como aumento da porosidade e redução da massa específica aparente (Tomczyk et al., 2020). Embora menores valores de densidade possam representar maior demanda de espaço para armazenamento e transporte, essa característica deve ser avaliada em conjunto com propriedades como poder calorífico superior e densidade energética, pois materiais menos densos podem apresentar desempenho energético satisfatório quando possuem maior concentração de carbono fixo (Mukherjee *et al*., 2022).

3.3. Densidade energética dos biocarvões

A densidade energética dos biocarvões produzidos a partir da madeira de seringueira em função da temperatura de pirólise e do tempo de residência está apresentada na Figura 2. Houve efeito significativo da interação tempo e temperatura na densidade energética dos biocarvões.

Figura 2. Densidade energética do biocarvão de seringueira em função da temperatura de pirólise e do tempo de residência. Letras maiúsculas comparam os tempos de residência dentro de cada temperatura, e letras minúsculas comparam as temperaturas dentro de cada tempo de residência. Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey, a 5% de significância.

Observa-se que a densidade energética dos biocarvões produzidos nas temperaturas de 450 e 650 °C não foi afetada pelo tempo de residência de pirólise. Já na temperatura de 550 °C,

os biocarvões produzidos com tempo de residência de 60 minutos diferiram significativamente daqueles obtidos com 30 minutos. Entretanto, os biocarvões produzidos com 45 minutos e temperatura de 550 °C não diferiram daqueles obtidos com 60 minutos, indicando que, para essa condição específica, a redução do tempo de residência não comprometeu significativamente o desempenho energético do material.

A densidade energética representa a quantidade de energia armazenada por unidade de volume do biocarvão, sendo influenciada principalmente pelo poder calorífico superior e pela densidade a granel do material. Neste estudo, o aumento da temperatura de pirólise promoveu elevação do teor de carbono fixo e do poder calorífico superior, devido à maior degradação térmica dos constituintes lignocelulósicos e à concentração relativa da fração carbonosa (Mukherjee et al., 2022; Tomczyk et al., 2020). Entretanto, temperaturas mais elevadas também promoveram redução da densidade a granel dos biocarvões, comportamento associado às alterações estruturais provocadas pela maior degradação térmica do material durante a pirólise (Tomczyk et al., 2020).

Dessa forma, o comportamento da densidade energética observado neste estudo pode ser explicado pelo equilíbrio entre o aumento da energia por unidade de massa e a redução da massa por unidade de volume do material. Assim, embora temperaturas mais elevadas tenham favorecido maiores valores de poder calorífico superior, a redução da densidade a granel pode ter limitado o incremento proporcional da densidade energética dos biocarvões.

Na temperatura de 550 °C, o aumento do tempo de residência de 30 para 60 minutos promoveu incremento da densidade energética, enquanto o tratamento de 45 minutos apresentou comportamento semelhante ao de 60 minutos. Esse resultado indica que, para essa condição experimental, a redução do tempo de residência pode representar uma alternativa operacional interessante, uma vez que possibilita menor tempo de ocupação do reator e potencial redução do consumo energético do processo, sem comprometer significativamente o desempenho energético do biocarvão.

4. **Conclusões**

Os resultados permitiram identificar a influência dos parâmetros de pirólise nas propriedades energéticas dos biocarvões produzidos a partir da madeira de *Hevea brasiliensis*, evidenciando que a temperatura foi o principal fator responsável pelas alterações observadas. O aumento da temperatura promoveu maior degradação térmica do material, com aumento do

teor de carbono fixo, redução dos materiais voláteis e elevação do poder calorífico superior. Entre os tratamentos avaliados, o tratamento de 650 °C por 60 minutos apresentou o melhor desempenho quanto às propriedades químicas e energéticas, destacando-se pelos maiores valores de carbono fixo e poder calorífico superior.

5. Agradecimentos.

Ao Departamento de Engenharia Florestal (DEF), ao Laboratório de Painéis e Energia da Madeira (LAPEM) e à Universidade Federal de Viçosa (UFV) pela infraestrutura e suporte concedidos. O reconhecimento estende-se à Sociedade de Investigações Florestais e à EMBRAPII Unidade Fibras Florestais. Esta pesquisa contou com o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES), sendo viabilizada, em parte, com recursos da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG – Projetos APQ-05311-24 e APQ-04599-25) e do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq – Processo nº 444395/2024-5).

6. Referências bibliográficas

American Society for Testing and Materials. (2019). ASTM D5865-19: Standard test method for gross calorific value of coal and coke. ASTM International.

American Society for Testing and Materials. (2021). ASTM D1762-84(2021): Standard test method for chemical analysis of wood charcoal. ASTM International.

Confederação da Agricultura e Pecuária do Brasil. (2024). Baixa remuneração da borracha natural e escassez de mão de obra comprometem a heveicultura brasileira em um círculo vicioso. CNA Brasil. https://cnabrasil.org.br/publicacoes/baixa-remuneracao-da-borracha-natural-e-escassez-de-mao-de-obra-comprometem-a-heveicultura-brasileira-em-um-circulo-vicioso

Gonçalves, R. C., Cardoso, S. E. P., & Cabral Júnior, I. C. (2021). Produção de borracha natural de seringueira: histórico e caminho a seguir. In E. F. do Amaral & R. C. Gonçalves (Orgs.), *Zoneamento pedoclimático para a seringueira no Estado do Acre* (pp. 29–59). Embrapa Acre.

International Organization for Standardization. (2015). ISO 17828:2015: Solid biofuels — Determination of bulk density. International Organization for Standardization.

Keshavarz, M., *et al*. (2024). Biocarbon-based materials for sustainable energy applications: A comprehensive review. Journal of Environmental Chemical Engineering, 12(6), 114553. https://doi.org/10.1016/j.jece.2024.114553

Kumar, R., & Strezov, V. (2019). Thermal conductivity and energy performance of biochar produced from agricultural residues. Energy, 170, 144–153. https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.12.103

Mohanty, A. K., *et al*. (2024). Biocarbon materials. Nature Reviews Methods Primers, 4. https://doi.org/10.1038/s43586-024-00297-4

Mukherjee, A., Patra, B. R., Podder, J., & Dalai, A. K. (2022). Synthesis of biochar from lignocellulosic biomass for diverse industrial applications and energy harvesting: Effects of pyrolysis conditions on the physicochemical properties of biochar. Frontiers in Materials, 9, Article 870184. https://doi.org/10.3389/fmats.2022.870184

Tomczyk, A., Sokołowska, Z., & Boguta, P. (2020). Biochar physicochemical properties: Pyrolysis temperature and feedstock kind effects. Reviews in Environmental Science and Bio/Technology, 19, 191–215. https://doi.org/10.1007/s11157-020-09523-3

Zhang, X., Zhang, P., Yuan, X., Li, Y., & Han, L. (2022). Effect of pyrolysis temperature and residence time on the physicochemical properties of biochar derived from agricultural residues: A review. Bioresource Technology, 344, Article 126220. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.126220

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Caracterização físico-química comparativa de biochar de palha de café *in natura* e pelletizada

Luisa Rosa Guimarães[1]; Danielly Moreira Gomes[1]; Iara Fontes Demuner[1]; Angélica de Cássia Oliveira Carneiro[1]; Miriã Santos de Oliveira[1]

[1] Universidade Federal de Viçosa

Resumo: A geração de resíduos da cadeia produtiva do café tem impulsionado a busca por alternativas sustentáveis que agreguem valor a esses materiais. Diante desse cenário, este trabalho teve como objetivo avaliar a influência da pelletização nas características físico-químicas do biochar produzido a partir de palha de café. As biomassas *in natura* e pelletizada foram caracterizadas e submetidas à pirólise lenta a 550 °C por 60 minutos. As amostras de biochar foram avaliadas quanto ao rendimento gravimétrico, materiais voláteis, carbono fixo, cinzas e densidade a granel. A pelletização resultou em biochar com maior rendimento gravimétrico e densidade a granel. Em contrapartida, apresentou aumento do teor de cinzas e redução do carbono fixo, sem alterar significativamente os materiais voláteis. Os resultados indicam que a pelletização é uma estratégia promissora para o aproveitamento da palha de café, permitindo a obtenção de biochar com características distintas e potencial para diferentes aplicações agrícolas e industriais.

Palavras-chave: Resíduos agroindustriais; Pirólise; Pelletização.

Comparative Physicochemical Characterization of Biochar from Raw and Pelletized Coffee Husks

Abstract: The generation of residues from the coffee production chain has driven the search for sustainable alternatives that add value to these materials. In this context, this study aimed to evaluate the influence of pelletization on the physicochemical properties of biochar produced from coffee husk. Raw and pelletized biomass were characterized and subjected to slow pyrolysis at 550 °C for 60 min**.** The biochar samples were evaluated for gravimetric yield, volatile matter, fixed carbon, ash content, and bulk density. Pelletization resulted in biochar with a higher gravimetric yield and bulk density. Conversely, it increased the ash content and reduced the fixed carbon content without significantly affecting the volatile matter. The results indicate that pelletization is a promising strategy for the valorization of coffee husks, enabling the production of biochar with distinct characteristics and potential for various agricultural and industrial applications.

Keywords: Agroindustrial residues; Pyrolysis; Pelletization.

1. Introdução

A cadeia produtiva do café desempenha papel estratégico na economia brasileira. Conforme o 2º Levantamento da Safra Brasileira de Café 2026, divulgado pela Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB, 2026), a produção brasileira está estimada em 66,7

milhões de sacas beneficiadas de 60 kg, o maior volume já projetado, evidenciando a importância da cafeicultura para o país e o alto potencial de geração de resíduos agroindustriais ao longo da cadeia produtiva. Estima-se que tais resíduos representem até 50% da massa total do fruto processado (Ali; Bhowmik, 2025).

Quando descartados de forma inadequada, esses resíduos podem causar impactos ambientais negativos, como a contaminação do solo e da água e a emissão de gases de efeito estufa (Beesley et al., 2010). Por esse motivo, tem-se buscado alternativas que permitam agregar valor a esses materiais. Entre elas, destaca-se a pirólise, processo capaz de converter a biomassa em biochar, um material sólido rico em carbono obtido pelo aquecimento da biomassa em condições limitadas ou na ausência de oxigênio (International Biochar Initiative, 2024).

A palha de café apresenta características favoráveis à produção do biochar, devido à sua ampla disponibilidade e aos elevados teores de compostos voláteis, extrativos e holoceluloses (Nguyen et al., 2023). No entanto, sua baixa densidade a granel representa um dos principais obstáculos para sua utilização em processos industriais, dificultando o transporte, o armazenamento e causando obstrução dos reatores durante a pirólise (Ghorbani et al., 2024). Nesse sentido, a pelletização surge como uma alternativa para aumentar a densidade da biomassa e facilitar seu manuseio. Além das vantagens logísticas, esse processo pode modificar o comportamento térmico da biomassa durante a pirólise e, consequentemente, influenciar as propriedades físico-químicas do biochar produzido (Gilvari et al., 2019).

Embora o interesse pelo biochar tenha aumentado nos últimos anos, ainda são escassos os estudos que investigam a influência da pelletização da biomassa sobre o processo de pirólise e as propriedades do biochar produzido a partir de resíduos da cadeia do café. Diante disso, o presente estudo teve como objetivo avaliar a influência da pelletização e as propriedades físico-químicas do biochar produzido a partir de palha de café *in natura* e pelletizada.

2. Material e métodos

A pesquisa foi desenvolvida no Laboratório de Painéis e Energia da Madeira (LAPEM), vinculado ao Departamento de Engenharia Florestal da Universidade Federal de Viçosa (DEF/UFV), no município de Viçosa-MG.

a. 2.1 Material

A palha de café arábica foi doada por uma empresa localizada no município de Lajinha-MG.

2.2 Caracterização da biomassa *in natura*

A biomassa proveniente dos resíduos de café foi caracterizada quanto às suas propriedades físicas e químicas. O teor de umidade, em base seca, foi determinado pelo método de destilação com ciclo-hexano, seguindo os procedimentos descritos pela Embrapa Agroindústria Tropical (2008). A densidade a granel foi determinada de acordo com a norma DIN EN 15103 (DIN, 2010), enquanto a composição química imediata foi realizada conforme a norma ASTM D1762-84 (ASTM, 2021), sendo determinados os teores de materiais voláteis, cinzas e carbono fixo, expressos em base seca.

b. 2.3 Produção e caracterização dos pellets

Os pellets foram produzidos em uma prensa pelletizadora laboratorial (Amandus Kahl®), sendo obtidos aproximadamente 0,500 kg de material para cada repetição. Após a pelletização, o teor de umidade foi determinado pelo método de destilação com ciclo-hexano, seguindo os procedimentos descritos pela Embrapa Agroindústria Tropical (2008). A densidade a granel foi determinada segundo a DIN EN 15103 (DIN, 2010). Com base nos valores obtidos antes e após a pelletização, foi calculada a taxa de compactação da biomassa.

A durabilidade e a porcentagem de finos foram determinados de acordo com a norma DIN EN 15210-1 (DIN, 2010d), utilizando o equipamento Ligno-Tester.

c. 2.4 Produção e caracterização do biochar

A pirólise foi realizada em um reator elétrico de bancada do tipo mufla (GP Científica – 2000), equipado com controlador digital de temperatura. Os ensaios foram realizados em triplicatas, sendo que, foram utilizados aproximadamente 0,300 kg de palha de café in natura e 0,500 kg de pellets por repetição, ambos submetidos à pirólise a 550 °C por 60 minutos, sob as mesmas condições experimentais.

Os vapores gerados foram conduzidos a um condensador resfriado por água para a coleta da fração líquida, enquanto os gases não condensáveis foram direcionados para queima controlada. Após a carbonização, o contêiner metálico foi retirado do interior da mufla, onde o biochar permaneceu em resfriamento e estabilização por 24 horas. Após esse período, o biochar foi pesado para determinação do rendimento gravimétrico e encaminhado às análises físico-químicas. O biochar produzido a partir da biomassa pelletizada foi obtido nas mesmas condições experimentais.

d. 2.5 Análise de dados

Os dados foram submetidos à análise de variância (ANOVA) e, quando constatadas diferenças significativas, as médias foram comparadas pelo teste de *Tukey*, a 5% de significância, após verificação dos pressupostos de normalidade e homogeneidade dos dados.

3. Resultados e discussão

3.1 Caracterização da matéria-prima

A caracterização da biomassa é importante para avaliar seu potencial de utilização em processos de densificação e de conversão termoquímica. A Tabela 1 apresenta os valores médios das propriedades da palha de café utilizada neste estudo.

Tabela 1 - Valores médios das propriedades da biomassa residual de café

Propriedade	Unidade	Biomassa residual de Café
Densidade a Granel	kg m^{-3}	249,90
Materiais Voláteis	%	71,34
Cinzas	%	7,93
Carbono Fixo	%	20,88
Umidade	%	37,32
Umidade pós-secagem	%	9,66

A palha de café apresentou densidade a granel de 249,90 kg m^{-3}, valor semelhante ao reportado para essa biomassa na literatura. Essa característica reforça a importância da

pelletização, devido às limitações logísticas decorrentes da baixa densidade desses materiais (Gong et al., 2023).

A biomassa apresentou 71,34% de materiais voláteis, 20,88% de carbono fixo e 7,93% de cinzas, valores compatíveis com resíduos de café (Setter et al., 2020). O elevado teor de voláteis favorece a decomposição térmica, o carbono fixo está associado ao potencial de formação do biochar, e as cinzas, apesar de reduzirem a fração combustível, podem representar vantagem para aplicações agrícolas devido à presença de minerais (Tomczyk et al., 2020).

O teor de umidade inicial foi de 37,32%, sendo reduzido para 9,66% após a secagem. Esse valor é considerado adequado para a pelletização e para a pirólise, pois favorece a compactação da biomassa, reduz o consumo de energia durante o processo e melhora as condições de armazenamento (Nguyen et al., 2023).

3.2 Caracterização dos pellets

Os valores médios das propriedades dos pellets produzidos a partir da biomassa residual de café estão apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 – Valores médios das propriedades dos pellets produzidos a partir de palha de café

Propriedade	Valor médio
Finos (%)	0,00
Durabilidade (%)	96,50
Umidade, base seca (%)	3,33
Densidade a granel (kg m^{-3})	559,40
Taxa de compactação	2,42

Os pellets apresentaram elevada durabilidade mecânica (96,5%) e ausência de finos. Esse comportamento pode ser atribuído ao elevado teor de extrativos da biomassa, que atuam como plastificantes naturais durante a pelletização, favorecendo a coesão entre as partículas (Gilvari et al., 2019).

O teor de umidade dos pellets foi de 3,33%, inferior ao observado para a biomassa após a secagem. Essa redução pode estar associada ao aquecimento da matriz da pelletizadora durante o processo, decorrente do atrito e da compressão da biomassa, que favorecem a remoção e a evaporação de parte da água residual. Além disso, a passagem

da biomassa pela matriz aquecida pode contribuir para a secagem adicional do material. A menor umidade dos pellets favorece a estabilidade durante o armazenamento e pode reduzir o consumo de energia requerido na etapa de pirólise (Styks et al., 2020).

A pelletização promoveu aumento expressivo da densidade a granel, que passou de 249,90 para 559,40 kg m^{-3}, correspondendo a uma taxa de compactação de 2,42. Esse resultado evidencia a eficiência do processo de densificação, reduzindo o volume ocupado pela biomassa e favorecendo as etapas subsequentes. Além disso, biomassas densificadas possuem maior uniformidade física, favorecendo uma transferência de calor mais homogênea durante a pirólise e influenciando as propriedades do biochar produzido.

3.3 Efeito da pelletização sobre as propriedades do biochar produzido

As propriedades físico-químicas do biochar produzido a partir da palha de café *in natura* e pelletizada estão apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3 – Propriedades físico-químicas do biochar produzido a partir da palha de café *in natura* e pelletizada

Propriedade	Biochar *in natura*	Biochar pelletizado
Rendimento gravimétrico (%)	30,56 ± 0,36 **b**	32,55 ± 0,38 **a**
Materiais voláteis (%)	19,63 ± 0,36 **a**	19,14 ± 1,66 **a**
Carbono fixo (%)	67,74 ± 0,18 **a**	63,10 ± 1,81 **b**
Cinzas (%)	12,63 ± 0,50 **b**	17,76 ± 0,34 **a**
Densidade a granel (kg m^3)	74,88 ± 2,14 **b**	116,24 ± 1,98 **a**

Médias seguidas por letras distintas na mesma linha diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Os rendimentos gravimétricos, materiais voláteis, carbono fixo e cinzas encontram-se dentro da faixa reportada na literatura para biochar de resíduos agroindustriais, indicando

adequada conversão da biomassa, elevado grau de carbonização e propriedades compatíveis com aplicações energéticas e agrícolas (Ungureanu et al., 2025).

A densidade a granel variou entre 74,9 e 116,2 kg m^{-3}, valores típicos de biochar produzido por pirólise lenta. Essa propriedade influencia diretamente o armazenamento,

o transporte e a aplicação do material, sendo resultado das alterações estruturais promovidas durante a carbonização da biomassa (Onsree et al., 2018).

A análise estatística indicou diferenças significativas entre os biochar quanto ao rendimento gravimétrico, ao carbono fixo, ao teor de cinzas e à densidade a granel. Para os materiais voláteis, não foram observadas diferenças significativas entre os tratamentos. Como ambos foram produzidos sob as mesmas condições de pirólise (550 °C por 60 minutos), as diferenças observadas podem ser atribuídas, principalmente, à forma física da biomassa utilizada.

O biochar pelletizado apresentou rendimento gravimétrico 6,5% superior ao *in natura* e também maior teor de cinzas. Como constituintes inorgânicos tendem a permanecer na fração sólida e são contabilizadas na massa final do biochar, esse maior teor de cinzas pode ter contribuído para o aumento do rendimento observado (Leng et al., 2022). Dessa forma, o maior rendimento do material pelletizado não indica, necessariamente, maior retenção da fração orgânica. Em biochar produzidos a partir de resíduos de café, elevados teores de cinzas têm sido associados à concentração de constituintes minerais, especialmente o potássio, durante a pirólise (Domingues et al., 2017).

A densidade a granel foi a propriedade que apresentou a maior variação, com aumento expressivo de 74,9 para 116,2 kg m^{-3}, representando um incremento de aproximadamente 55%. Os dados indicam que parte do ganho em densidade obtido durante a pelletização foi mantido após a pirólise, favorecendo o armazenamento, o transporte e a aplicação do biochar (Ibitoye et al., 2021).

Os teores de materiais voláteis não diferiram entre os tratamentos, indicando que a pelletização não alterou o grau de devolatilização alcançado nas condições de pirólise empregadas. Em contrapartida, o biochar pelletizado apresentou maior teor de cinzas e menor teor de carbono fixo em relação ao biochar da biomassa *in natura*. Como o carbono fixo é determinado por diferença entre os materiais voláteis e as cinzas, o aumento da fração mineral explica a redução observada no carbono fixo, sem indicar, necessariamente, menor intensidade

de carbonização. Dessa forma, são necessárias análises complementares para confirmar esse comportamento.

4. Conclusões

A análise comparativa demonstrou que a compactação da biomassa influenciou as propriedades físico-químicas do biochar, promovendo maior rendimento gravimétrico e maior densidade a granel, sem alterar significativamente o teor de materiais voláteis. Em contrapartida, o biochar produzido a partir da biomassa pelletizada apresentou maior teor de cinzas e menor carbono fixo. Assim, a pelletização constitui uma alternativa promissora para o aproveitamento da palha de café. No entanto, a escolha entre biomassa *in natura* e pelletizada deve considerar a aplicação pretendida para o biochar.

5. Agradecimentos

Agradecimentos ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq); à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) Processo APQ-05311-24; à Sociedade de Investigações Florestais (SIF); ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais do Departamento de Engenharia Florestal da UFV (PPGCF/DEF); ao Laboratório de Painéis e Energia da Madeira (LAPEM); às professoras Iara Demuner e Angélica de Cássia Carneiro e à mestranda Danielly Gomes, responsáveis por idealizar o projeto e conduzir a pesquisa.

6. Referências bibliográficas

Ali, M. A., & Bhowmik, S. (2025). *Bioactive compounds in coffee husk: Extraction, functional properties, applications, and sustainable approach in circular economy*. *RSC Sustainability*, *3*, 4410–4438. https://doi.org/10.1039/D5SU00531K

American Society for Testing and Materials. (2021). *ASTM D1762–84: Standard test method for chemical analysis of wood charcoal*. ASTM International.

Beesley, L., Moreno-Jiménez, E., & Gomez-Eyles, J. L. (2010). Effects of biochar and greenwaste compost amendments on mobility, bioavailability and toxicity of inorganic and organic contaminants in a multi-element polluted soil. *Environmental Pollution, 158*(6), 2282–2287. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2010.02.003

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO (CONAB). *Acompanhamento da safra brasileira de café: Safra 2026 – 2º levantamento*. Brasília, DF: CONAB, 2026.

Deutsches Institut für Normung. (2010). *DIN EN 15103: Solid biofuels—Determination of bulk density*. Beuth Verlag.

Deutsches Institut für Normung. (2010). *DIN EN 15210-1: Solid biofuels—Determination of mechanical durability of pellets and briquettes—Part 1: Pellets. DIN.*

Domingues, Rimena R. et al. *Properties of biochar derived from wood and high-nutrient biomasses with the aim of agronomic and environmental benefits.* PloS One, v. 12, n. 5, p. e0176884, 2017.

Ghorbani, M., Nizami, A. S., Ismail, I. M. I., Shahbaz, M., & Aghbashlo, M. (2024). Biomass densification technologies: Recent advances, challenges and future perspectives. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 196*, 114290. https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.114290

Gilvari, H., de Jong, W., & Schott, D. L. (2019). Quality parameters relevant for densification of bio-materials: Measuring methods and affecting factors—A review. *Biomass and Bioenergy, 120*, 117–134. https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2018.11.013

Gong, C., Meng, X., Thygesen, L. G., Sheng, K., Pu, Y., Wang, L., Ragauskas, A. J., Zhang, X., & Thomsen, S. T. (2023). The significance of biomass densification in biological-based biorefineries: A critical review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 183*, Article 113520. https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113520

Ibitoye, S. E., Jen, T.-C., Mahamood, R. M., & Akinlabi, E. T. (2021). Densification of agro-residues for sustainable energy generation: An overview. *Bioresources and Bioprocessing, 8*, Article 75. https://doi.org/10.1186/s40643-021-00427-w

International Biochar Initiative. (2024). *What is biochar?* https://biochar-international.org/about-biochar/

Leng, Lijian et al. *Machine learning predicting and engineering the yield, N content, and specific surface area of biochar derived from pyrolysis of biomass.* Biochar, v. 4, n. 1, 2022.

Nguyen, D. V., Duong, C. T. T., Vu, C. N. M., Nguyen, H. M., Pham, T. T., Tran-Thuy, T. M., & Nguyen, L. Q. (2023). Data on chemical composition of coffee husks and lignin microparticles as their extracted product. *Data in Brief, 51*, Article 109781. https://doi.org/10.1016/j.dib.2023.109781

Onsree, T., Tippayawong, N., Zheng, A., & Li, H. (2018). Pyrolysis behavior and kinetics of corn residue pellets and eucalyptus wood chips in a macro thermogravimetric analyzer. *Case Studies in Thermal Engineering, 12*, 546–556. https://doi.org/10.1016/j.csite.2018.07.011

Pimentel, F. A., Cardoso, M. G., Salgado, A. P. S. P., Aguiar, P. M., Silva, V. F., Morais, A. R., & Nelson, D. L. (2008). *Método para determinação de umidade de plantas aromáticas* (Comunicado Técnico 136). Embrapa Agroindústria Tropical. https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/664011

Setter, C., Silva, F. T. M., Assis, M. R., Ataíde, C. H., Trugilho, P. F., & Oliveira, T. J. P. (2020). Slow pyrolysis of coffee husk briquettes: Characterization of the solid and liquid fractions. *Fuel, 261*, Article 116420. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.116420

Styks, J., Wróbel, M., Frączek, J., & Knapczyk, A. (2020). Effect of compaction pressure and moisture content on quality parameters of perennial biomass pellets. *Energies, 13*(8), Article 1859. https://doi.org/10.3390/en13081859

Tomczyk, A., Sokołowska, Z., & Boguta, P. (2020). Biochar physicochemical properties: Pyrolysis temperature and feedstock kind effects. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology, 19*, 191–215. https://doi.org/10.1007/s11157-020-09523-3

Ungureanu, N., Vlăduț, N.-V., Biriș, S.-Ș., Gheorghiță, N.-E., & Ionescu, M. (2025). Biomass pyrolysis pathways for renewable energy and sustainable resource recovery: A critical review of

processes, parameters, and product valorization. *Sustainability*, *17*(17), Article 7806. https://doi.org/10.3390/su17177806

Caracterização físico-química das cinzas de fundo de caldeiras gerados no processo da caldeira de recuperação da produção celulose kraft

Luiza Xavier Tomaz Lima[1]; Camila Juliana Sampaio[1]; Luís Henrique Cabral Barral; Kaike Costa Carvalho[1]; Nicolle de Filippo Brumano[1]; Marisa Nunes Assis da Silva[1]; Carlos Henrique Reis dos Santos Silva[1]; João Gilberto Meza Ucella Filho[1]

[1] Universidade Federal de Viçosa

Resumo: O crescimento da produção de celulose no Brasil tem elevado a geração de resíduos industriais, destacando-se as cinzas de caldeira. Portanto, este trabalho teve como principal objetivo caracterizar físico-quimicamente cinzas de fundo provenientes de uma indústria de celulose kraft, visando ampliar o conhecimento sobre suas propriedades e seu potencial de reaproveitamento. Realizaram-se diversas análises, como de densidade aparente, teor de umidade, distribuição granulométrica e composição química elementar (C, H, N e S). As cinzas apresentaram densidade média de 1,195 g/cm³, umidade de 5,46% e distribuição granulométrica heterogênea, com alta predominância de partículas retidas na peneira de 100 mesh. A análise elementar indicou ausência de carbono e nitrogênio detectáveis e baixos teores de hidrogênio e enxofre, evidenciando elevado grau de combustão e predominância de constituintes inorgânicos. Os resultados obtidos ampliam o conhecimento sobre as características físico-químicas das cinzas de caldeira, orientando estudos futuros sobre seu potencial de reaproveitamento.

Palavras-chave: Economia Circular; Resíduos Industriais; Análise Elementar

Physicochemical Characterization of Ash Generated in the Recovery Boiler of the Kraft Pulp Production Process

Abstract: The growth of pulp production in Brazil has increased the generation of industrial residues, particularly boiler bottom ash. Therefore, this study aimed to perform the physicochemical characterization of bottom ash generated in a kraft pulp industry, seeking to expand the knowledge of its properties and potential for reuse. The analyses included bulk density, moisture content, particle size distribution, and elemental chemical composition (C, H, N, and S). The ash presented an average bulk density of 1.195 g/cm³, a moisture content of 5.46%, and a heterogeneous particle size distribution, with a predominance of particles retained on the 100-mesh sieve. Elemental analysis revealed the absence of detectable carbon and nitrogen, as well as low hydrogen and sulfur contents, indicating a high degree of biomass combustion and the predominance of inorganic constituents. These characteristics highlight the importance of physicochemical characterization as a preliminary step in assessing the potential for ash valorization. The results contribute to a better understanding of the physicochemical properties of boiler ash and provide a basis for future studies aimed at evaluating its potential for reuse.

Keywords: Circular Economy**;** Industrial Residues**;** Elemental Analysis.

1. INTRODUÇÃO

A indústria de celulose representa um dos segmentos mais importantes do setor florestal brasileiro, contribuindo para economia nacional devido à sua capacidade produtiva e participação no mercado internacional (IBÁ, 2025). O Brasil destaca-se mundialmente pela produção de celulose de fibra curta, obtida principalmente a partir do eucalipto, espécie que apresenta rápido crescimento, elevada produtividade e boa qualidade da madeira. Essas características, aliadas às condições climáticas favoráveis, aos investimentos em tecnologia e ao manejo florestal sustentável, proporcionam ao país vantagens competitivas em relação a outros grandes produtores mundiais (IBÁ,2025).

Além de sua relevância econômica, o setor de celulose proporciona geração de empregos, desenvolvimento regional e arrecadação de divisas por meio das exportações. Nos últimos anos, o crescimento da demanda mundial por papel, embalagens, produtos sanitários e materiais de origem renovável impulsionou novos investimentos na expansão da capacidade produtiva das indústrias brasileiras, consolidando o país como uma referência internacional na produção de celulose. Paralelamente, essa expansão intensificou a necessidade da adoção de práticas sustentáveis voltadas à otimização dos processos industriais, ao uso eficiente dos recursos naturais e à gestão adequada dos resíduos gerados, visando minimizar os impactos ambientais e promover a economia circular (JUSTO; FARIA, 2025).

No Brasil, a produção de celulose aumentou 5,2% em 2024 em relação ao ano anterior, impulsionada, entre outros fatores, pela entrada em operação da maior fábrica de celulose em linha única do mundo, localizada em Ribas do Rio Pardo (MS), com capacidade anual de aproximadamente 2,55 milhões de toneladas. Nesse mesmo ano, o país manteve sua posição entre os principais exportadores mundiais de celulose, com receitas de cerca de US$ 10,6 bilhões (IBÁ, 2025). Como consequência desse crescimento, houve também o aumento da geração de resíduos do processo kraft, especialmente das cinzas provenientes das caldeiras, reforçando a necessidade de alternativas técnica, econômica e ambientalmente viáveis para seu manejo e aproveitamento, reduzindo a disposição em aterros industriais.

Esse cenário reforça a necessidade de desenvolver alternativas de manejo e destinação que sejam técnica, econômica e ambientalmente viáveis, reduzindo a dependência de aterros industriais e promovendo o aproveitamento desses materiais. As cinzas geradas nas caldeiras podem ser classificadas, de acordo com sua origem e forma

de coleta, em cinzas de fundo (bottom ash) constituídas pela fração mais grosseira que permanece depositada na base da fornalha após a combustão, e cinzas volantes (fly ash), formadas por partículas mais finas transportadas pelos gases de combustão e posteriormente retidas em sistemas de controle de emissões, como filtros de mangas ou precipitadores eletrostáticos (ELLIOTT et al., 2022).

Em razão dos diferentes mecanismos de formação, esses materiais apresentam propriedades físicas, químicas e mineralógicas distintas, o que influencia diretamente suas possibilidades de aplicação e reaproveitamento. Nesse contexto, Elliott et al. (2022) destacam que, embora as cinzas da indústria de celulose apresentem potencial para utilização em áreas como agricultura, estabilização de solos, produção de cimento e materiais cerâmicos, grande parte desse resíduo ainda é destinada a aterros industriais. Os autores ressaltam ainda que a caracterização físico-química constitui uma etapa indispensável para avaliar a viabilidade técnica e ambiental dessas aplicações, uma vez que propriedades como composição química, granulometria, presença de elementos potencialmente tóxicos e comportamento de lixiviação variam de acordo com o combustível utilizado e as condições operacionais da caldeira (ELLIOTT et al., 2022).

Diante desse cenário, a caracterização físico-química das cinzas de fundo torna-se essencial para compreender suas propriedades e avaliar seu potencial de reaproveitamento. Assim, este trabalho teve como objetivo caracterizar as cinzas de fundo geradas em uma indústria de celulose kraft por meio da determinação da densidade, granulometria, teor de umidade e composição química elementar. Os resultados obtidos poderão subsidiar estudos voltados ao aproveitamento desse resíduo, contribuindo para sua valorização e para a adoção de práticas alinhadas aos princípios da economia circular.

2. MATERIAL E MÉTODOS

Os materiais que foram coletados são oriundos de uma fábrica de celulose kraft de uma empresa privada que firmou parceria com o Laboratório de Resíduos da Indústria de Florestal (LABRIF), localizada no Mato Grosso do Sul. Logo após a coleta, o material foi encaminhado para a Universidade Federal de Viçosa (UFV) e armazenado no Laboratório de Solos (UEPE-UFV).

Inicialmente, retirou-se uma fração de materia*l in natura* para a determinação da umidade. A parte restante do resíduo foi homogeneizado e posto em bandejas que foram dispostas sob uma lona para uma breve secagem, almejando a uma redução do excesso

de umidade e posteriormente foi submetido às análises de densidade, granulometria, teor de umidade e análise de química elementar.

Para a determinação do teor de umidade, uma alíquota de aproximadamente 4,5g do material foi pesada em uma balança analítica (Shimadzu, modelo ATX224R) e imediatamente transferida para um cadinho de porcelana previamente seco em estufa. O resíduo foi mantido em estufa de circulação de ar a uma temperatura de cerca de 100°C até atingir massa constante, obtendo o teor de umidade pelo cálculo de diferenças de massas.

A densidade aparente do material foi determinada utilizando-se um recipiente de volume conhecido (1000cm³). As cinzas foram adicionadas até o preenchimento total da caixa utilizada e, em seguida, a massa foi registada. A densidade foi calculada pela razão entre a massa do material pelo volume ocupado, D=M/V.

Para estabelecer as proporções granulométricas, uma fração de 0,5052kg da amostra foi submetida à tamisação em um agitador eletromagnético de peneiras (Bertel Industria Metalúrgica Ltda., modelo 04.04). O ensaio foi realizado por cerca de 10 minutos, na frequência 7. Sucessivamente, em um recipiente, foram pesadas as frações retidas individualmente, em uma balança analítica.

A composição química elementar do resíduo de cinzas foi determinada utilizando o equipamento TruSpec Micro (LECO). As amostras foram peneiradas previamente para a obtenção da granulometria entre 40 e 60 mesh. A análise baseia-se na combustão completa do material no inferior do aparelho, sob temperaturas que atingem até 1.050 °C, resultando na formação de gases que são conduzidos por filtros até as células de leitura.

Em seguida, os elementos químicos são individualizados em sequência induzida, de acordo com a massa molecular de cada um, e quantificados por meio de software específico. O teor de nitrogênio (N_2) foi determinado por condutividade térmica, enquanto CO_2 e H_2O foram quantificados por detecção no infravermelho. Para o enxofre (S) foi utilizado o módulo TruSpec S, e para CHN o módulo TruSpec Micro. O teor de oxigênio (O) foi calculado pela diferença, considerando a soma dos teores de carbono, hidrogênio,
nitrogênio, enxofre e cinzas, subtraída de 100, conforme rege a norma EM 15296 (DIN,2011).

A classificação granulométrica foi determinada com base na norma ISO 17827-1 (ISO, 2024). Para a realização do ensaio, foi separado um volume de 400 mL do material, o qual foi submetido à separação de partículas utilizando um agitador eletromagnético de peneiras, operando durante 10 minutos a uma rotação de 10 rpm. As peneiras utilizadas no experimento apresentavam aberturas de 140 mm, 100 mm, 70 mm, 50 mm, 40 mm, 30 mm e fundo coletor. Após o peneiramento, as frações retidas em cada peneira foram pesadas individualmente utilizando béquer de 1 L como recipiente auxiliar e uma balança analítica.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Densidade

A média da densidade da amostra de cinzas (Tabela 1) que foram utilizadas foram cerca de 1,195 g cm^{-3}**,** sem qualquer variação entre as réplicas analisadas, valor que foi inferior ao reportado por Ribeiro et al. (2010)**,** que analisaram e observaram que a densidade para cinzas provenientes de uma caldeira de biomassa de indústria de celulose foram cerca de 2,51 g cm^{-3}. A diferença entre os valores pode estar relacionada pela composição mineralógica das cinzas, pelas condições de combustão ou até mesmo o tipo de biomassa utilizado como combustível.

Tabela 1- Valor médio da densidade

Amostra	Repetição	Volume (cm^3)	Massa da Amostra (g)	Densidade (g/cm^3)	Média (g/cm^3)	Desvio Padrão (g/cm^3)
Cinzas (B)	**1**	1000	1195	1,195	1,195	0
	2	1000	1195	1,195		
	3	1000	1195	1,195		

3.2. Umidade

A umidade média determinada para as cinzas foi de 5,46%, evidenciando baixa retenção de água pelo material. Esse comportamento é esperado para cinzas provenientes de processos de combustão, uma vez que o material é submetido a temperaturas elevadas durante sua formação, promovendo a evaporação da água presente na biomassa e resultando em um resíduo predominantemente inorgânico (VASSILEV et al., 2013; DEMEYER; NKANA; VERLOO, 2001). Além disso, baixos teores de umidade constituem uma característica favorável para o gerenciamento das cinzas, pois facilitam as operações de armazenamento,

transporte e manuseio, reduzindo a possibilidade de alterações nas propriedades físicas do material durante a estocagem (RIBEIRO et al.,

2010; ELLIOTT et al., 2022). Sob a perspectiva do reaproveitamento, essa condição também favorece a incorporação das cinzas em materiais cimentícios, cerâmicos e aplicações geotécnicas, uma vez que contribui para maior estabilidade do material e para sua utilização em processos industriais (RIBEIRO et al., 2010; ELLIOTT et al., 2022).

3.3. Análise química elementar

Como mostrado na Tabela 2, a análise elementar evidenciou ausência de carbono e nitrogênio detectáveis, indicando elevado grau de combustão da biomassa e reduzida presença de matéria orgânica residual nas cinzas. O baixo teor de hidrogênio, juntamente com os reduzidos valores de enxofre, também confirma o caráter predominantemente inorgânico do material, resultado esperado para resíduos gerados em processos de combustão realizados em altas temperaturas. Durante esse processo, grande parte dos compostos orgânicos presentes na biomassa é degradada e volatilizada, permanecendo nas cinzas, principalmente, os constituintes minerais (VASSILEV et al., 2013).

Tabela 2 - Porcentagem encontrada (C, H, N, S)

Análise elementar				
Amostra	**C (%)**	**H (%)**	**N (%)**	**S (%)**
Rep. 1	0	0,523	0	0,177
Rep. 2	0	0,557	0	0,163
Rep. 3	0	0,577	0	0,192

3.4. Granulometria

A análise granulométrica demonstrou distribuição do tamanho das partículas, com predominância do material retido na peneira 100 mesh (26%), seguida das peneiras 70 mesh (19%) e 50 mesh (18%) conforme mostrado na Tabela 3. Essa distribuição evidencia a heterogeneidade granulométrica característica das cinzas provenientes da combustão, comportamento que também foi possível observar no estudo por Barbosa et al. (2013), que fracionaram cinzas de fundo e cinzas volantes provenientes de uma caldeira de biomassa de uma indústria de celulose e papel por meio de peneiramento, demonstrando que as diferentes frações granulométricas apresentam características químicas distintas. Os autores verificaram que as cinzas de fundo apresentaram predominância de partículas entre 850 e 2000 μm (34,9%),

seguidas das frações de 500–850 µm (24,1%) e 200–500 µm (9,2%), evidenciando ampla distribuição granulométrica do material. Além disso, notaram que as frações que possuem menor tamanho de partícula

apresentaram elevadas concentrações de metais e metaloides, indicando que a granulometria exerce influência direta sobre a composição química e, consequentemente, sobre o potencial de reaproveitamento das cinzas (BARBOSA et al., 2013).

Tabela 3 – Frações retidas na peneira (%)

Malha (mm)	Massa Retida Média (g)	Retenção (%)
30	52,65	10
40	21,55	4
50	89,85	18
70	94,1	19
100	129,45	26
140	35,7	7
Fundo	78,095	15

4. CONCLUSÃO

Considerando o crescimento da produção de celulose no Brasil e o consequente aumento na geração de cinzas de caldeira, a caracterização físico-química realizada neste estudo fornece informações essenciais para a compreensão das propriedades desse resíduo e para a avaliação de seu potencial de aproveitamento. O conhecimento de características como umidade, distribuição granulométrica e composição elementar constitui uma etapa fundamental para subsidiar a definição de alternativas de valorização, contribuindo para a redução da disposição em aterros e para a promoção de práticas alinhadas aos princípios da economia circular.

Os resultados obtidos demonstraram que as cinzas apresentam baixa umidade, distribuição granulométrica heterogênea e reduzidos teores de carbono, hidrogênio, nitrogênio e enxofre, indicando elevado grau de combustão e predominância de constituintes inorgânicos.

Essas características evidenciam o potencial do material para aplicações que demandem estabilidade físico-química, como sua incorporação em materiais cimentícios, cerâmicos e

geotécnicos, desde que estudos complementares, incluindo análises mineralógicas, de lixiviação e de desempenho tecnológico, confirmem sua viabilidade e segurança ambiental.

Dessa maneira, os resultados analisados constituem uma importante base para futuras pesquisas voltadas ao reaproveitamento das cinzas de caldeira, elevando sua valorização como matéria-prima secundária e contribuindo para que seja uma gestão mais sustentável dos resíduos gerados pela indústria de celulose. Além disso, para futuros trabalhos recomenda–se a avaliação sobre outras análises como propriedades de lixiviação, geotécnicas e mineralógicas, visando ampliar as possibilidades de uso desse material.

5. AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal de Viçosa (UFV), ao Departamento de Engenharia Florestal (DEF), ao Laboratório de Resíduos da Indústria Florestal (LABRIF), à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG), à Sociedade de Investigações Florestais (SIF), à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), à Empresa Brasileira de Pesquisa e Inovação Industrial (EMBRAPII) e à Fundação Arthur Bernardes (FUNARBE) pelo apoio e pelas contribuições.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Deutsches Institut für Normung. (2011). *DIN EN 15296: Solid biofuels—Determination of total content of carbon, hydrogen and nitrogen—Instrumental methods*. DIN.

Elliott, A., Mahmood, T., & Kamal, A. (2022). Boiler ash utilization in the Canadian pulp and paper industry. *Journal of Environmental Management, 319*, 115728. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.115728

Indústria Brasileira de Árvores. (2025). *Relatório anual 2025*. https://iba.org/wp-content/uploads/2025/10/IBA_relatorio_digital_POR.pdf

International Organization for Standardization. (2024). *ISO 17827-1:2024: Solid biofuels—Determination of particle size distribution for uncompressed fuels—Part 1: Oscillating screen method using sieve apertures of 3.15 mm and above*. https://standards.iteh.ai/catalog/standards/cen/fb9d11d8-a4c8-496e-9e5d-f3bf8ed1f781/en-iso-17827-1-2024

Justo, L. F., & Faria, L. C. (2025). *Use of industrial pulp and paper waste as agricultural inputs: A systematic literature review*. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, 29*(5), e287587. https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v29n5e287587

Ribeiro, A. S. M., Monteiro, R. C. C., Davim, E. J. R., & Fernandes, M. H. V. (2010). Ash from a pulp mill boiler—Characterisation and vitrification. *Journal of Hazardous Materials, 179*(1–3), 303–308. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2010.03.004

Vassilev, S. V., Baxter, D., Andersen, L. K., & Vassileva, C. G. (2013). An overview of the composition and application of biomass ash. Part 1: Phase–mineral and chemical composition and classification. *Fuel, 105*, 40–76. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2012.09.041

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Caracterização físico-química de palitos provenientes da produção de celulose kraft para avaliação do potencial de aproveitamento

Marisa Nunes Assis da Silva[1]; João Gilberto Meza Ucella Filho[1]; Nicolle De Filippo Brumano[1]; Pedro Henrique Elias da Silva[1]; Luís Henrique Cabral Barral[1]; Kaike Costa Carvalho [1]; Taís Aparecida das Neves Custódio[1] ; Thaynara Silva Vieira[1]

[1] Universidade Federal de Viçosa - UFV

Resumo: A indústria de celulose Kraft gera resíduos sólidos durante o processamento da madeira, entre os quais se destacam os palitos, constituídos por fragmentos de madeira parcialmente cozida. Apesar do potencial de aproveitamento desses resíduos, a escassez de informações sobre suas características físicas e químicas limita a definição de estratégias para sua valorização e utilização em diferentes processos industriais. Nesse contexto, este trabalho teve como objetivo caracterizar física e quimicamente os palitos provenientes da indústria de celulose Kraft, visando fornecer subsídios para a avaliação de seu potencial de aproveitamento. Foram determinados o teor de umidade, a densidade aparente, a distribuição granulométrica e a composição química estrutural. Os palitos apresentaram densidade aparente de 0,232 ± 0,010 g cm^{-3}, teor de umidade de 33,64 ± 0,72% e predominância de partículas retidas na peneira M8 (57,16%). A composição química foi caracterizada por 11,96% de extrativos, 15,88% de lignina total e 72,17% de holocelulose. Os resultados ampliam o conhecimento sobre as propriedades desse resíduo e demonstram que sua caracterização fornece informações relevantes para avaliar diferentes possibilidades de aproveitamento e valorização, contribuindo para o uso mais sustentável da biomassa gerada pela indústria de celulose.

Palavras-chave: Biomassa; Granulometria; Bioenergia

Physicochemical characterization of pin chips from Kraft Pulp production for value-added applications

Abstract: The Kraft pulp industry generates solid residues during wood processing, among which pin chips, consisting of small wood chip fragments generated during chip preparation and screening, are particularly noteworthy. Despite the potential for utilizing these residues, the limited information available on their physical and chemical characteristics restricts the development of strategies for their valorization and use in different industrial applications. In this context, the present study aimed to physically and chemically characterize pin chips generated during Kraft pulp production in order to provide information supporting the evaluation of their utilization potential. Moisture content, bulk density, particle size distribution, and structural chemical composition were determined. The pin chips exhibited a bulk density of 0.232 ± 0.010 g cm^{-3}, a moisture content of 33.64 ± 0.72%, and a predominance of particles retained on the M8 sieve (57.16%). The chemical composition consisted of 11.96% extractives, 15.88% total lignin, and 72.17% holocellulose. The results expand the knowledge of the properties of this residue and demonstrate that its characterization provides relevant information for evaluating different utilization and valorization opportunities, contributing to the more sustainable use of biomass generated by the pulp industry.

Keywords: Biomass; Particle Size Distribution; Bioenergy.

1. Introdução

O setor brasileiro de árvores cultivadas representa uma importante cadeia produtiva para a economia nacional, contribuindo para a produção interna, a redução da dependência de importações e o aumento da sustentabilidade dos processos industriais. Impulsionado pela crescente demanda global por produtos de origem renovável, esse segmento desempenha papel estratégico na geração de empregos e no fornecimento de matéria-prima para diversos setores, como as indústrias de celulose e papel, construção civil e automobilística (IBÁ, 2025). Entre esses setores, destaca-se a indústria de celulose kraft, uma das principais consumidoras de madeira cultivada e de grande relevância econômica para o país. Entretanto, assim como outras atividades de processamento da madeira, a produção de celulose gera grandes volumes de resíduos lignocelulósicos, cujo gerenciamento representa um desafio ambiental e econômico. Embora alternativas como reciclagem, compostagem e aproveitamento energético estejam disponíveis, a disposição desses resíduos em aterros ainda é uma prática recorrente, restringindo o aproveitamento de seu potencial como matéria-prima para novos processos. Nesse contexto, legislações ambientais mais rigorosas têm impulsionado estratégias de valorização desses resíduos, promovendo a economia circular e o uso mais eficiente dos recursos no setor florestal (Vilarinho et al., 2022; Besserer et al., 2021; Pinho; Calmon, 2023).

O processo kraft é o método mais empregado mundialmente para a produção de celulose, ele transforma cavacos de madeira em fibras de celulose resistentes por meio da solubilização da lignina com um licor de cozimento alcalino, possui elevada eficiência na separação das fibras e à recuperação dos reagentes químicos utilizados no cozimento da madeira (Henriksson et al., 2024) Durante o processo produtivo são gerados diferentes resíduos dentre eles, sólidos, líquidos e gasosos, muitos dos quais apresentam potencial de reaproveitamento.

Entre os resíduos sólidos provenientes da etapa de depuração da polpa destacam-se os palitos, constituídos principalmente por fragmentos de madeira insuficientemente cozida, que são removidos juntamente com outras impurezas durante o sistema de peneiramento, com o objetivo de preservar a qualidade da polpa e garantir a eficiência operacional das etapas subsequentes do processo (Germgård et al., 2023).

Nesse contexto, este trabalho teve como objetivo caracterizar física e quimicamente os palitos gerados na indústria de celulose Kraft, por meio da determinação da densidade aparente, do teor de umidade, da distribuição granulométrica e da composição química estrutural. Essa

caracterização permite compreender o comportamento do material e ampliar o conhecimento sobre suas propriedades, fornecendo subsídios para avaliar seu potencial de utilização em diferentes aplicações. Dessa forma, os resultados contribuem para a valorização deste resíduo e para o desenvolvimento de estratégias mais sustentáveis de aproveitamento da biomassa e da economia circular no setor florestal.

2. Material e métodos

O Resíduo de palitos foi coletado em uma fábrica de celulose kraft de uma empresa parceira do Laboratório de Resíduos da Indústria Florestal (LABRIF), no Mato Grosso do Sul. Posteriormente, o material foi enviado à Universidade Federal de Viçosa (UFV) e armazenado no Laboratório de Solos (UEPE – UFV).

Inicialmente, retirou-se uma fração do material in natura para a determinação da umidade. O restante do resíduo foi homogeneizado e disposto em lona para secagem prévia, visando à redução do excesso de umidade e posteriormente foi submetido às análises de densidade, granulometria e Análise Química Estrutural.

Para a determinação do teor de umidade, uma alíquota de aproximadamente 4,5 g do material foi pesada em balança analítica (Shimadzu, modelo ATX224R) e transferida para um cadinho de porcelana previamente seco em estufa. A amostra foi mantida em estufa a 100 °C até atingir massa constante, sendo o teor de umidade calculado por diferença de massa.

A densidade aparente do material foi determinada utilizando-se um recipiente de volume conhecido (1000 c[N1] ³). O resíduo foi adicionado até o preenchimento total do recipiente e, em seguida, a massa foi registrada. O cálculo da densidade foi realizado pela razão entre a massa do material e o volume ocupado.

A classificação granulométrica foi determinada com base na norma ISO 17827-1 (ISO, 2024). Para a realização do ensaio, foi separado um volume de 400 mL do material, o qual foi submetido à separação de partículas utilizando um agitador eletromagnético de peneiras, operando durante 10 minutos a uma rotação de 10 rpm. As peneiras utilizadas no experimento apresentaram aberturas de 50 mm, 31,5mm, 16mm, 8mm, 4mm, 2mm e 1 mm, além do fundo coletor. Após o peneiramento, as frações retidas em cada peneira foram pesadas individualmente utilizando béquer de 1 L como recipiente auxiliar e uma balança analítica.

Para determinação da composição química estrutural do resíduo de palitos foram empregadas as amostras já moídas, utilizando-se a fração que passou pela peneira com malha de 40 mesh e ficou retida na peneira com malha de 60 mesh (ASTM, 1982). A determinação do teor

absolutamente seco da madeira foi realizada conforme a norma TAPPI 264 om-88 (TAPPI, 1998). Os teores de extrativos foram determinados em duplicatas, de acordo com a norma TAPPI 204 om-88 (TAPPI, 1996), utilizando-se o método de determinação de extrativos totais, apenas substituindo o etanol/benzeno, pelo etanol/tolueno.

Os teores de lignina insolúvel, por sua vez, foram determinados em duplicata pelo método Klason, modificado de acordo com o procedimento proposto por Gomide e Demuner (1986). A lignina solúvel foi determinada por espectrometria, conforme Goldschimid (1971), a partir da diluição do filtrado proveniente do procedimento para obtenção da lignina insolúvel. O teor de lignina total foi obtido por meio da soma dos valores de lignina solúvel e insolúvel. O teor de holocelulose foi calculado por diferença entre 100% e a soma dos teores de extrativos e lignina total.

Os resultados foram apresentados por meio de estatística descritiva (média ± desvio padrão). Os dados foram processados e analisados no software Microsoft Excel.

3. Resultados e discussão

A densidade aparente média foi de 0,232 ± 0,01 g cm^{-3}, indicando baixa variabilidade entre as amostras analisadas e boa reprodutibilidade das determinações. Esse resultado caracteriza o material como um resíduo de baixa densidade. O valor obtido foi próximo ao observado por Pereira et al. (2016), que determinaram densidade a granel de 181,7 kg m^{-3} (0,182 g cm^{-3}) para biomassa de *Eucalyptus grandis* × *Eucalyptus urophylla* utilizada na produção de pellets. A proximidade entre os valores sugere que os palitos de madeira apresentam comportamento físico semelhante ao de outros resíduos lignocelulósicos provenientes do eucalipto. A densidade aparente é influenciada por fatores como a composição do material, as dimensões e o formato das partículas, bem como pelo seu arranjo durante a determinação, uma vez que essas características afetam o volume ocupado e a quantidade de espaços vazios entre as partículas.

O teor de umidade médio dos resíduos de palitos provenientes da indústria de celulose kraft foi de 33,64% . Esse resultado indica que o material apresenta elevada umidade em sua condição de coleta, característica comum em resíduos gerados durante o processamento industrial da madeira em razão da utilização de água e vapor nas etapas de produção da celulose, o que evidencia a necessidade de uma etapa de secagem antes da densificação. (Smook, 2016).

Valor semelhante foi observado por Nogueira et al. (2024), que encontraram teor de umidade de 34,20% em cavacos de *Eucalyptus dunnii* após 150 dias de secagem. Os autores

destacam que a redução da umidade melhora a qualidade energética da biomassa. O teor de umidade obtido foi muito próximo ao relatado na literatura, indicando comportamento semelhante para resíduos dessa natureza. A proximidade entre os valores sugere que o material apresenta características compatíveis com outros resíduos lignocelulósicos provenientes da indústria de celulose kraft.

Além disso, as elevadas temperaturas características da região de Mato Grosso podem ter contribuído para a secagem natural dos resíduos.

Tabela 1 – Caracterização física dos palitos *(Knots)* provenientes da indústria de celulose kraft

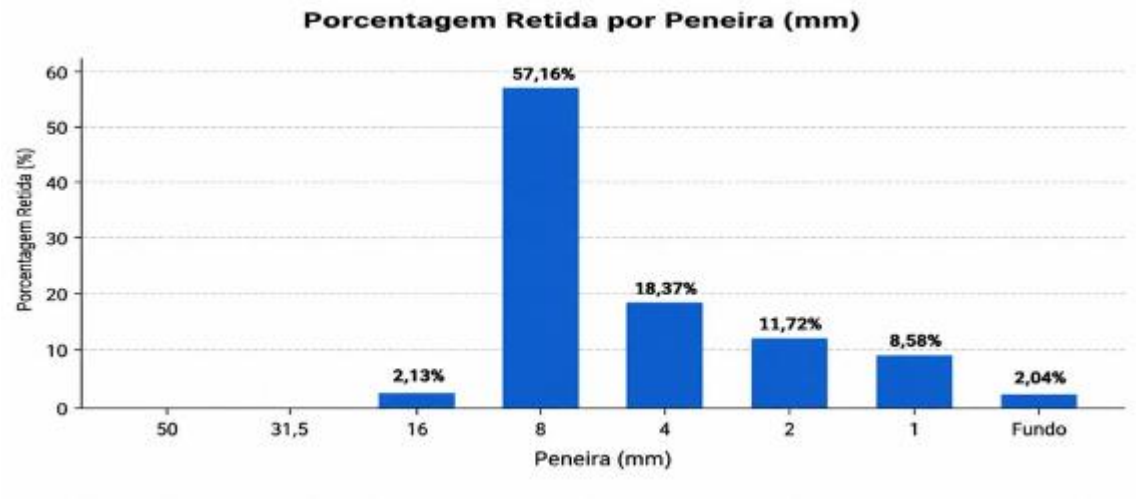
Parâmetro	Unidade	Resultado (média ± DP)
Densidade aparente	g cm^{-3}	0,232 ± 0,010
Teor de Umidade	%	33,64 ± 0,72

Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

A distribuição granulométrica dos resíduos de palitos de madeira está apresentada no Gráfico 1. Observou-se predominância da fração retida na peneira M8 (57,16%), indicando maior proporção de partículas intermediárias a grandes e baixa geração de material fino. Essa distribuição está relacionada ao processamento mecânico da madeira, que resulta em diferentes classes granulométricas conforme as etapas de fragmentação do material.

A distribuição granulométrica da biomassa influencia o empacotamento das partículas durante a densificação, uma vez que partículas de diferentes tamanhos preenchem os espaços vazios, favorecendo a compactação do material. Essa característica é importante na produção de briquetes e pellets, pois favorece a obtenção de biocombustíveis sólidos com maior densidade e resistência mecânica, reduzindo a geração de finos durante o manuseio, o transporte e o armazenamento, além de melhorar a estabilidade e a qualidade do produto final (Kpalo et al., 2020).

Gráfico 1 - Porcentagem retirada por peneira



Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

A composição química estrutural dos resíduos de palitos provenientes da indústria de celulose Kraft é apresentada na Tabela 1. Esses componentes influenciam diretamente as propriedades físicas, químicas e energéticas da biomassa, sendo importantes para avaliar seu potencial de aplicação de uso.

Tabela 1- Caracterização química estrutural dos palitos (*knots*) provenientes da indústria de celulose kraft.

Parâmetros	Unidade	Resultado (média)
Extrativos totais	%	11,9574
Lignina Insolúvel	%	14,9388
Lignina Solúvel	%	0,9362
Lignina Total	%	15,875
Holocelulose	%	72,1676

Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

O teor médio de extrativos foi de 11,9574%, valor superior ao observado por Vieira et al. (2021) para madeira de *Eucalyptus* spp. (2,7%). Essa diferença pode estar relacionada às características específicas dos resíduos de palitos, que podem apresentar composição química distinta da madeira sólida, além da heterogeneidade do material, da origem do resíduo, das condições de processamento e da metodologia de amostragem.

O teor de lignina total dos resíduos de palitos foi de 15,875% . Esse valor foi inferior ao relatado por Vieira et al. (2021) para madeira de *Eucalyptus* spp. (27,7%), indicando possível remoção parcial da lignina durante o processo Kraft. Embora a redução do teor de lignina possa

influenciar algumas propriedades da biomassa, os resíduos ainda apresentam potencial para diferentes aplicações. Em processos de compactação, como a produção de briquetes e pellets, a lignina remanescente pode atuar como agente ligante natural, favorecendo a coesão e a resistência mecânica dos produtos densificados. Além disso, as características químicas desses resíduos permitem seu aproveitamento como matéria-prima em diferentes processos industriais, ampliando as possibilidades de valorização e de uso sustentável desse material.

O teor de holocelulose foi de 72,1676% (Tabela 2), valor semelhante ao observado por Vieira et al. (2021) em clones de *Eucalyptus* spp. (68–72%). Esse resultado indica que os resíduos de palitos preservam elevada proporção de carboidratos estruturais, característica importante tanto para a produção de briquetes e pellets quanto para o aproveitamento energético da biomassa, uma vez que esses componentes contribuem para a manutenção da estrutura do material e para seu potencial como biocombustível sólido.

4. Conclusões

De modo geral, os resultados permitiram caracterizar física e quimicamente os resíduos de palitos provenientes da indústria de celulose kraft, indicando seu potencial de aproveitamento para a produção de briquetes e pellets. A densidade aparente de 0,232 ± 0,010 g cm^{-3} demonstra a necessidade de densificação do material, enquanto o teor de umidade de 33,64 ± 0,72% indica a importância da secagem antes da compactação. A predominância de partículas retidas na peneira M8 (57,16%) também representa uma característica relevante para o processamento e formação dos produtos densificados. Os teores de 11,96% de extrativos, 15,88% de lignina total e 72,17% de holocelulose confirmam a natureza lignocelulósica do resíduo e sua presença significativa de componentes estruturais da biomassa, favorecendo seu uso como matéria-prima para biocombustíveis sólidos. Assim, as características obtidas indicam que os resíduos de palitos apresentam potencial para serem destinados à produção de briquetes e pellets, contribuindo para o aproveitamento da biomassa e a redução de resíduos industriais. Para trabalhos futuros, recomenda-se avaliar as propriedades energéticas, mecânicas e de durabilidade dos produtos obtidos.

5. Agradecimentos

À Universidade Federal de Viçosa (UFV), ao Departamento de Engenharia Florestal (DEF), ao Laboratório de Resíduos da Indústria Florestal (LABRIF), ao Laboratório de Painéis e Energia da Madeira (LAPEM), à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais

(FAPEMIG), à Empresa Brasileira de Pesquisa e Inovação Industrial (EMBRAPII) e à Arauco Celulose do Brasil S.A.

6. Referências bibliográficas

Indústria Brasileira de Árvores. (2025). *Relatório anual 2025*. https://iba.org/wp-content/uploads/2025/10/relatorioAnual2025.pdf

Vilarinho et al. (2022) Vilarinho, I. S., Gameiro, T., Capela, M. N., Carvalheiras, J., Caetano, A. P. F., Novo, C., Novais, R. M., & Labrincha, J. A. (2022). *Review of recycling alternatives for paper pulp wastes*. *Frontiers in Materials, 9*, 1006861. https://doi.org/10.3389/fmats.2022.1006861

Henriksson, G., Germgård, U., & Lindström, M. E. (2024). *Pulp and paper chemistry and technology* (Vol. 2). Walter de Gruyter.

Besserer, A., Troilo, S., Girods, P., Rogaume, Y., & Brosse, N. (2021). *Cascading recycling of wood waste: A review*. *Polymers, 13*(11), 1752. https://doi.org/10.3390/polym13111752

Pinho, G. C. de S., & Calmon, J. L. (2023). *LCA of wood waste management systems: Guiding proposal for the standardization of studies based on a critical review*. *Sustainability, 15*(3), 1854. https://doi.org/10.3390/su15031854

Haile, A., Gelebo, G. G., Tesfaye, T., Mengie, W., Mebrate, M. A., Abuhay, A., & Limeneh, D. Y. (2021). *Pulp and paper mill wastes: Utilizations and prospects for high value-added biomaterials*. *Bioresources and Bioprocessing, 8*(1), 35. https://doi.org/10.1186/s40643-021-00385-3

Henriksson, G., Germgård, U., Sjöstrand, B., & Fiskari, J. (2023). *The kraft pulping process*. *Nordic Pulp & Paper Research Journal, 38*(1), 1–31. https://doi.org/10.1515/npprj-2022-0044

Indústria Brasileira de Árvores. (2024). *Relatório anual 2024*. IBÁ. https://iba.org/datafiles/publicacoes/relatorios/relatorio2024.pdf

Nogueira, D. F. B., Fiedler, N. C., Vidaurre, G. B., Lopes, E. da S., Pelissari, C. K. R., Ramalho, A. H. C., Robert, R. C. G., & Maffioletti, F. D. (2024). *Quality of eucalyptus wood chips for bioenergy as a function of drying time and horizontal chipper settings. Heliyon, 10*(4), e25991. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e25991

Vieira, T. A. S., Arriel, T. G., Zanuncio, A. J. V., Carvalho, A. G., Branco-Vieira, M., Carabineiro, S. A. C., & Trugilho, P. F. (2021). *Determination of the chemical composition of Eucalyptus spp. for cellulosic pulp production*. *Forests, 12*(12), 1649. https://doi.org/10.3390/f12121649

Kpalo, S. Y., Zainuddin, M. F., Manaf, L. A., & Roslan, A. M. (2020). *A review of technical and economic aspects of biomass briquetting*. *Sustainability, 12*(11), 4609. https://doi.org/10.3390/su12114609

Smook, G. A. (2016). *Handbook for pulp & paper technologists* (4th ed.). TAPPI Press.

Pereira, B. L. C., Carneiro, A. C. O., Carvalho, A. M. M. L., Vital, B. R., Oliveira, A. C., & Canal, W. D. (2016). Influência da adição de lignina kraft nas propriedades de pellets de eucalipto. *Floresta, 46*(2), 235–242. https://doi.org/10.5380/rf.v46i2.44936

American Society for Testing and Materials. (1982). Standard methods of evaluating properties of wood-base fiber and particle materials. ASTM.

Goldschmid, O. (1971). Ultraviolet spectra. In K. V. Sarkanen & C. H. Ludwig (Eds.), Lignins (pp. 241–266). Wiley-Interscience.

International Organization for Standardization. (2024). ISO 17827-1:2024: Solid biofuels — Determination of particle size distribution for uncompressed fuels — Part 1: Oscillating screen method using sieves with apertures of 3,15 mm and above. International Organization for Standardization.

Gomide, J. L., & Demuner, B. J. (1986). Determinação do teor de lignina em material lenhoso: Método Klason modificado. O Papel, 47(8), 36–38.

Technical Association of the Pulp and Paper Industry. (1996). TAPPI T 204 om-88: Solvent extractives of wood and pulp. TAPPI Press.

Technical Association of the Pulp and Paper Industry. (2001). TAPPI Test Method T 264 om-88: Preparation of wood for chemical analysis. In TAPPI Standard Methods. TAPPI Press.

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Caracterização macroanatômica da casca de *Khaya senegalensis* A. Juss. em diferentes posições longitudinais do fuste

Vinicius Oliveira Santos1; Camila Duarte[1]; Laísa Pereira Oliveira[1]; Gabriel Tavares Silva[1]; Gustavo Henrique Freiria[1]; Cleiton Valfrido Ferreira dos Santos[1]; João Gabriel Missia da Silva[2]; Thaís Brito Sousa[1]

[1] Universidade do Estado de Minas Gerais
[2] Sesi Saúde Vitória

Resumo: Cascas de árvores têm despertado crescente interesse devido ao seu potencial de aproveitamento em biorrefinarias, tornando o conhecimento de sua estrutura anatômica essencial para subsidiar aplicações tecnológicas. Entretanto, informações sobre a macroanatomia da casca de *Khaya senegalensis* A. Juss. ainda são inexistentes na literatura. Assim, este estudo objetivou caracterizar macroanatomicamente a casca dessa espécie em diferentes posições longitudinais do fuste. As amostras foram obtidas na base (0%), meio (50%) e topo (100%) de árvores com 14 anos de idade. Foram avaliadas a espessura total da casca, da periderme, do floema total e da região correspondente ao floema condutor, além da descrição de caracteres macroanatômicos. A espessura da casca reduziu no sentido base-topo, passando de 9,49 mm na base para 4,80 mm no topo. O floema representou mais de 95% da espessura total da casca, enquanto a periderme apresentou pequena variação entre as posições avaliadas. O ritidoma ocorreu de forma irregular, estando ausente na região mediana do fuste. Também foram observados raios floemáticos fortemente dilatados em forma de cunha e abundantes estruturas compatíveis com esclereídes. Este estudo apresenta a primeira caracterização macroanatômica da casca de *K. senegalensis* ao longo do fuste, fornecendo informações inéditas que ampliam o conhecimento anatômico da espécie e subsidiam estudos voltados ao aproveitamento tecnológico dessa biomassa.

Palavras-chave: Mogno africano; Floema; Crescimento Secundário.

Bark Macroanatomical Characterization of *Khaya senegalensis* A. Juss. at Different Longitudinal Stem Positions

Abstract: Tree bark has attracted increasing interest due to its potential application in biorefineries, making the understanding of its anatomical structure essential for supporting technological applications. However, information on the bark macroanatomy of *Khaya senegalensis* A. Juss. is still lacking in the literature. Therefore, this study aimed to characterize the bark macroanatomy of this species at different longitudinal positions along the stem. Bark samples were collected from the base (0%), middle (50%), and top (100%) of 14-year-old trees. Total bark thickness, periderm thickness, total phloem thickness, and the thickness of the region corresponding to the conducting phloem were evaluated, together with the description of macroanatomical features. Bark thickness decreased from the base to the top of the stem, ranging from 9.49 mm at the base to 4.80 mm at the top. Phloem accounted for more than 95% of the total bark thickness, whereas the periderm showed little variation among the sampled positions. Rhytidome occurred irregularly and was absent in the middle portion of the stem. Strongly wedge-shaped dilated phloem rays and abundant structures compatible with sclereids were also observed. This study provides the first macroanatomical characterization of *K.*

senegalensis bark along the stem, offering novel information that expands the anatomical knowledge of the species and supports future studies on the technological valorization of this biomass.

Keywords: African mahogany; Phloem; Secondary growth.

1. Introdução

A valorização de cascas de árvores tem sido ponto estratégico para o estabelecimento de uma economia verde pautada nos princípios da sustentabilidade. Historicamente consideradas resíduos da indústria madeireira, as cascas hoje são consideradas importante subproduto do setor florestal sendo opção como nova fonte de renda devido ao elevado potencial como matéria-prima para fabricação de produtos diversos.

O conhecimento da estrutura anatômica da casca é fundamental para compreender seu desenvolvimento e subsidiar estratégias de aproveitamento tecnológico em biorrefinarias, uma vez que sua organização resulta da atividade do câmbio vascular e da formação sucessiva de peridermes durante o crescimento secundário, conferindo-lhe elevada heterogeneidade estrutural (Apezzato-da-Glória; Carmello-Guerreiro, 2009; Boher et al., 2017).

A casca constitui uma estrutura complexa formada, em geral, pela periderme e pelo floema secundário, podendo incluir tecidos primários, como córtex e floema primário (Shtein et al., 2023). A periderme exerce função protetora e é composta por felogênio, feloderme e súber, podendo ocorrer em camadas sucessivas que formam o ritidoma (Evert, 2006; Vergílio e Marcati, 2017)). Devido à diversidade de tecidos presentes, a casca desempenha funções relacionadas ao transporte de fotoassimilados, proteção, armazenamento e suporte mecânico (Roth, 1981; Caccianiga et al., 2021).

A estrutura da casca também varia longitudinalmente ao longo do fuste em resposta ao crescimento da árvore e à atividade contínua do câmbio vascular. Em *Eucalyptus*, estudos demonstram redução da espessura da casca no sentido base-topo e destacam a influência do crescimento da árvore sobre a produção e distribuição da casca ao longo do fuste (Quilhó & Pereira, 2001; Ramalho et al., 2020). Entretanto, informações sobre a variação longitudinal da macroanatomia da casca ainda são escassas para espécies florestais tropicais, inexistindo estudos para *Khaya senegalensis*.

O mogno-africano (*Khaya senegalensis* A. Juss.) destaca-se pelo elevado valor comercial da madeira e pela expansão de seus plantios no Brasil. Além disso, sua casca apresenta potencial para obtenção de compostos fenólicos, especialmente taninos condensados

(Bikoro Bi Athomo et al., 2018; Lestari et al., 2015), constituindo uma biomassa promissora para aplicações em biorrefinarias. Apesar disso, as pesquisas concentram-se predominantemente nas propriedades da madeira, havendo escassez de informações sobre a organização macroanatômica da casca e sua variação ao longo do fuste.

Dessa forma, este estudo teve como objetivo caracterizar a macroanatomia da casca de *Khaya senegalensis* em diferentes posições longitudinais do fuste

2. Material e métodos

2.1. Coleta do material

Foram coletadas cascas de *Khaya senegalensis* proveniente de cinco árvores de 14 anos localizadas em plantio comercial em Ponte de Itabapoana, Mimoso do Sul - ES. A partir de cada indivíduo, as cascas foram removidas em diferentes posições longitudinais: 0, 50 e 100 % da altura comercial da árvore (5 cm de diâmetro).

2.2. Preparo do material

As cascas foram seccionadas em corpos-de-prova de formato aproximadamente cúbico com serra circular manual. Posteriormente, foram polidas no plano transversal com lixas d'água (gramaturas 80, 120, 220, 440, 600 e 1200) para uma melhor visualização e distinção dos tecidos.

2.3. Análises macroscópicas

O padrão externo da casca foi avaliado em relação a cor e textura. Para análise das superfícies polidas utilizou-se microscópio integrado ao espectrômetro M4 Tornado da marca Brucker e as imagens foram analisadas no software ZEISS ZEN 3.4. Foram mensuradas a espessura total da casca, espessura do floema e periderme. Também foi possível a análise de estruturas anatômicas como esclereídes e padrão de dilatação de raios.

2.4 Estatística

O experimento se trata de um delineamento inteiramente casualizado (DIC) com três tratamentos (posições longitudinais 0, 50 e 100% da altura comercial da árvore) com cinco repetições. Neste trabalho, optou-se por utilizar a análise estatística descritiva.

3. Resultados e discussão

A casca externa de *Khaya senegalensis* é acinzentada a amarronzada, apresentando superfície lisa a levemente rugosa sem microfissuras aparentes (Figura 1), porém, com certo desprendimento da casca mais externa. A porção interna exibe coloração semelhante, variando entre tons de cinza e marrom. A espessura média total da casca nos trechos analisados foi de 6,64 mm.



Figura 1 - Aspecto externo da casca de *Khaya senegalensis*

Na base do tronco (0%) foi registrada uma espessura média de 9,49 mm, enquanto na porção mediana (50%) e no topo (100%) foram obtidas médias de 5,62 mm e 4,80 mm, respectivamente (Tabela 1). Comportamento semelhante foi observado por Quilhó e Pereira (2001) para *Eucalyptus globulus*, que registraram redução da espessura da casca no sentido base-topo. A redução da espessura da casca no sentido base-topo pode ser atribuída às diferenças na idade dos tecidos ao longo do fuste e à atividade contínua do câmbio vascular, responsável pela produção de floema secundário durante o crescimento secundário (Apezzato-da-Glória & Carmello-Guerreiro, 2009). Dessa forma, é esperado que as porções basais apresentam maior espessura em razão do acúmulo de tecidos mais antigos e desenvolvidos, principalmente das camadas de floema não condutor.

Tabela 1 – Dados quantitativos macroanatomicos de *Khaya senegalensis*

Posição	Espessura Total	Periderme	Floema Total	Floema Condutor

	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)
Base	9,49 ± 0,88	0,15 ±0,04	9,02 ±1,10	0,88 ±0,34
Meio	5,62 ±1,08	0,10 ±0,03	5,51 ±0,99	0,80 ±0,24
Topo	4,80 ±0,88	0,16 ±0,04	4,63 ±0,47	0,71 ±0,06

Também foram verificadas diferenças na espessura da periderme ao longo do tronco, cujas médias corresponderam a 0,15 mm, 0,10 mm e 0,17 mm para as posições de 0%, 50% e 100%, respectivamente (Tabela 1). Essa estrutura corresponde ao tecido secundário de proteção que substitui a epiderme durante o crescimento secundário do caule, sendo formada pelo felema, felogênio e feloderme (Angyalossy et al., 2016) . A variação observada entre as diferentes posições do tronco pode estar relacionada aos diferentes estágios de desenvolvimento dos tecidos da casca dos indivíduos analisados,contendo um padrão de descasamento mais intenso na região medial (Figura 2).

A presença de ritidoma foi observada apenas em parte dos indivíduos da base e do topo, porém sua distribuição não ocorreu de maneira uniforme. O ritidoma corresponde à porção mais externa da casca, formada pela sucessiva produção de peridermes que no caso observado acabam se desprendendo posteriormente (Angyalossy et al., 2016) . Assim, o desprendimento observado na camada mais externa da casca pode estar relacionado à formação contínua de novas peridermes e ao isolamento progressivo de tecidos mais antigos. A ocorrência irregular do ritidoma pode indicar diferenças no estágio de desenvolvimento da casca entre as amostras, uma vez que a formação dessas camadas depende da atividade dos tecidos meristemáticos responsáveis pela produção da periderme.

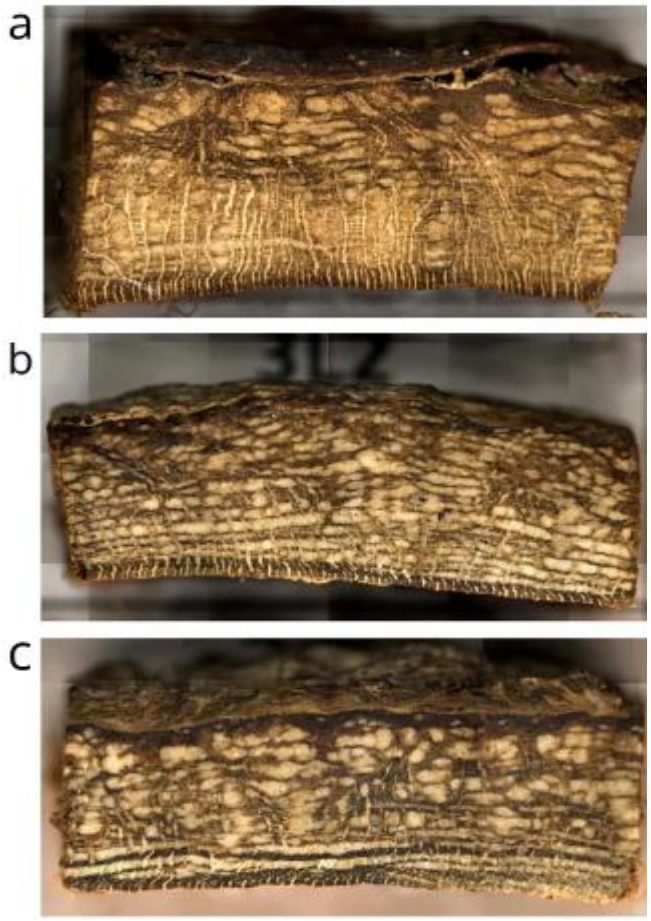


Figura 2 - Detalhe da seção transversal das cascas. a) Base; b) Meio; c) Topo

O floema foi avaliado considerando sua espessura total e a espessura correspondente apenas ao floema condutor. As médias da espessura total foram de 9,02 mm na base, 5,51 mm na porção mediana e 4,63 mm no topo (Tabela 1). Esse tecido correspondeu à maior fração da casca, representando aproximadamente 96,51 ± 1,50% de sua espessura total. A maior espessura observada na base reflete o crescimento secundário do caule que durante a atividade cambial produz continuamente novas células de floema, deslocando o floema condutor formado para posições mais externas, onde este perde sua função de condução e passa a constituir o floema não condutor, acumulando-se ao longo do desenvolvimento da árvore (Apezzato-da-Glória, 2006).

No material analisado foi possível distinguir a faixa correspondente ao floema condutor, que apresentou coloração mais escura em relação ao floema não condutor (Figura 2). Característica semelhante foi apresentada em (Souza et al. 2025). As médias de espessura dessa

porção foram de 0,88 mm, 0,80 mm e 0,71 mm para a base, porção mediana e topo, respectivamente. Apesar da redução expressiva da espessura total da casca, a espessura da faixa correspondente ao floema condutor apresentou pequena variação ao longo do fuste. Esse comportamento sugere que a maior parte da variação longitudinal da casca resulta do acúmulo de floema não condutor, enquanto a região funcional do floema mantém espessura relativamente constante para assegurar o transporte de fotoassimilados.

Na região mais interna do floema foram observados raios floemáticos largos e numerosos começando desde o floema condutor e se dilatando de forma intensa na forma de cunha em direção à casca externa, essa característica está relacionada ao crescimento radial da casca, permitindo a expansão dos tecidos periféricos durante o desenvolvimento secundário. A intensa dilatação dos raios em direção à periferia da casca evidencia sua participação na acomodação do crescimento radial do caule. À medida que novos tecidos floemáticos são produzidos pelo câmbio vascular, os raios sofrem expansão tangencial, permitindo a manutenção da integridade estrutural da casca durante o aumento do perímetro do tronco. Essa organização é semelhante à descrita por (Angyalossy et al. 2016) para *Tilia americana*, que relataram raios fortemente dilatados alternando-se com raios leve ou irregularmente dilatados ou não dilatados.

Também foram identificados nódulos e camadas esbranquiçadas bem distribuídas, abundantes e tangentes ao floema, possivelmente associados à presença de esclereídes, células especializadas caracterizadas por paredes secundárias fortemente lignificadas e que contribuem para resistência mecânica de toda árvore. Em (Carmo et al. 2016) estruturas semelhantes foram encontradas para *Albizia niopoides* e determinadas como esclereídes.

4. Conclusões

Pela primeira vez, é apresentada a caracterização macroanatômica da casca de *Khaya senegalensis* ao longo do fuste, fornecendo informações inéditas sobre a organização estrutural dessa biomassa. A casca apresentou redução da espessura no sentido base-topo, sendo aproximadamente duas vezes mais espessa na base da árvore, enquanto o floema constituiu mais de 95% de sua espessura total. O ritidoma apresentou distribuição irregular, estando ausente na posição mediana do fuste. A análise macroanatômica também permitiu identificar um padrão evidente de dilatação dos raios floemáticos, fortemente dilatados em forma de cunha, além da ocorrência abundante de estruturas compatíveis com esclereídes em todas as posições longitudinais. Esses resultados ampliam o conhecimento sobre a anatomia da casca de *K.*

senegalensis e estabelecem uma base para estudos futuros sobre sua valorização tecnológica e seu aproveitamento em biorrefinarias.

5. Agradecimentos

Os autores agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) pelo apoio financeiro aos projetos APQ-03699-23 e APQ-04943-24. À Universidade do Estado de Minas Gerais (UEMG), pela concessão das bolsas de iniciação científica. À Fazenda Tabatinga, em Mimoso do Sul, ES, pelo fornecimento das cascas de *Khaya senegalensis* utilizadas neste estudo.

6. Referências bibliográficas

Angyalossy V, Pace MR, Evert RF, Marcati CR, Oskolski AA, Terrazas T, Kotina E, Lens F, Mazzoni-Viveiros SC, Angeles G, Machado SR, Crivellaro A, Rao KS, Junikka L, Nikolaeva N, & Baas P. 2016. IAWA List of Microscopic Bark Features. IAWA Journal 37 (4): 517– 615.

Apezzato-da-Glória, B., & Carmello-Guerreiro, S. M. (2009). *Anatomia vegetal* (3ª ed.). Editora UFV.

A. Bikoro Bi Athomo, S.P. Engozogho Anris, R. Safou-Tchiama, F.J. Santiago-Medina, T. Cabaret, A. Pizzi, B. Charrier,Chemical composition of African mahogany (K. ivorensis A. Chev) extractive and tannin structures of the bark by MALDI-TOF,Industrial Crops and Products,Volume 113,2018,Pages 167-178, https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2018.01.013.

Boher, Pau & Soler, Marçal & Sánchez, Anna & Hoede, Claire & Noirot, Céline & Paiva, Jorge & Serra, Olga & Figueras, Mercè. (2018). A comparative transcriptomic approach to understanding the formation of cork. Plant Molecular Biology. 96. 10.1007/s11103-017-0682-9.

Caccianiga, M., Compostella, C., Caccia, G., & Cattaneo, C. (2021). Contribution of plant anatomy to forensic investigation: Tree bark morphology. *Forensic Science International, 318*, 110598. https://doi.org/10.1016/j.forsciint.2020.110598

Carmo, Jair F.;Miranda, Isabel; quilhó, Teresa;Carvalho, Alexandre M.; Carmo, Fábio H. D. J.; Latorraca, João V. F.; Pereira, Helena. Bark characterisation of the Brazilian hardwood *Goupia*

glabra in terms of its valorisation. *BioResources*, v. 11, n. 2, p. 4794–4807, 2016. DOI: 10.15376/biores.11.2.4794-4807.

Evert, R. F. (2006). *Esau's plant anatomy: Meristems, cells, and tissues of the plant body: Their structure, function, and development* (3rd ed.). John Wiley & Sons.

Lestari, Andi Sri Rahayu Diza;Hadi, Yusuf Sudo;Hermawan, Dede; Santoso, Adi. Glulam properties of fast-growing species using mahogany tannin adhesive. *BioResources*, v. 10, n. 4, p. 7419–7433, 2015. DOI: 10.15376/biores.10.4.7419-7433.

Quilhó, T., & Pereira, H. (2001). Within- and between-tree variation of bark content and wood density of *Eucalyptus globulus* in commercial plantations. *IAWA Journal*, *22*(3), 255–265.

Ramalho, Fernanda Maria Guedes; pimenta, Emanuella Mesquita; goulart, Caio Palmeira; almeida, Maria Naruna Félix de; vidaurre, Graziela Baptista; hein, Paulo Ricardo Gherardi. *Effect of stand density on longitudinal variation of wood and bark growth in fast-growing Eucalyptus plantations*. *iForest – Biogeosciences and Forestry*, v. 12, n. 6, p. 527–532, 2019. DOI: 10.3832/ifor3082-012.

Roth, I. (1981). *Structural patterns of tropical barks* (Handbuch der Pflanzenanatomie, Vol. IX, Part 3). Gebrüder Borntraeger.

Shtein, I., Gričar, J., Lev-Yadun, S., Oskolski, A., Pace, M. R., Rosell, J. A., & Crivellaro, A. (2023). Priorities for bark anatomical research: Study venues and open questions. *Plants*, *12*(10), 1985. https://doi.org/10.3390/plants12101985

Vergílio, P. C. B., & Marcati, C. R. (2017). Adaptive and diagnostic significance of the bark of *Stryphnodendron polyphyllum* (Leguminosae) from the Cerrado. *Australian Journal of Botany*, *65*(2), 157–171. https://doi.org/10.1071/BT16212

Souza, L. V., Santos, L. J. dos, Ferreira, L. P., Araujo, E. da S., Lorenço, M. S., Vieira, S. B., Sales, A., Siviero, M. A., Rosario, B. B., Mota, G. da S., Mori, F. A., & Melo, L. E. de L. (2025). *Potential of the stem bark of Bagassa guianensis* Aubl. *from sustainable forest management in the Brazilian Amazon as a raw material for biorefineries*. Elsevier, 227(2025). https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2025.120754

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Caracterização química do pergaminho de café visando sua conversão em bioprodutos

Clareana Cavalcanti Alexandre[1]; Marcela Ribeiro Coura[1]; Iara Fontes Demuner[1]; Priscila Moreira da Silva Xavier[1]; Rodrigo Fraga de Almeida[1]; Jamille Carvalho de Souza[1]; Ana Márcia Macedo Ladeira Carvalho[1]; Antonio Jacinto Demuner[1]

[1] Universidade Federal de Viçosa – UFV

Resumo: O pergaminho de café é um resíduo lignocelulósico gerado em grandes quantidades pela cadeia produtiva do café. Este trabalho teve como objetivo realizar a caracterização química do pergaminho de café visando avaliar seu potencial para a conversão em bioprodutos. Foram determinadas a composição química (extrativos, cinzas, açúcares, lignina, ácidos urônicos e acetil), e caracterização por pirólise acoplada à cromatografia gasosa e espectrometria de massas (Py-GC-MS). Os resultados indicaram elevada proporção de carboidratos, com 36,8% de glicanas e 20,6% de xilanas, além de 25,9% de lignina total e baixo teor de cinzas (0,865%). A relação siringil/guaiacil (S/G) de 0,78 evidenciou predominância de unidades guaiacílicas,. De modo geral, o pergaminho apresentou características que evidenciam seu potencial como matéria-prima para a produção de bioprodutos, como a produção de polpa celulósica e para o aproveitamento em processos de biorrefinaria.

Palavras-chave: Pergaminho de café; Biomassa Lignocelulósica; Biorrefinaria.

Chemical characterization of coffee parchment aimed at its conversion into bioproducts

Abstract: Coffee parchment is a lignocellulosic residue generated in large quantities by the coffee production chain. This study aimed to perform the chemical characterization of coffee parchment to evaluate its potential for conversion into bioproducts. The chemical composition (extractives, ash, sugars, lignin, uronic acids, and acetyl groups) was determined, and pyrolysis coupled with gas chromatography–mass spectrometry (Py-GC-MS) was used for structural characterization. The results showed a high carbohydrate content, with 36.8% glucans and 20.6% xylans, in addition to 25.9% total lignin and a low ash content (0.865%). The syringyl-to-guaiacyl (S/G) ratio of 0.78 indicated a predominance of guaiacyl units in the lignin structure. Overall, coffee parchment exhibited characteristics that highlight its potential as a promising feedstock for the production of bioproducts, particularly for cellulose pulp production and its utilization in biorefinery processes.

Keywords: Coffee parchment; Lignocellulosic biomass; Biorefinery.

1. Introdução

A cafeicultura, cuja produção possui grande relevância econômica para o Brasil, é uma das principais atividades do agronegócio nacional e contribui significativamente para o desenvolvimento econômico e geração de empregos diretos e indiretos (Ferreira *et al.*, 2021). A produção brasileira foi estimada em aproximadamente 55 a 58 milhões de sacas de café, sendo o Brasil o maior exportador mundial, exportando 47,3 milhões de sacas de 60kg (CONAB, 2025). Além da quantidade expressiva de grãos, essa cadeia produtiva gera grandes volumes de resíduos durante as etapas de processamento, os quais representam uma fonte importante de biomassa lignocelulósica.

O processamento industrial do fruto do café pode ser realizado por via seca ou úmida, gerando diferentes resíduos, como casca, polpa, pergaminho, película prateada e águas residuais (Martinez *et al*., 2021; Lopes *et al.*, 2022). Entre esses materiais, o pergaminho merece destaque devido a sua abundância e a sua composição lignocelulósica. Esse resíduo corresponde a aproximadamente 3,8 % do peso do fruto fresco, e 16 – 32 % do grão seco, estima-se que é gerado 1,8 milhões de toneladas de pergaminho aproximadamente, sendo composto por celulose (40-49 %), hemiceluloses (25-32 %), lignina (22-35 %) e minerais (0,5-1 %), entre outros (Brum, 2007). Sua elevada fração celulósica evidencia seu potencial como matéria-prima alternativa para a produção de polpa celulósica, enquanto os demais componentes podem ser valorizados em processos de biorrefinaria, contribuindo para o aproveitamento total da biomassa e para o desenvolvimento de processos mais sustentáveis.

Apesar desse potencial, a viabilidade de sua utilização para a produção de polpa celulósica e para outras aplicações depende do conhecimento de sua composição físico-química e das características estruturais da lignina, que influenciam diretamente o rendimento dos processos de conversão e a qualidade dos produtos obtidos.

A determinação da composição química permite quantificar os principais constituintes da biomassa, como celulose, hemiceluloses, lignina, extrativos e cinzas, fornecendo informações essenciais para avaliar sua aptidão para a produção de polpa celulósica e outros bioprodutos. Complementarmente, a análise por pirólise acoplada à cromatografia gasosa e espectrometria de massas (Py-GC-MS) possibilita a identificação dos compostos voláteis formados durante a degradação térmica da biomassa, permitindo inferir a composição estrutural da lignina e o potencial de aproveitamento dos diferentes constituintes em processos de conversão termoquímica e de biorrefinaria

Diante desse contexto, este trabalho teve como objetivo realizar a caracterização físico-química do pergaminho de café por meio da determinação de sua composição química, análise elementar, densidade (básica e aparente) e caracterização por pirólise acoplada à cromatografia gasosa e espectrometria de massas (Py-GC-MS), visando avaliar seu potencial como biomassa lignocelulósica para a produção de polpa celulósica e outras aplicações em biorrefinarias.

353. 2. Materiais e métodos

a. 2.1 Coleta e preparo da amostra

Foram utilizados resíduos de café (pergaminho) provenientes de Santa Teresa, ES, Brasil. Os resíduos foram moídos em um moinho de facas do tipo Wiley® e classificados de acordo com a norma TAPPI T257cm-85. Selecionou-se a fração que passou pela peneira de 40 *mesh* e ficou retida na peneira de 60 *mesh*. A biomassa peneirada foi seca ao ar em uma sala de condicionamento (23,0 ± 1,0 °C e 50,0 ± 2,0% de umidade) para uniformização da umidade e armazenada em sacos de polietileno.

b. 2.2 Composição química da biomassa

Para a caracterização da composição química do pergaminho, determinaram-se na serragem o teor de extrativos totais, , o teor de cinzas, , de acordo com as normas TAPPI T 264 cm-97, e TAPPI T211 om-02, respectivamente. Os teores de ácidos urônicos, grupos acetil e açúcares (glicana, manana, galactana, xilana e arabinana) foram determinados de acordo com Lin (1992) e a norma SCAN-CM 71:09, respectivamente. A lignina total foi determinada pela soma da lignina solúvel em ácido (TAPPI UM250) e da lignina insolúvel em ácido (TAPPI T222om-02). A razão siringila/guaiacila da lignina (razão S/G) foi determinada por oxidação com nitrobenzeno [29] (Lin, 1992).

c. 2.4 Pirólise rápida por sistema Py-GC-MS

A serragem proveniente de café em pergaminho (cerca de 0,1 mg) foi submetida à pirólise rápida em um sistema Py-GC-MS, utilizando um pirolisador de microforno (Frontier Laboratories Ltd., Fukushima, Japão) acoplado a um sistema GC-MS (Shimadzu, modelo QP2020). A pirólise foi realizada a uma temperatura de 550 °C, com a interface a 290 °C. Os parâmetros operacionais do GC foram: temperatura do injetor (280 °C); coluna capilar Ultra-

ALLOY® (UA5, 30 m x 0,25 mm de diâmetro interno, 0,25 µm de espessura do filme); temperatura inicial do forno (45 °C por 4 min), com aquecimento a 4 °C/min até 240 °C e manutenção por 10 min; e gás de arraste hélio (1 mL/min) em modo *splitless* com razão de 20:1. O espectrômetro de massas operou no modo de ionização por impacto de elétrons a 70 eV, com uma faixa de massa de 50 a 350. O experimento foi realizado em duplicata, e os 60 picos de maior área foram analisados.

354. 3. Resultados e Discussão

355. 3.1 Caracterização do pergaminho do café

O pergaminho apresentou 36,8% de glicanas e 20,6% de xilanas, evidenciando elevada proporção de carboidratos estruturais (Tabela 1). O teor de glicanas está relacionado a quantidade de celulose e foi inferior ao observado para madeiras de eucalipto, entretanto, encontra-se dentro da faixa encontrada para outras biomassas lignocelulósicas, o que pode indicar potencial para a produção de polpa celulósica e outros bioprodutos derivados da celulose (Zanão *et al.*, 2019; XU *et al.*, 2020). Foi encontrado, elevado teor de xilanas, quando comparado ao relatado em madeiras de eucalipto (10,2%) e pinus (5,9%) (Zanão *et al*., 2019), esse valor pode contribuir significativamente para o rendimento da polpa e pode melhorar algumas propriedades, se o uso dessa polpa for para produção de papéis.

A biomassa apresentou 25,9% de lignina total, sendo 23,8% de lignina insolúvel e 2,1% de lignina solúvel. A lignina é um dos principais componentes responsáveis pela rigidez da parede celular vegetal e sua remoção constitui uma etapa fundamental no processo kraft, influenciando diretamente o consumo de reagentes químicos e a eficiência da deslignificação. Além de seu impacto na produção de polpa celulósica, a lignina tem despertado crescente interesse como matéria-prima renovável para biorrefinarias, devido ao seu potencial para obtenção de produtos químicos de alto valor agregado (Demuner *et al.*, 2019), como compostos aromáticos e biocombustíveis. Dessa forma, o teor de lignina encontrado no pergaminho reforça o potencial desse resíduo não apenas para a produção de polpa celulósica, mas também para o aproveitamento integral da biomassa em processos sustentáveis.

Tabela 1 – Caracterização do pergaminho de café

Parâmetros %		**Pergaminho de café**
Extrativos totais		4,5
Cinzas		0,865
Ácidos urônicos		4,3
Grupos acetil		4,4
Lignina insolúvel em ácido		23,8
Lignina solúvel em ácido		2,1
Lignina total		25,9
Relação S/G da lignina		0,78
Açúcares	Arabinanas	0,2
	Galactanas	0,5
	Glicanas	36,8
	Xilanas	20,6
	Mananas	0,4

Fonte: Elaborada pelos Autores (2026)

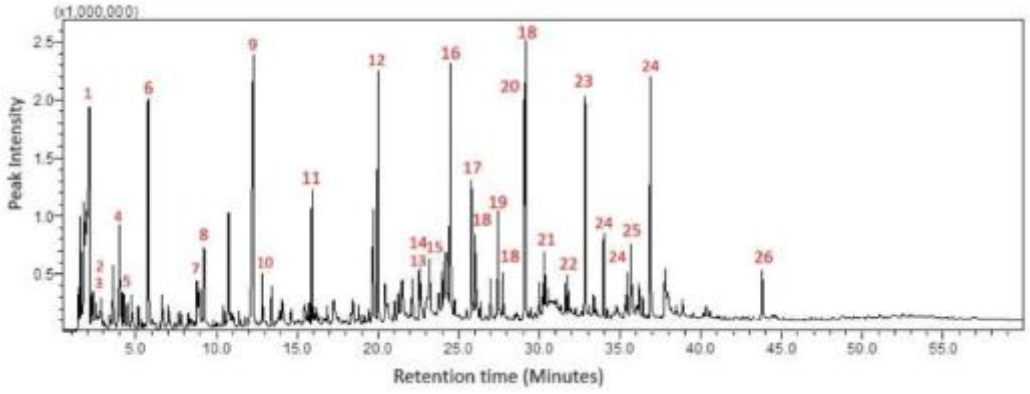
A relação S/G do pergaminho de café foi de 0,78, (Tabela 1) valor inferior ao observado para madeiras de eucalipto (2,50–3,12) e próximo ao comportamento típico de madeiras de coníferas, que apresentam predominância de unidades guaiacílicas (Zanão *et al.*, 2018). A relação S/G é um importante parâmetro estrutural da lignina, influenciando a eficiência da deslignificação durante a produção de polpa celulósica. Ligninas com maior proporção de unidades siringílicas (alta relação S/G), como as do eucalipto, são mais reativas e apresentam maior facilidade de remoção no processo kraft, enquanto ligninas com predominância de unidades guaiacílicas (baixa relação S/G), como a do pergaminho de café, possuem maior quantidade de ligações carbono-carbono (C–C), tornando a deslignificação potencialmente mais difícil (Sjöström, 1993; Sequeiros; Labidi, 2017). Dessa forma, embora o pergaminho apresente potencial como biomassa lignocelulósica, sua baixa relação S/G pode representar uma limitação para processos cujo objetivo seja a obtenção de polpa celulósica, podendo ser utilizado para conversão termoquímica e geração de biochar.

O teor de cinzas do pergaminho foi de 0,865%, valor superior ao observado para madeiras de eucalipto (0,10–0,24%) e inferior comparado a ao encontrado em outros diversos resíduos agrícolas (Gomes, 2013; Quaak *et al*, 1999). Assim, o teor de cinzas observado no pergaminho constitui uma característica favorável para sua utilização na produção de polpa celulósica e em outros processos industriais.

Foram obtidos 4,5% de extrativos, valor semelhante ao observado para a madeira de eucalipto (3,9%), indicando uma composição semelhante à de matérias-primas utilizadas na produção de celulose. Os ácidos urônicos corresponderam a 4,3%, valor superior ao observado para o pinus (2,7%) e dentro do intervalo encontrado para o eucalipto (3,5–5,0%), enquanto os grupos acetila representaram 4,4%, valor superior ao encontrado em materiais de origem madeireira. Os valores de ácidos urônicos e grupos acetila estão de acordo com o elevado conteúdo de xilana do pergaminho (20,6%), uma vez que estão associados estruturalmente às hemiceluloses. Embora os extrativos sejam semelhantes aos encontrados no eucalipto, esses componentes e os grupos acetila podem aumentar o consumo de reagentes durante a polpação, afetando o rendimento do processo.

A Figura 1 apresentada mostra os compostos que foram identificados pela comparação de seus espectros de massa com a biblioteca espectral de GC-MS (Wiley e NIST) e com dados da literatura

Figura 1 – Pirograma de pergaminho de café



A partir da análise por Py-GC-MS, foram identificados 26 compostos provenientes da degradação térmica dos componentes lignocelulósicos do pergaminho. Dentre os produtos, destacaram-se o ácido acético (7,01%), o furfural (4,20%) e a 1,2-ciclopentanodiona (2,19%), compostos derivados dos carboidratos e obtidos a partir da degradação da celulose e das hemiceluloses durante a pirólise (Tabela 2). A formação de furfural está associada principalmente à decomposição de pentoses, sendo consistente com o elevado teor de xilana (20,6%) observado no pergaminho. Também foram identificados compostos fenólicos derivados da degradação da lignina, incluindo guaiacol, 4-metilguaiacol, 4-vinilguaiacol, vanilina, siringol e 4-propenilsiringol. Esses produtos evidenciam a formação de compostos

orgânicos de diferentes classes durante a pirólise e indicam o potencial das frações hemicelulósica e lignínica do pergaminho como fontes de produtos de maior valor agregado.

Tabela 2 – Resultados Py-GC-MS

Peak	Class	Compounds	Origen	Mass fragments	Area
1	Acids	Acetic Acid	C	60	07.01
26		Hexadecanoic acid	C	129/73/60	0.82
2	Aldehydes	2-Butenal	C	70/55	0.65
4		2-Methyl-2-butenal	C	84/69/55	0.54
3	Amines	N-Nitrosodimethylamine	-	74/55	0.48
6	Furans	Furfural	C	97/96/67/51	4.20
7		2(5H)Furanone	C	84/70/55	0.69
8	Ketones	1,2-Cyclopentanedione	C	98/69/55	2.19
10		3-Methyl-1,2-cyclopentanedione	C	113/112/83/69/55	0.81
9	Others	2,2-Diethyl-3-methyl-oxazolidine	-	114/58	09.02
5		3-Propoxy-1-propene	-	71/58	0.65
13	Aromatics	3-Methoxycathecol	Ca	140/125/97	0.87
14		3-Methylcathecol	Ca	124/106/78	0.66
11		Guaiacol	G	109/124/81/53	2.18
12		4-Methylguaiacol	G	138/123/95	4.31
16		4-Vinylguaiacol	G	150/135/107/77	4.21
15		4-Ethylguaiacol	G	137/152	0.96
18		4-Propenylguaiacol	G	164/77/149	6.96
19		Vanilin	G	151/152/109/81	1.92
21		4-Acetylguaiacol	G	166/151/123	01.07
22		Guaiacylacetone	G	137/180/122	0.68
17		Syringol	S	154/139/111/96	02.07
23		4-Vinylsyringol	S	180/165/137	3.71
20		4-Methylsyringol	S	168/153/125	3.77
25		Syringaldehyde	S	182/181/111	1.50
24		4-Propenylsyringol	S	194/91/151	06.04

Legenda: C: carbohydrate; Ca: catechol; G: guaiacil; S: syringyl.
Fonte: Elaborada pelos Autores (2026)

4. 4. Conclusões

A caracterização química do pergaminho de café demonstrou que essa biomassa apresenta composição predominantemente lignocelulósica e com potencial significativo para sua valorização como matéria-prima renovável, A biomassa apresentou 36,8% de glicanas 20,6%

de xilanas e 25,9% de lignina total, além do baixo teor de cinzas, correspondente a 0,865%. A elevada presença de carboidratos estruturais, que totalizam aproximadamente 57,4% quando consideradas as frações de glicanas e xilanas, evidencia o potencial do pergaminho para aplicações em em processos de conversão de biomassa.

Entretanto, a comparação com matérias primas tradicionalmente utilizadas na indústria evidencia que o pergaminho apresenta tanto vantagens quanto limitações. Em relação à madeira de pinus, destaca-se o maior teor de xilanas do pergaminho de 20,6% em comparação a 5,9% do pinus. Essa característica representa uma oportunidade para o aproveitamento da fração hemicelulósica na obtenção de produtos como xilose, xilitol, e furfural. Por outro lado, o teor de glicanas 36,8% foi inferior aos valores utilizados como referência, o que pode apresentar uma limitação quando o objetivo é exclusivamente a produção de celulose e polpa.

Outra característica relevante foi a relação siringila/guaiacila de 0,78, indicando predominâncias de unidades guaiacílicas na lignina do pergaminho. Essa característica aproxima estruturalmente sua lignina daquela encontrada para o pinus, porém pode apresentar uma maior resistência à deslignificação quando comparada a ligninas com maior produção de unidades siringílicas. Além disso, o pergaminho apresentou 4,4% de grupos acetila e 4,3% de ácidos urônicos, característica que pode aumentar o consumo de reagentes durante a polpação. Dessa forma, determinados aspectos que representam limitações para a produção de celulose podem exigir condições mais adequadas de processamento.

Por outro lado, essas mesmas características também indicam potencial para outras rotas de valorização. A análise por Py-GC-MS identificou diferentes compostos, destacando-se o ácido acético (7,01%) e o furfural (4,20%), a presença do ácido acético está relacionada principalmente a degradação de grupos acetilados presentes nos polissacarídeos, especialmente nas hemiceluloses, enquanto o furfural é um produto de interesse obtido principalmente da degradação térmica de açucares derivados de pentoses. Esses resultados demonstram que os constituintes estruturais do pergaminho podem originar moléculas químicas de interesse industrial.

Assim, os resultados obtidos indicam que o pergaminho de café não deve ser avaliado apenas como uma possível fonte alternativa de celulose. Embora, apresente limitações quando comparadas a matérias primas florestais convencionais para essa funcionalidade específica, sua composição química diversificada, com quantidades significativas de carboidratos e lignina, favorece uma abordagem integral da biomassa. Dessa forma, o maior potencial do pergaminho pode estar na utilização integrada de suas diferentes frações em processos de

biorrefinaria, permitindo a obtenção de açúcares, compostos furânicos, ácidos orgânicos, produtos aromáticos e materiais de base celulósica, contribuindo simultaneamente para a valorização de um resíduo agroindustrial e para o desenvolvimento de processos mais sustentáveis.

357. **5.**

Agradecimentos

Agradeço ao Laboratório de Papel e Celulose da Universidade Federal de Viçosa pela oportunidade de desenvolvimento deste trabalho e as agências de fomento (CAPES, FAPEMIG e CNPq) pela oferta de recursos.

6. Referências

Batalha, L. A. R., Colodette, J. L., Gomide, J. L., Barbosa, L. C. A., Maltha, C. R. A., & Gomes, F. J. B. (2012). Dissolving pulp production from bamboo. *BioResources, 7*, 640–651.

Brum, S. S. (2007). *Caracterização e modificação química de resíduos sólidos do beneficiamento do café para produção de novos materiais* (Dissertação de mestrado). Universidade Federal de Lavras.

Companhia Nacional de Abastecimento. (2025). *Acompanhamento da safra brasileira de café* (v. 12, Safra 2025, n. 4, 4º levantamento). Conab. https://www.gov.br/conab/pt-br/atuacao/informacoes-agropecuarias/safras/safra-de-cafe/4o-levantamento-de-cafe-safra-2025/boletim-cafe-dezembro-2025Demuner, I. F., Colodette, J. L., Demuner, A. J., & Jardim, C. M. (2019). Biorefinery review: Wide-reaching products through kraft lignin. *BioResources*, *14*(3), 7543–7581. https://doi.org/10.15376/biores.14.3.demuner

Ferreira, D. S., Sales, R. A., Amaral, J. F. T., Ferreira, J. M. S., Venancio, L. P., Ribeiro, W. R., Tomaz, M. A., Catem, D. S. B., Gonçalves, M. S., & Bravin, N. P. (2021). Biochemical and physiological changes in conilon coffee (*Coffea canephora*) grown under different levels of irradiance. *Australian Journal of Crop Science*, *15*(7), 1074–1080. https://doi.org/10.21475/ajcs.21.15.07.p3254

Gomes, F. J. B., Colodette, J. L., Burnet, A., Batalha, L. A. R., & Barbosa, B. M. (2013). Potential of elephant grass for pulp production. *BioResources*, *8*(3), 4359–4379. https://doi.org/10.15376/biores.8.3.4359-4379

Lopes, A. C. A., Andrade, R. P., Casagrande, M. R., Santiago, W. D., Resende, M. L. V., Cardoso, M. G., Vilanova, M., & Duarte, W. F. (2022). Production and characterization of a new distilled beverage from green coffee seed residue. *Food Chemistry*, *377*, 131960. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.131960

Queiros, A., & Labidi, J. (2017). Characterization and determination of the S/G ratio via Py-GC/MS of agricultural and industrial residues. *Industrial Crops and Products*, *97*, 469–476. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2016.12.056

Ramirez-Martinez, A., Salgado-Cervantes, M. A., Rodríguez-Jimenes, G. C., García-Alvarado, M. A., Cherblanc, F., & Benet, J. C. (2013). Water transport in parchment and endosperm of coffee bean. *Journal of Food Engineering*, *114*, 375–383.

Xu, L., Zhang, S. J., Zhong, C., Li, B. Z., & Yuan, Y. J. (2020). Alkali-based pretreatment-facilitated lignin valorization: A review. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, *59*, 16923–16938. https://dx.doi.org/10.1021/acs.iecr.0c01456

Zanão, M., Colodette, J. L., Oliveira, R. C., Almeida, D. P., Gomes, F. J. B., & Carvalho, D. M. (2019). Evaluation of Kraft-PS cooking for eucalypt and pine wood chip mixtures. *Journal of Wood Chemistry and Technology*, *39*, 149–165. https://doi.org/10.1080/02773813.2018.1533979

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Caracterização química e textural de biocarvão de resíduo lignocelulósico de café para tratamento de efluentes

Iara Nobre Carmona[1]; Gabriela Aguiar Amorim[2]; Kamilla Crysllayne Alves da Silva[2]; Paulo Renato Souza de Oliveira[1]; Allana Katiussya Silva Pereira[3]; Alina M. Balu[4]; Enrique Rodríguez Castellón[5]; Ananias Francisco Dias Júnior[1]

[1] Universidade Federal do Espírito Santo – LEB/UFES – Brasil
[2] Universidade de São Paulo – ESALQ/USP – Brasil
[3] Universidade Federal do Recôncavo da Bahia – CCAAB/UFRB – Brasil
[4] *Universidad de Córdoba* – Nanoval/UCO – Espanha
[5] *Universidad de Málaga* – SACAI/UMA – Espanha

Resumo: O Brasil é o maior produtor mundial de café, gerando anualmente expressivo volume de biomassa residual. Nesse contexto, os resíduos lenhosos da cafeicultura brasileira constituem matéria-prima abundante, porém pouco explorada, para produção de biocarvão, um adsorvente promissor no tratamento de efluentes contaminados. Este estudo caracterizou a composição química superficial, por XPS, e as propriedades texturais, utilizando isotermas de CO_2 e modelo de Dubinin-Radushkevich, de biocarvões de poda de *Coffea arabica* pirolisados a 300, 500 e 700 °C. O teor de carbono aumentou e o de oxigênio diminuiu entre 300 e 500 °C, com leve inversão a 700 °C, associada à concentração de potássio e cálcio superficiais. A área superficial cresceu de 190,6 para 414,0 m²/g, e o volume de microporos dobrou (0,0883 a 0,1918 cm³/g) entre 300 e 700 °C. A pirólise influenciou fortemente a química e a porosidade dos biocarvões, sendo o material a 700 °C o de maior potencial adsortivo para tratamento de efluentes.

Palavras-chave: Pirólise; Microporosidade; *Coffea arabica*.

Chemical and textural characterization of biochar from coffee lignocellulosic residue for wastewater treatment

Abstract: Brazil is the world's largest coffee producer, generating a significant volume of residual biomass annually. In this context, woody residues from Brazilian coffee farming represent an abundant yet underexplored feedstock for biochar production, a promising adsorbent for the treatment of contaminated effluents. This study characterized the surface chemical composition, by XPS, and the textural properties, using CO_2 adsorption isotherms and the Dubinin-Radushkevich model, of biochars from *Coffea arabica* pruning residues pyrolyzed at 300, 500, and 700 °C. Carbon content increased and oxygen content decreased between 300 and 500 °C, with a slight reversal at 700 °C associated with the surface concentration of potassium and calcium. Surface area increased from 190.6 to 414.0 m²/g, and micropore volume doubled (0.0883 to 0.1918 cm³/g) between 300 and 700 °C. Pyrolysis strongly influenced the chemistry and porosity of the biochars, with the material produced at 700 °C showing the greatest adsorptive potential for effluent treatment.

Keywords: Pyrolysis; Microporosity; *Coffea arabica*.

1. Introdução

O biocarvão é um dos adsorventes mais promissores derivados de resíduos lignocelulósicos, devido a sua elevada área superficial, porosidade e grupos funcionais ativos, com propriedades fortemente influenciadas pelas condições de pirólise e pelo tipo de biomassa utilizada (Li et al. 2017). Entre as aplicações mais relevantes desse material está o tratamento de águas contaminadas, visto que os recursos hídricos mundiais vêm sendo deteriorados pela descarga contínua de contaminantes orgânicos e inorgânicos – como corantes, metais pesados, surfactantes, fármacos e pesticidas, entre outros –, provenientes de indústrias e municípios (Zulfiqar et al., 2019; Bogusz et al., 2015; Sadat et al., 2019), o que reforça a meta da ONU de garantir água e saneamento sustentáveis para todos até 2030 (Martin, 2020).

Nesse contexto, a adsorção destaca-se como técnica de tratamento eficaz, econômica e de fácil aplicação (Rashid et al., 2021). Entre as matérias-primas lignocelulósicas com potencial para essa finalidade, destacam-se os resíduos de poda da cafeicultura, com o Brasil liderando o ranking mundial de produção de café (CONAB, 2024). Estima-se que a poda gere, em média, 1 tonelada de biomassa por hectare ao ano em sistemas de monocultura a pleno sol, podendo esse valor ser de 4 a 5 vezes maior em sistemas sombreados ou de policultura (Draper, 2018), configurando um expressivo volume de resíduo lenhoso cujo elevado teor de carbono e estrutura lignocelulósica estável favorecem sua valorização. Apesar desse potencial, o aproveitamento da madeira de poda do cafeeiro para a produção de biocarvão ainda é pouco explorado na literatura, com mais trabalhos voltados para a casca e pergaminho do café (Protásio et al., 2012, 2013a).

A composição química e a funcionalização da superfície do biocarvão, incluindo óxidos metálicos, carbonatos, sulfatos e fosfatos, desempenham papel central nos mecanismos de remoção de contaminantes, por meio de interações eletrostáticas, complexação e forças π–π (Laishram et al., 2025), podendo ser investigadas por espectroscopia de fotoelétrons de raios X (XPS). Essas características são fortemente moduladas pela temperatura de pirólise, cujas temperaturas mais baixas (250–500 °C) favorecem grupos funcionais oxigenados, enquanto temperaturas mais altas (≥ 500 °C) aumentam o teor de carbono, a área superficial e a cristalinidade (Xiao et al. 2014; Tomczyk et al. 2020).

Neste contexto, este estudo tem como objetivo caracterizar a composição química superficial, por espectroscopia de fotoelétrons de raios X (XPS), e as propriedades texturais, por isotermas de adsorção de CO_2 e pelo modelo de Dubinin-Radushkevich, de biocarvões produzidos a partir de resíduos de poda de *Coffea arabica* pirolisados a 300, 500 e 700 °C. Busca-se compreender como a temperatura de pirólise influencia a composição elementar da

superfície e parâmetros texturais, como a área superficial equivalente, volume de microporos e energia característica, fornecendo subsídios para discutir o potencial desses materiais como adsorventes sustentáveis no tratamento de efluentes contaminados.

2. Material e métodos

A madeira residual proveniente de podas de *Coffea arabica* L. foi coletada junto a uma cooperativa localizada no município de Brejetuba, Espírito Santo (ES), importante região produtora de café no estado. Esse material foi submetido a três temperaturas finais diferentes: 300, 500 e 700 °C. Os três tratamentos tiveram uma taxa de aquecimento de 10 °C/min, em um sistema forno-mufla sob condições controladas de presença de oxigênio, com tempo de residência na temperatura final de 60 min (Figura 1).

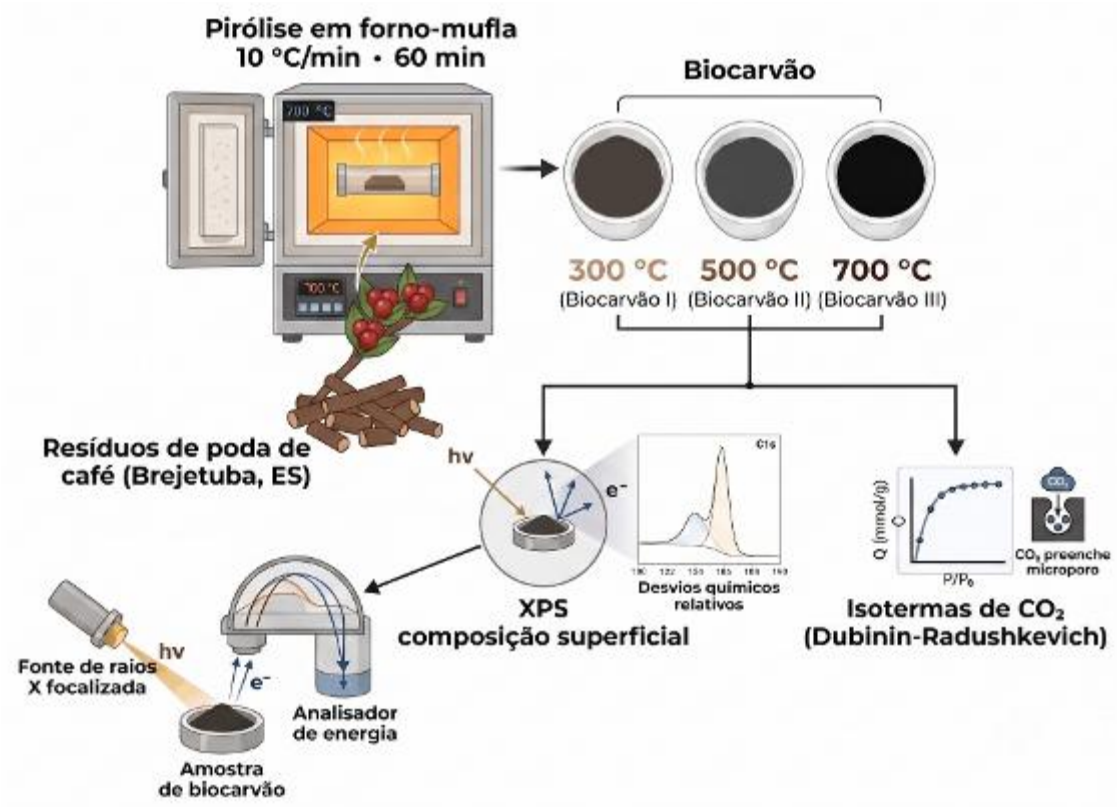


Figura 1 – Esquema metodológico da produção e caracterização dos biocarvões produzidos a partir de resíduos de poda de *Coffea arabica* pirolisados a 300, 500 e 700 °C.

As análises químicas e texturais foram realizadas nos laboratórios dos *Servicios Centrales de Apoyo a la Investigación* (SCAI) da *Universidad de Málaga*, Espanha. A análise da superfície dos biocarvões de 300, 500 e 700 °C, provenientes de resíduos da poda do café, foi realizada por espectroscopia de fotoelétrons de raios X (XPS). As medições foram conduzidas utilizando um espectrômetro Physical Electronics, PHI 5700 (Chanhassen, Minnesota, Estados Unidos), equipado com radiação Mg Kα não monocromática (1253,6 eV) e um detector

multicanal. Antes da análise, as amostras foram submetidas à desgaseificação a 10^{-6} Pa por 12 h. Cada espectro foi obtido no modo de energia de passagem constante a 29,35 eV, com uma área de análise de 720 µm de diâmetro. A referência de carga foi realizada em relação ao carbono adventício (C 1s *a* 284,8 eV). A aquisição e análise dos dados foram realizadas utilizando o pacote de software PHI ACCESS ESCA-V6.0F.

A análise textural dos biocarvões foi realizada por meio de isotermas de adsorção de CO_2 a 273 K. As medições foram realizadas em um analisador de área superficial e porosidade Micromeritics 3Flex, versão 6.03, configurado com um intervalo de equilibração de 20 s e dose de baixa pressão de 4,0000 cm^3/g STP. Os dados experimentais de cada material foram tratados matematicamente aplicando a equação de Dubinin-Radushkevich nas respectivas faixas de pressão relativa, o que permitiu determinar individualmente parâmetros como a área superficial equivalente, o volume limite de microporos e a energia característica.

3. Resultados e discussão

A composição química superficial dos biocarvões produzidos a 300, 500 e 700 °C, determinada por XPS, é apresentada na Figura 2. Os espectros de varredura evidenciam a presença predominante de carbono (C 1s) e oxigênio (O 1s), além de sinais característicos de nitrogênio (N 1s), cálcio (Ca 2p), enxofre (S 2p) e, no biocarvão produzido a 700 °C, potássio (K 2p).

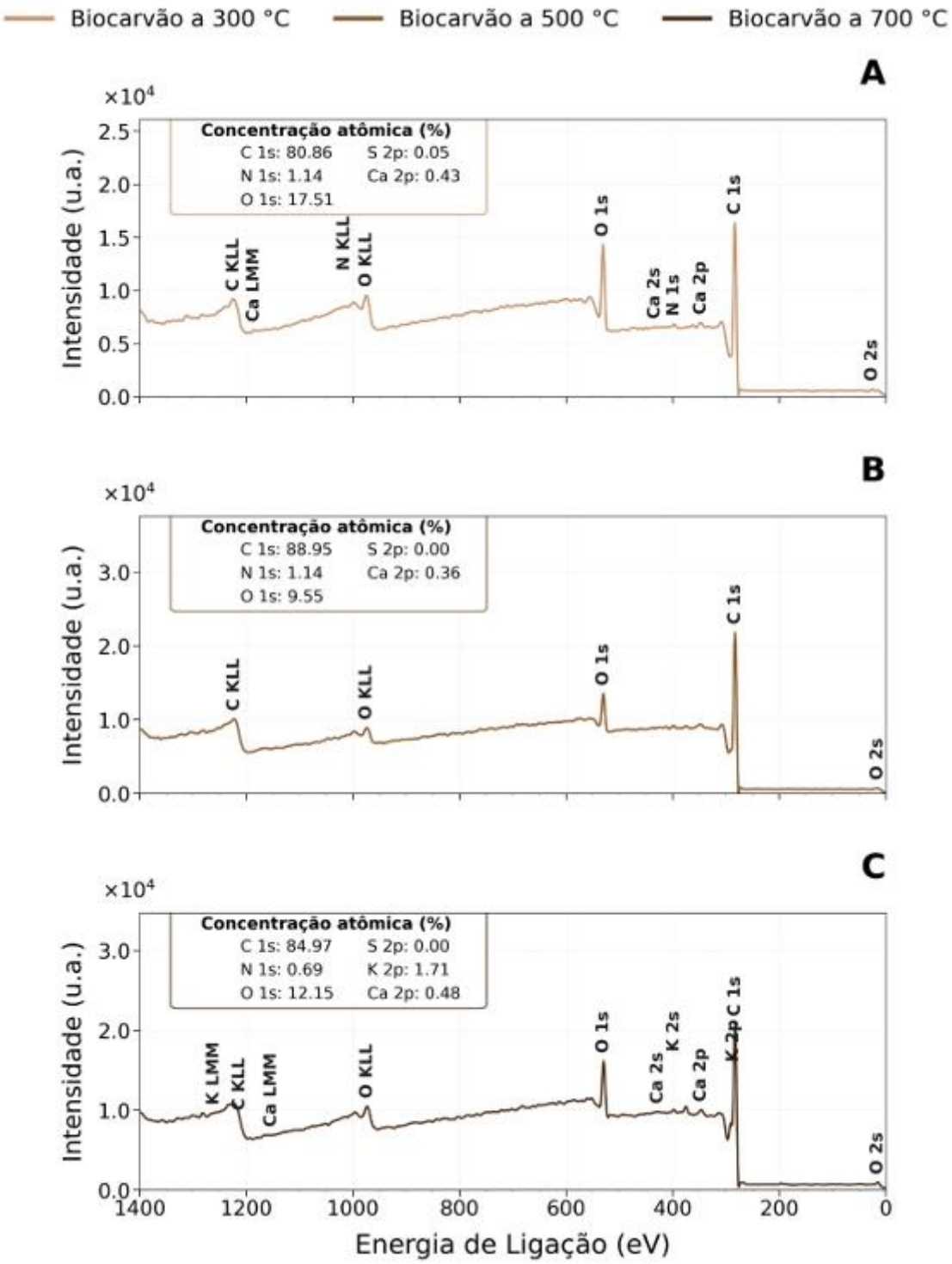


Figura 2 – Espectros de varredura por XPS dos biocarvões produzidos a partir de resíduos de poda de *Coffea arabica* pirolisados a (A) 300 °C, (B) 500 °C e (C) 700 °C, com as respectivas concentrações atômicas superficiais (%).

O teor de carbono superficial aumentou de 80,86% (300 °C) para 88,95% (500 °C), acompanhado por redução no teor de oxigênio, de 17,51% para 9,55%, no mesmo intervalo de temperatura. Esse comportamento é consistente com a degradação térmica progressiva de

grupos funcionais oxigenados (hidroxilas, carboxilas e carbonilas) e com o avanço dos processos de carbonização e aromatização da estrutura lignocelulósica, conforme relatado por Xiao et al. (2014) e Tomczyk et al. (2020) para biocarvões produzidos em faixas de temperatura semelhantes.

Entre 500 e 700 °C, entretanto, observou-se leve inversão dessa tendência, com redução do carbono superficial para 84,97% e aumento do oxigênio para 12,15%, além do surgimento de potássio (1,71%) e discreto aumento no teor de cálcio (de 0,36% para 0,48%). Esse padrão pode estar associado ao efeito de concentração de cinzas: à medida que a matéria orgânica volátil é progressivamente eliminada em temperaturas mais elevadas, os constituintes inorgânicos (óxidos, carbonatos e outros minerais) tornam-se proporcionalmente mais expostos na superfície do material, fenômeno também reportado por Tomczyk et al. (2020) em biocarvões pirolisados acima de 500 °C. O nitrogênio manteve-se estável entre 300 e 500 °C (1,14%) e diminuiu para 0,69% a 700 °C, refletindo a volatilização de compostos nitrogenados em temperaturas mais elevadas, enquanto o enxofre, presente apenas no biocarvão de 300 °C (0,05%), não foi detectado nas amostras produzidas em temperaturas superiores.

As isotermas de adsorção de CO_2 a 273 K (Figura 3) mostraram aumento progressivo da quantidade adsorvida com o incremento da temperatura de pirólise em toda a faixa de pressão relativa avaliada (0 a 0,03 P/P_0), com o biocarvão produzido a 700 °C apresentando a maior capacidade de adsorção, seguido pelos biocarvões de 500 e 300 °C. Esse comportamento indica o desenvolvimento progressivo de microporosidade com o aumento da temperatura de pirólise, resultante do maior grau de degradação da estrutura lignocelulósica e da liberação de compostos voláteis, que geram novos espaços porosos na matriz carbonácea (Tomczyk et al., 2020).

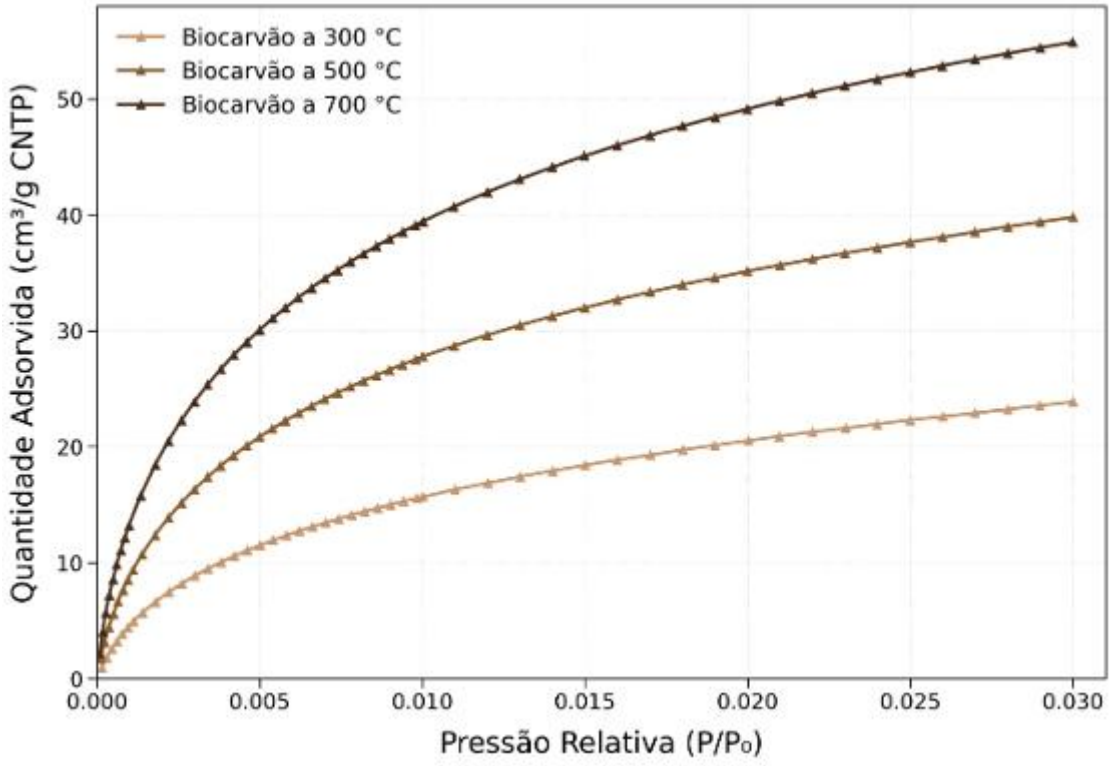


Figura 3 – Isotermas de adsorção de CO_2 a 273 K dos biocarvões produzidos a 300, 500 e 700 °C.

O tratamento dos dados das isotermas pelo modelo de Dubinin-Radushkevich (Figura 4) confirmou esse padrão: a área superficial equivalente aumentou de 190,6 m²/g (300 °C) para 308,5 m²/g (500 °C) e 414,0 m²/g (700 °C), enquanto o volume de microporos praticamente dobrou entre 300 °C (0,0883 cm³/g) e 700 °C (0,1918 cm³/g), passando por um valor intermediário de 0,1429 cm³/g a 500 °C.

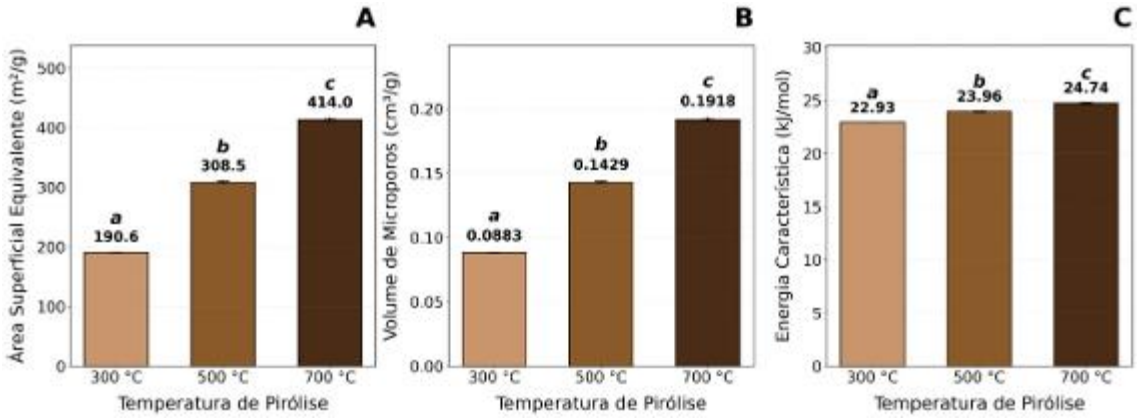


Figura 4 – Parâmetros texturais obtidos pelo modelo de Dubinin-Radushkevich para os biocarvões produzidos a 300, 500 e 700 °C: (A) área superficial equivalente, (B) volume de microporos e (C) energia característica. Barras de erro representam o intervalo de confiança de 95% propagado do erro-padrão do ajuste de Dubinin-Radushkevich; letras distintas (a, b, c) indicam ausência de sobreposição desses intervalos entre os biocarvões, não substituindo um teste de Tukey com réplicas reais.

A ausência de sobreposição entre os intervalos de confiança de 95% dos três tratamentos indica que essas diferenças se mantêm consistentes ao longo de toda a faixa avaliada. A energia característica também aumentou de forma discreta com a temperatura (22,93; 23,96; e 24,74 kJ/mol, respectivamente), sugerindo leve intensificação das forças de interação adsorvente-adsorvato à medida que a microporosidade se torna mais desenvolvida.

Em conjunto, os resultados de XPS e das isotermas de CO_2 sugerem que a perda progressiva de compostos voláteis ao longo da pirólise é o fator comum por trás das duas tendências observadas: por um lado, concentra os constituintes inorgânicos na superfície do material, sobretudo acima de 500 °C; por outro, abre novos espaços microporosos na matriz carbonácea, ampliando a área superficial disponível. Essa covariação entre composição química e estrutura textural explica por que o biocarvão produzido a 700 °C reúne, simultaneamente, a maior concentração de minerais superficiais e o maior desenvolvimento de microporosidade entre os três tratamentos avaliados. Esses resultados respondem diretamente à lacuna apontada por revisões bibliométricas recentes sobre biocarvão em tecnologias de tratamento de água, que identificam tanto a sub-representação de regiões tropicais quanto a necessidade de diversificação de matérias-primas regionais, como os resíduos da cafeicultura (Carmona et al., 2026).

4. Conclusões

A pirólise de resíduos de poda de *Coffea arabica* em diferentes temperaturas (300, 500 e 700 °C) resultou em biocarvões com composições químicas superficiais e propriedades texturais distintas. A análise por XPS revelou aumento do teor de carbono e redução do teor de oxigênio entre 300 e 500 °C, associados à degradação de grupos funcionais oxigenados e ao avanço da carbonização, enquanto a elevação para 700 °C promoveu leve inversão nessa tendência, atribuída à concentração superficial de minerais como potássio e cálcio. As isotermas de adsorção de CO_2 e o modelo de Dubinin-Radushkevich confirmaram o desenvolvimento progressivo da microporosidade com a temperatura, evidenciado pelo crescimento da área superficial equivalente (de 190,6 para 414,0 m^2/g) e do volume de microporos (de 0,0883 para 0,1918 cm^3/g) entre 300 e 700 °C.

Esses resultados indicam que a temperatura de pirólise é um parâmetro determinante tanto na química superficial quanto na estrutura porosa dos biocarvões, sendo o material obtido a 700 °C o que reúne as características mais favoráveis – maior área superficial, maior volume de microporos e maior teor de minerais superficiais – para atuar como adsorvente. Conclui-se,

portanto, que os resíduos de poda da cafeicultura constituem matéria-prima promissora para a produção de biocarvões funcionais, reforçando seu potencial de aplicação no tratamento de efluentes contaminados, ainda que estudos futuros com ensaios de adsorção de contaminantes específicos sejam necessários para validar experimentalmente esse potencial.

5. Agradecimentos

Os autores agradecem ao Laboratório de Energia da Biomassa (LEB/UFES), pelo apoio ao desenvolvimento desta pesquisa; ao grupo Nanoval, da *Universidad de Córdoba*, Espanha, pela acolhida durante o período de pós-doutorado no exterior; e ao SCAI, da *Universidad de Málaga*, Espanha, pela infraestrutura disponibilizada para a realização das análises de caracterização. Este estudo foi apoiado pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq – Bolsa de Desenvolvimento Científico e Regional FAPES/CNPq 06/2024; Chamada Universal 18/2021; Bolsas no Exterior 14/2023; Bolsa de Produtividade em Desenvolvimento Tecnológico e Extensão Inovadora 08/2022; Apoio a Projetos Internacionais de Pesquisa Científica, Tecnológica e de Inovação 14/2023 e 16/2024; Conhecimento Brasil–Rede de Colaboração 22/2024) e a Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação do Espírito Santo (FAPES – Programa de Desenvolvimento Científico e Tecnológico Regional – PDCTR 06/2024; Chamada Universal 28/2022; Extensão Tecnológica 09/2024). Apoio adicional foi fornecido pela Sociedade de Amparo ao Desenvolvimento Tecnológico e Cultural (Sadtec, Brasil).

6. Referências bibliográficas

Bogusz, A., Oleszczuk, P., & Dobrowolski, R. (2015). Application of laboratory prepared and commercially available biochars to adsorption of cadmium, copper and zinc ions from water. *Bioresource Technology, 196*, 540–549.

Carmona, I. N., de Carvalho, F. A. N., Manjate, M. J., da Silva, K. C. A., Pereira, A. K. S., & Dias Júnior, A. F. (2026). A bibliometric analysis of biochar-enhanced constructed wetlands for wastewater treatment: Current trends, research gaps, and future directions. *Next Research, 3*, Article 101190. https://doi.org/10.1016/j.nexres.2025.101190

Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB). (2024). *Acompanhamento da safra brasileira: Café, safra 2024, 1º levantamento* (Vol. 11, No. 2). https://www.conab.gov.br/infoagro/safras/cafe

Draper, K. (2018). *The potential for biochar to improve sustainability in coffee cultivation and processing: A white paper*. Ithaka Institute for Carbon Intelligence; International Biochar Initiative.

Laishram, D., Kim, S.-B., Lee, S.-Y., & Park, S.-J. (2025). Advancements in biochar as a sustainable adsorbent for water pollution mitigation. *Advanced Science*, *12*(19), Article 2410383.

Li, H., Dong, X., da Silva, E. B., de Oliveira, L. M., Chen, Y., & Ma, L. Q. (2017). Mechanisms of metal sorption by biochars: Biochar characteristics and modifications. *Chemosphere*, *178*, 466–478.

Martin. (2020). *Water and sanitation*. United Nations Sustainable Development. Retirado em julho de 2026, de https://www.un.org/sustainabledevelopment/water-and-sanitation/

Protásio, T. D. P., Bufalino, L., Mendes, R. F., Ribeiro, M. X., Trugilho, P. F., & Leite, E. R. D. S. (2012). Torrefação e carbonização de briquetes de resíduos do processamento dos grãos de café. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, *16*, 1252–1258.

Protásio, T. D. P., Bufalino, L., Denzin Tonoli, G. H., Junior, M. G., Trugilho, P. F., & Mendes, L. M. (2013). Brazilian lignocellulosic wastes for bioenergy production: Characterization and comparison with fossil fuels. *BioResources*, *8*(1).

Rashid, R., Shafiq, I., Akhter, P., Iqbal, M. J., & Hussain, M. (2021). A state-of-the-art review on wastewater treatment techniques: The effectiveness of adsorption method. *Environmental Science and Pollution Research*, *28*, 9050–9066. https://doi.org/10.1007/s11356-021-12395-x

Sadat, M., Hashemi, H., Eslami, F., & Karimzadeh, R. (2019). Organic contaminants removal from industrial wastewater by CTAB treated synthetic zeolite Y. *Journal of Environmental Management*, *233*, 785–792.

Tomczyk, A., Sokołowska, Z., & Boguta, P. (2020). Biochar physicochemical properties: Pyrolysis temperature and feedstock kind effects. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, *19*, 191–215.

Xiao, X., Chen, B., & Zhu, L. (2014). Transformation, morphology, and dissolution of silicon and carbon in rice straw-derived biochars under different pyrolytic temperatures. *Environmental Science & Technology*, *48*(6), 3411–3419.

Zulfiqar, M., Samsudin, M. F. R., & Sufian, S. (2019). Modelling and optimization of photocatalytic degradation of phenol via TiO2 nanoparticles: An insight into response surface methodology and artificial neural network. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, *384*.

Carbonização hidrotérmica como estratégia para aumentar a produção de levoglucosano a partir da casca de arroz por pirólise convencional

Pedro Venâncio Wate [a], Natália Maira Braga Oliveira [b], Thiago de Paula Protásio [a], Tiago José Pires de Oliveira [b*]

[a] Universidade Federal de Lavras, Departamento de Ciências Florestais, CEP 37200-000, Lavras, Minas Gerais, Brasil.

[b] Universidade Federal de Lavras, Departamento de Engenharia Química e de Materiais, 37200-000, Lavras, Minas Gerais, Brasil.

Resumo: A casca de arroz é um resíduo agroindustrial abundante com elevado potencial para produção de biocombustíveis e produtos químicos renováveis por meio de processos termoquímicos. Este estudo avaliou o efeito da carbonização hidrotérmica (HTC) sobre as propriedades da casca de arroz e sua influência na composição do bio-óleo obtido por pirólise convencional. A biomassa foi submetida à HTC a 180, 200 e 220 °C por 60 min e caracterizada por análise imediata, composição química, análise elementar (CHN-O), análise por espectroscopia de infravermelho com transformada de Fourier **(**FTIR), poder calorífico superior (PCS), e análise termogravimétrica **(**TGA). Posteriormente, a biomassa in natura e os hidrocarvões foram pirolisados a 400 e 500 °C, e os bio-óleos foram analisados por Cromatografia Gasosa acoplada à Espectrometria de Massas (GC/MS). O aumento da severidade da HTC reduziu o rendimento sólido de 75,1 para 55,3%, elevou o poder calorífico superior de 17,22 para 18,67 MJ kg^{-1} e aumentou os teores de carbono fixo e lignina. A análise do bio-óleo mostrou redução expressiva da fração de ácidos carboxílicos (de aproximadamente 52 para 8% da área relativa a 400 °C) e aumento dos anidroaçúcares, cuja participação atingiu cerca de 80% da área cromatográfica, indicando maior seletividade para a formação de levoglucosano. Os resultados demonstram que a integração entre a carbonização hidrotérmica e a pirólise convencional favorece a produção de levoglucosano e agrega valor à casca de arroz como matéria-prima para biorrefinarias.

Palavras-chave: *Casca de arroz; Carbonização hidrotérmica; Pirólise convencional; Levoglucosano; Bio-óleo; GC/MS.*

Hydrothermal Carbonization as a Strategy to Increase Levoglucosan Production from Rice Husk through Conventional Pyrolysis

Abstract

Rice husk is an abundant agro-industrial residue with considerable potential for the production of biofuels and renewable chemicals through thermochemical conversion processes. This study investigated the effect of hydrothermal carbonization (HTC) on the physicochemical properties of rice husk and its influence on the composition of bio-oil produced by conventional pyrolysis. The biomass was subjected to HTC at 180, 200, and 220 °C for 60 min and characterized by proximate analysis, chemical composition, elemental analysis (CHN-O), Fourier-transform infrared spectroscopy (FTIR), higher heating value (HHV), and thermogravimetric analysis (TGA). Subsequently, the raw biomass and the resulting hydrochars were pyrolyzed at 400 and 500 °C, and the bio-oils were characterized by gas chromatography–mass spectrometry (GC/MS). Increasing HTC severity reduced the solid yield from 75.1 to 55.3%, increased the higher heating value from 17.22 to 18.67 MJ kg^{-1}, and enhanced the fixed carbon and lignin contents. Bio-oil analysis revealed a substantial decrease in the relative abundance of carboxylic acids (from approximately 52% to 8% of the chromatographic peak area at 400 °C) and a significant increase in anhydrosugars, which accounted for approximately 80% of the total chromatographic area, indicating enhanced selectivity toward levoglucosan formation. These results demonstrate that the integration of hydrothermal carbonization with conventional pyrolysis promotes levoglucosan production and adds value to rice husk as a sustainable feedstock for biorefinery applications.

Keywords: *Rice husk; Hydrothermal carbonization; Conventional pyrolysis; Levoglucosan; Bio-oil; GC/MS.*

1. INTRODUÇÃO

A crescente demanda por fontes renováveis de energia e produtos químicos sustentáveis tem impulsionado o aproveitamento de resíduos lignocelulósicos por meio de processos termoquímicos. Nesse contexto, a casca de arroz destaca-se como uma biomassa abundante e de baixo custo, com elevado potencial para aplicação em biorrefinarias devido ao seu elevado conteúdo de celulose e hemicelulose (El Farissi *et al.*, 2026; Han *et al.*, 2026a).A pirólise convencional constitui uma das principais rotas de conversão dessa biomassa, produzindo biochar, gases e bio-óleo. Entre os compostos presentes no bio-óleo, o levoglucosano destaca-se como uma importante molécula plataforma para a produção de biocombustíveis, polímeros e outros produtos químicos de alto valor agregado. Entretanto, sua formação é influenciada pelas características da biomassa e pelas reações competitivas que ocorrem durante a degradação térmica da celulose, reduzindo sua seletividade (Qi *et al.*, 2024).

A carbonização hidrotérmica (HTC) tem sido utilizada como pré-tratamento para modificar a estrutura da biomassa por meio de reações de hidrólise, desidratação e descarboxilação, promovendo alterações na composição lignocelulósica e no comportamento térmico do material (Sugie; Maeda, 2024).

Essas modificações podem favorecer a formação de levoglucosano durante a pirólise, embora ainda sejam escassos os estudos que investigam esse efeito especificamente para a casca de arroz (Fan *et al.*, 2026; Biswas *et al.*, 2026).

Diante desse contexto, este trabalho teve como objetivo avaliar o efeito da carbonização hidrotérmica sobre as propriedades físico-químicas da casca de arroz e sua influência na produção de levoglucosano durante a pirólise convencional, por meio da caracterização da biomassa e da análise da composição do bio-óleo por GC/MS.

2. Metodologia

O estudo utilizou casca de arroz (*Oryza sativa*) proveniente de Minas Gerais, Brasil, previamente preparada e caracterizada. A biomassa foi submetida à carbonização hidrotérmica (HTC) para obtenção de hidrocarvões, posteriormente processados por pirólise convencional. Os vapores gerados foram analisados quanto à composição química e às propriedades do bio-óleo, permitindo avaliar a influência da HTC na conversão termoquímica e na qualidade dos produtos obtidos.

2.1. Carbonização hidrotérmica da biomassa

As reações hidrotérmicas foram realizadas em um reator, modelo Biofoco RUPMO 300 mL de aço inoxidável. Os experimentos foram realizados em diferentes temperaturas (180 °C, 200 °C 220 °C), o tempo de reação foi de 60 min. Usou-se uma proporção de 1:4 que foi de 22,4 g de biomassa e 200 mL de volume de água, a pressão dentro do reator é autógena e monitorada por transdutores de pressão.

O rendimento do hidrocarvão foi determinado em base seca buscando-se eliminar a influência da água no mesmo. Incialmente, determinou-se a umidade das amostras com o auxílio de uma balança determinadora de umidade Weblabor*sp* 160G i, posteriormente foram levadas para estufa a 105°C por 12 h. Após esse período, foi determinado novamente a umidade das amostras. As umidades da biomassa e hidrocarvão serviram para o cálculo das massas secas utilizadas para determinar o rendimento.

2.2. Caracterização físico-química

A casca de arroz foi coletada em uma mini descascadora local. Para a caracterização físico-química usou-se frações granulométricas entre 40 e 60 *mesh*. Todas as determinações analíticas foram conduzidas em triplicata. A análise imediata, compreendendo umidade, matéria volátil, teor de cinza e carbono fixo, foi realizada conforme a norma ASTM D1762-84 (D07 Committee, 2007). A composição estrutural, incluindo extrativos totais, lignina solúvel e insolúvel e holocelulose, foi determinada segundo metodologias padronizadas descritas na literatura (Gomide & Demuner 1986). O poder calorífico superior (PCS) foi determinado por meio de um calorímetro digital IKA C-200, em conformidade com a norma ASTM E711-87. A análise elementar (C, H, N, S, O) foi conduzido em um analisador Elementar Vario Micro Cube, utilizando partículas na faixa de 200 – 270 *mesh*, aproximadamente 2 mg de amostra foram queimados em uma cápsula de estanho a 1200 °C. O teor de oxigênio foi determinado por diferença. A composição inorgânica (macro e micronutrientes) foi quantificada utilizando espectrometria de emissão óptica com plasma indutivamente acoplado (ICP-OES, Spectro Analytical Instruments, Alemanha).

2.3. Análise termogravimétrica (TGA)

As análises termogravimétricas (TGA) foram conduzidas em um analisador Shimadzu DTG-60H, sob atmosfera inerte de nitrogênio com pureza de 99,999%. Aproximadamente 4 mg de amostra, com tamanho de partícula inferior a 200 mesh, foram inicialmente aquecidos até 105 °C a uma taxa de 50 °C.min^{-1}, permanecendo nessa temperatura por 30 min para remoção da umidade residual. Posteriormente, a temperatura foi elevada até 900 °C, empregando-se taxas de aquecimento de 2.5, 5, 10 e 20 °C.min^{-1}. Os dados de perda de massa (curva TG e DTG) foram continuamente registrados para a obtenção dos perfis de degradação térmica. Todos os ensaios foram realizados em triplicata. Para cada condição experimental, os dados foram corrigidos com base na linha de base previamente estabelecida, conforme a metodologias descritas por (Tibola *et al*., 2022).

2.4. Análise por espectroscopia de infravermelho com transformada de Fourier (FTIR)

As análises foram conduzidas em um espectrômetro PerkinElmer@ Spectrum Two, operando na faixa espectral de 4000-650 cm^{-1}, com as amostras de casca de arroz previamente moídas para garantir homogeneidade e confiabilidade dos espectros obtidos.

2.5. Caracterização do bio-óleo

As análises dos componentes presentes no bio-óleo foram realizadas no Laboratório de Processos de Separação da Universidade Federal de Uberlândia – UFU. O bio-óleo obtido no final do processo de cada carbonização foi analisado quanto a identificação dos principais componentes por cromatográfica gasosa e espectrometria de massas (GC/MS QP 2010 Plus da Shimadzu). A fração orgânica do bio-óleo foi diluída em metanol e injetada no cromatógrafo com auxílio do autoinjetor. A razão de split empregada foi de 30:1. A velocidade linear programada foi de 25,6 $cm.s^{-1}$ e o gás hélio, com elevado grau de pureza (pureza 99,999), foi utilizado como gás de arraste nas análises. A coluna capilar utilizada foi a Rtx-1701 (60m x 0,25mm x 0,25µm) com o intuito de que os componentes presentes nos vapores fossem separados e em seguida identificados. A identificação dos componentes foi feita utilizando a biblioteca NIST17 (*National Institute of Standards and Technology*), com índice de similaridade maior que 80%.

3. Resultados e discussão

3.1. Caracterização físico-química da biomassa e hidrocarvão

A Tabela 3: apresenta a caracterização físico-química da biomassa in natura e dos hidrocarvões da casca de arroz, produzidos em diferentes temperaturas 180, 200 e 220 °C.

Tabela 3. Propriedades energéticas e análise imediata da casca de arroz e dos hidrocarvões obtidos por HTC.

	Matéria-prima	**Hidrocarvão**		
Propriedades		180 °C	200 °C	220 °C
PCS (MJ kg^{-1})	17.2	17.49	17.99	18.65
Análise Imediata				
Umidade (%)	10,38	4,45	4,12	4,72
Material volátil (%)	73,33	70,39	69,05	63,39
Carbono fixo (%)	16,35	12,13	15,31	19,79
Cinzas (%)	14,05	14,53	15,64	16,82

Na análise imediata, observou-se que o teor de umidade da biomassa *in natura* foi significativamente reduzido nos hidrocarvões, alcançando valores inferiores a 5%, o que representa um avanço expressivo na estabilidade do material para fins de armazenamento e aplicação energética. O conteúdo de material volátil, inicialmente de 73,33%, e foi reduzindo para 70,39% a 180 °C e para 63,39% a 220 °C, evidenciando não apenas o aumento do teor de carbono fixo, mais também a degradação térmica de frações voláteis. Parte desses compostos

foi convertida em subprodutos da HCT na fase líquida, tais como ácidos orgânicos, fenóis e outros intermediários oxigenados.

A caracterização físico-química da casca de arroz bruta e dos hidrocarvões obtidos por carbonização hidrotérmica a 180, 200 e 220 °C revelaram transições significativas nas propriedades da biomassa que influenciam diretamente a produção de bio-óleo e materiais carbonizados com alto valor energético.

Segundo Naranjo et al. (2023), a HTC promove a transformação de frações termicamente instáveis da casca de arroz, favorecendo a formação de um sólido mais carbonizado e energeticamente estável. Esse comportamento foi confirmado neste estudo, com o aumento do PCS de 17,20 para 18,65 MJ kg^{-1}, redução do material volátil de 73,33 para 63,39% e aumento do carbono fixo de 16,35 para 19,79% entre a matéria-prima e o HC220. Assim, o aumento da temperatura de HTC promoveu maior carbonização e concentração relativa da fração carbonosa, melhorando o potencial energético e a estabilidade térmica do hidrocarvão, além de potencialmente modificar seu comportamento durante a pirólise.

3.2. Análise termogravimétrica (TGA)

A análise termogravimétrica (TGA/DTG) evidenciou que a carbonização hidrotérmica (HTC) altera significativamente a cinética de decomposição da casca de arroz, deslocando o comportamento do material de um regime dominado por polissacarídeos para um regime controlado por estruturas aromáticas (Figura 1).

Curvas termogravimétricas (TG) e termogravimétricas derivadas (DTG) da casca de arroz *in natura* (a) e dos hidrocarvões obtidos por carbonização hidrotérmica a 180 °C (b), 200 °C (c) e 220 °C (d), submetidos a diferentes taxas de aquecimento (2,5, 10 e 20 °C min^{-1}), destacando os estágios de decomposição térmica.

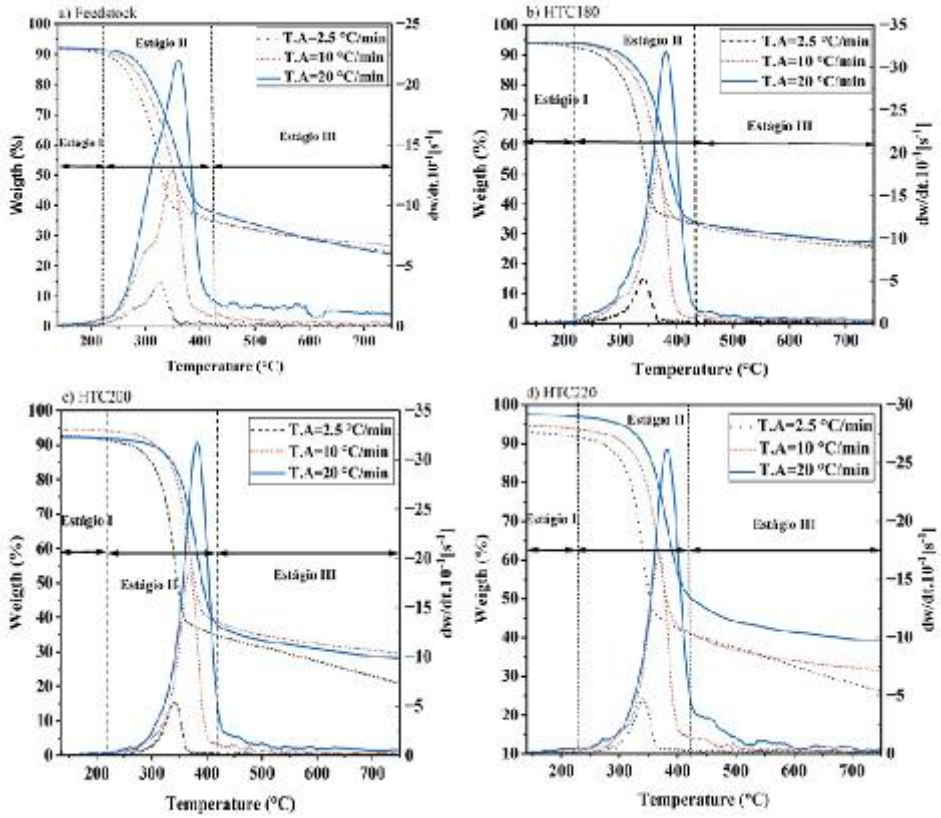


Figura 1. Curvas TG/DTG e estágios de decomposição térmica da casca de arroz in natura e dos hidrocarvões obtidos por HTC a diferentes temperaturas.

A biomassa in natura apresenta pico de decomposição mais intenso e estreito no Estágio II (250-380 °C), típico da degradação de celulose e hemiceluloses, enquanto os hidrocarvões exibem picos mais largos e deslocados, com △T ampliado, indicando menor reatividade térmica e maior resistência à decomposição. Esse comportamento está associado à formação de estruturas carbonosas mais condensadas durante a HTC, que requerem maior energia para decomposição térmica (Oliveira et al., 2015).

A celulose na biomassa bruta se decompõe via transglicosilação, formando anidroaçúcares em torno do pico de DTG. Entretanto, a HTC promove hidrólise e despolimerização prévia dessas cadeias, reduzindo drasticamente a formação desses intermediários. Esse redirecionamento das rotas químicas é consistente com estudos recentes que mostram que a HTC altera a estrutura da celulose e favorece reações competitivas de fragmentação e desidratação (Carvalho *et al.*, 2017).

Por outro lado, o aumento relativo da lignina e da aromaticidade estrutural explica o crescimento da fração fenólica. A lignina apresenta decomposição ampla (200-800 °C), refletida no Estágio III das curvas TGA, e sua degradação ocorre via clivagem de ligações β–O–

4, formando fenóis como guaiacóis e siringóis. Estudos recentes demostram que a HTC favorece a condensação aromática e aumenta a contribuição da lignina nas rotas de pirólise, promovendo maior formação de compostos fenólicos estáveis (Wu *et al.*, 2025).

3.3. Análise de FTIR

A análise FTIR revelou transformações claras nos espectros da casca de arroz conforme as condições de HTC variaram, refletindo a degradação térmica de componentes lignocelulósicos e a formação de compostos com caraterísticas aromáticas e alifáticas distintas, conforme a (Figura 2).

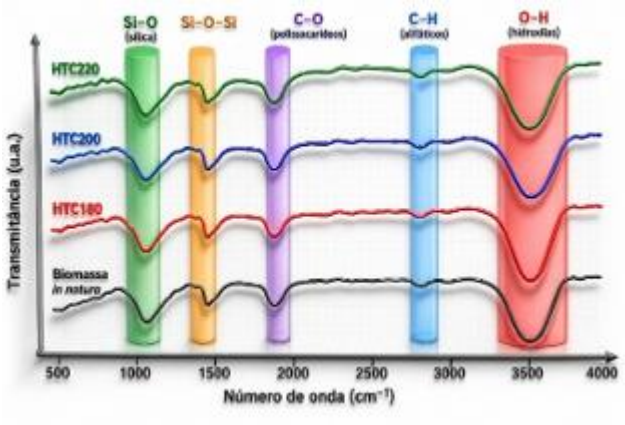


Figura 3: Espectros de infravermelho com transformada de Fourier (FTIR) da casca de arroz *in natura* e dos hidrocarvões obtidos por carbonização hidrotérmica a 180, 200 e 220 °C, evidenciando as principais bandas associadas às ligações Si–O e Si–O–Si da sílica, C–O dos polissacarídeos, C–H alifático e O–H de grupos hidroxila.

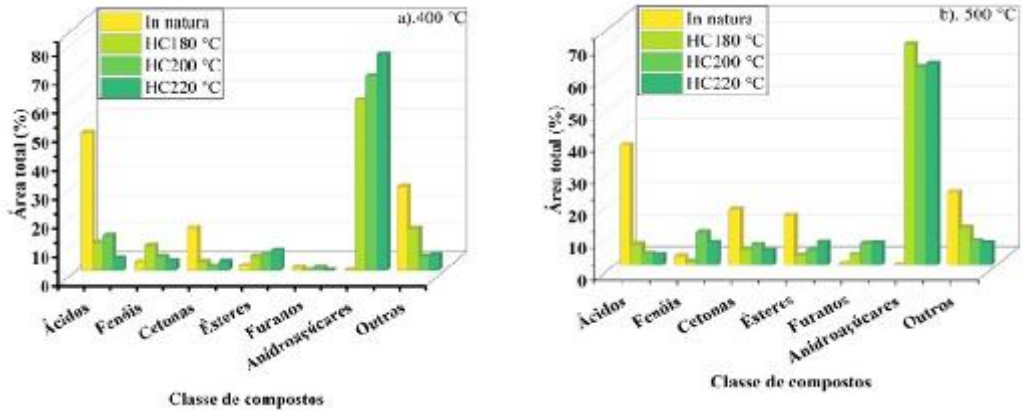
Os espectros de FTIR indicaram modificações nos grupos funcionais **O–H, C–H, C–O, Si–O e Si–O–Si** após a HTC, evidenciando a transformação das frações lignocelulósicas e a relativa estabilidade da sílica. Esse comportamento é consistente com estudos anteriores (Abe *et al.*, 2023; Xu *et al.*, 2023). O aumento da temperatura de HTC reduziu o material volátil de **73,33 para 63,39%**, elevou o carbono fixo de **16,35 para 19,79%** e o PCS de **17,20 para 18,65 MJ kg^{-1}**, indicando maior carbonização e estabilidade térmica. Essas alterações podem modificar as rotas de pirólise e a formação de **anidroaçúcares, furanos e fenóis**, estabelecendo uma relação entre FTIR, TG/DTG e Py-GC/MS (Sugie; Maeda, 2024).

3.4. Análise do bio-óleo GC/MS

A Figura 5, apresenta a distribuição das principais classes químicas do bio-óleo obtido da casca de arroz por GC/MS, nas temperaturas de pirólise de 400 e 500 °C. Em ambas as temperaturas, predominam compostos oxigenados, principalmente anidroaçúcares, ácidos, fenóis, furanos e cetonas. A 400 °C observou-se maior formação de anidroaçúcares (70–80%),

com destaque para o levoglucosano, enquanto a 500 °C ocorreu redução dessa fração (40–45%) e aumento de fenóis (20–30%) e compostos leves, evidenciando a intensificação de reações secundárias de *cracking*, desidratação e aromatização (Xie et al., 2024; Zhang et al., 2025c).

Distribuição dos compostos pirolíticos em função do pré-tratamento hidrotérmico e da temperatura de pirólise



Distribuição das principais classes de compostos identificados por Py-GC/MS na casca de arroz in natura e nos hidrocarvões obtidos por carbonização hidrotérmica a 180, 200 e 220 °C, após pirólise a 400 °C (a) e 500 °C (b).

O elevado teor de levoglucosano em temperaturas moderadas indica que a pirólise favorece a despolimerização da celulose por transglicosilação intramolecular. Em temperaturas mais elevadas, esse composto sofre degradação, formando produtos de menor massa molecular, como hidroxiacetaldeído e acetol, reduzindo sua seletividade (Mariyam *et al.*, 2023; Hakeem *et al.*, 2021).

Paralelamente, observou-se redução dos ácidos orgânicos e aumento dos compostos fenólicos, decorrentes da degradação da lignina, contribuindo para a obtenção de um bio-óleo com menor acidez e maior estabilidade química.

Os resultados obtidos por GC/MS demonstram que a temperatura de pirólise exerce influência decisiva sobre a composição química do bio-óleo, sendo 400 °C a condição mais favorável para a produção de levoglucosano**,** enquanto 500 °C favorece a formação de compostos fenólicos e aromáticos. Esses resultados evidenciam o potencial da pirólise da casca de arroz para a produção seletiva de químicos renováveis com aplicação em biorrefinarias.

4. Conclusões

A carbonização hidrotérmica modificou a composição da casca de arroz, reduzindo a holocelulose, aumentando o teor relativo de lignina e a estabilidade térmica dos hidrocarvões, o que alterou as rotas da pirólise.

A HTC reduziu significativamente a formação de ácidos carboxílicos (<10–15%) e favoreceu a produção de levoglucosano a 400 °C e de fenóis (≈30–35%) a 500 °C. Nos ensaios em leito fixo, os hidrocarvões apresentaram menor rendimento de bio-óleo (26,69–30,89%), maior retenção de carbono no biochar (47,77–52,05%) e aumento da produção de biogás (até 42,96%).

De modo geral, a integração HTC–pirólise mostrou-se eficiente para melhorar a qualidade do bio-óleo e direcionar a formação de compostos de maior valor agregado, sendo a condição HTC 200–220 °C + pirólise a 500 °C a que apresentou o melhor desempenho.

5. Referência bibliográficas

ABE, Hiroya *et al*. Progress on Separation and Hydrothermal Carbonization of Rice Husk Toward Environmental Applications. **Global Challenges**, [*s. l.*], v. 7, n. 8, p. 2300112, 2023.

BISWAS, Bijoy *et al.* Rice straw derived silica rich ash catalyst for efficient hydrothermal liquefaction of rice straw to value added chemicals. **Journal of the Energy Institute**, [*s. l.*], v. 124, p. 102393, 2026.

CARVALHO, Wender Santana *et al.* Fast pyrolysis of sweet sorghum bagasse in a fluidized bed reactor: Product characterization and comparison with vapors generated in analytical pyrolysis. **Energy**, [*s. l.*], v. 131, p. 186–197, 2017.

D07 COMMITTEE. **Test Method for Chemical Analysis of Wood Charcoal**. ASTM International, , [*s. d.*]. Disponível em: http://www.astm.org/cgi-bin/resolver.cgi?D1762-84R13. Acesso em: 21 dez. 2025.

EL FARISSI, Hammadi *et al.* Innovative transition from traditional pyrolysis to catalytic pyrolysis for bioenergy: Optimizing bio-oil production from renewable biomass. **Biomass and Bioenergy**, [*s. l.*], v. 208, p. 108850, 2026.

FAN, Mengjiao *et al.* Influence of steric hindrance created by silica in rice husk on evolution of products from pyrolysis, hydrothermal carbonization, activation and gasification. **Chemical Engineering Journal**, [*s. l.*], v. 533, p. 174872, 2026.

HAKEEM, Ibrahim Gbolahan *et al.* Research progress on levoglucosan production via pyrolysis of lignocellulosic biomass and its effective recovery from bio-oil. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, [*s. l.*], v. 9, n. 4, p. 105614, 2021.

HAN, Ying *et al.* Comprehensive review of WPC pyrolysis mechanisms and catalysis with emerging AI opportunities. **Industrial Crops and Products**, [*s. l.*], v. 241, p. 122767, 2026.

MARIYAM, Sabah *et al.* A Review on Catalytic Fast Co-Pyrolysis Using Analytical Py-GC/MS. **Molecules**, [*s. l.*], v. 28, n. 5, p. 2313, 2023.

QI, Penggang *et al.* Catalytic pyrolysis of rice husk to co-produce hydrogen-rich syngas, phenol-rich bio-oil and nanostructured porous carbon. **Energy**, [*s. l.*], v. 298, p. 131427, 2024.

SUGIE, Sayaka; MAEDA, Hirotaka. Conversion of rice husks into carbonaceous materials with porous structures via hydrothermal process. **Environmental Science and Pollution Research**, [*s. l.*], v. 31, n. 33, p. 45711–45717, 2024.

WU, Shuang *et al.* Recent advances on hydrothermal carbonization of biomass for carbon-negative materials: From mechanistic insights to functional applications. **Industrial Crops and Products**, [*s. l.*], v. 237, p. 122142, 2025.

XU, Zhi-Xiang *et al.* The influence of NaCl during hydrothermal carbonization for rice husk on hydrochar physicochemical properties. **Energy**, [*s. l.*], v. 266, p. 126463, 2023.

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Colorimetria e barreira à luz em filmes produzidos com nanocelulose obtida da polpa de *Eucalyptus* sp. tratada com silicatos

Adriano Reis Prazeres Mascarenhas[1]; Thiago Cardoso Silva[1]; Fábio Henrique Della Justina do Carmo[1]; Josiane Fernandes Keffer[1]; Amanda dos Santos Ferreira[1]; Marcia Cristiane Alves[1]; Cibelle Amaral Reis[1,2]; Gustavo Henrique Denzin Tonoli[3]

[1] Universidade Federal de Rondônia - *Campus* Rolim de Moura
[2] Instituto Federal de Rondônia - *Campus* Ji-Paraná
[3] Universidade Federal de Lavras

Resumo: Objetivou-se tratar a polpa branqueada de *Eucalyptus* sp. com silicatos e avaliar seus efeitos nas propriedades colorimétricas e ópticas de filmes de celulose nanofibrilada (CNF). A polpa foi tratada com silicato de cálcio ($CaSiO_3$) ou de magnésio ($MgSiO_3$), nas concentrações de 5% ou 10% (m/m), seguida de ultrarefinamento e produção dos filmes pelo método *casting*. Comparados ao Controle, os filmes com silicatos foram mais espessos (27–82 µm), mais luminosos (97,4–100) e exibiram tonalidade branco-amarelada, em função das coordenadas verde–vermelho (−2,2 a −1,3) e azul–amarelo (6,6–8,3). Os valores de transmitância de luz foram quase nulos nos filmes com 10% de $CaSiO_3$ e com 5% ou 10% de $MgSiO_3$. A opacidade aparente aumentou de ~59% no Controle para ~95% nos filmes com 10% de $CaSiO_3$ ou $MgSiO_3$. A maior opacidade específica foi obtida com 5% de $MgSiO_3$ (~3,3%/µm). Os silicatos são promissores para a obtenção de filmes de CNF biodegradáveis para usos que demandem barreira à luz.

Palavras-chave: Fotodegradação de alimentos; Embalagens biodegradáveis; Nanofibrilas celulósicas.

Colorimetry and light-barrier properties of films produced from nanocellulose obtained from silicate-treated *Eucalyptus* sp. pulp

Abstract: This study aimed to treat bleached *Eucalyptus* sp. pulp with silicates and evaluate their effects on the colorimetric and optical properties of nanofibrillated cellulose (CNF) films. The pulp was treated with calcium silicate ($CaSiO_3$) or magnesium silicate ($MgSiO_3$) at concentrations of 5% or 10% (w/w), followed by ultrarefining and film production using the casting method. Compared with the Control, the silicate-containing films were thicker (27–82 µm), showed higher lightness values (97.4–100), and exhibited a yellowish-white hue, based on the green–red (−2.2 to −1.3) and blue–yellow (6.6–8.3) coordinates. Light transmittance values were nearly zero for films containing 10% $CaSiO_3$ and 5% or 10% $MgSiO_3$. Apparent opacity increased from ~59% in the Control to ~95% in films containing 10% $CaSiO_3$ or $MgSiO_3$. The highest specific opacity was obtained with 5% $MgSiO_3$ (~3.3%/µm). Silicates are promising for producing biodegradable CNF films for applications requiring a light barrier.

Keywords: Food photodegradation; Biodegradable packaging; Cellulose nanofibrils.

1. Introdução

Os nanomateriais celulósicos (NMC), por serem biodegradáveis e provenientes de fontes renováveis, podem ser alternativas para substituição de polímeros à base de petróleo em encapsulação para liberação lenta de fármacos, reforço de compósitos, produção de semicondutores, aplicações biomédicas, como agentes de estabilização de emulsões e na produção de embalagens para alimentos (Xue et al. 2025).

Entre os NMC, celulose nanofibrilada (CNF), obtida a partir do cisalhamento da parede celular vegetal, se destaca por apresentar elevada razão de aspecto e estruturas individualizadas com diâmetros variando entre 3 e 100 nm (ISO, 2017). Para obtenção das CNF, empregam-se métodos mecânicos, tais como: sonicação, ultra-turrax, homogeneização de alta pressão, extrusão e ultrarefinamento, os quais demandam elevado dispêndio energético (~30 kWh/kg) e realização de vários ciclos de cisalhamento das fibras (~40 passes) (Zhou et al. 2024).

Deste modo, para aumentar a eficiência energética na produção de CNF, tratamentos químicos são aplicados à matéria-prima celulósica para facilitar o intumescimento e separação das microfibrilas da parede celular. Os tratamentos químicos mais comuns para obtenção de CNF são a hidrólise ácida, mercerização, hornificação, oxidação mediada por TEMPO, carboximetilação e fosforilação (Fang et al. 2025).

Estes tratamentos, facilitam a obtenção das CNF e podem modificar os grupos químicos da celulose, conferindo-lhe características mais propícias às aplicações em embalagens para alimentos, tais como: barreira à luz e elevada resistência mecânica. No entanto, estes tratamentos podem representar elevados custos industriais e geração de resíduos que requerem adequada neutralização.

Em função disso, tratamentos alternativos das fibras têm sido estudados visando reduzir o consumo energético e os custos de produção, como, por exemplo, o emprego de silicatos de cálcio ($CaSiO_3$) ou magnésio ($MgSiO_3$) (Mascarenhas et al., 2024). Entretanto, os estudos sobre os efeitos desses silicatos nas propriedades colorimétricas e ópticas de filmes são escassos. Partindo da hipótese de que o $CaSiO_3$ e o $MgSiO_3$ podem alterar essas propriedades, objetivou-se produzir filmes a partir de suspensões de CNF contendo diferentes concentrações desses compostos e avaliar suas cores, transmitância e opacidade.

2. Material e métodos

Preparo da polpa celulósica

A polpa comercial Kraft branqueada de *Eucalyptus* sp., fornecida por uma indústria localizada no estado do Paraná, Brasil, foi utilizada como matéria-prima para realização deste estudo. A polpa continha ~79,1% de celulose, ~15,7% de hemiceluloses, ~1,5% de minerais e ~0,4% de lignina. Com a finalidade de promover o inchamento das paredes celulares das fibras, a polpa foi hidratada em água destilada em proporção de 1:40 (~25,2 g/l) durante 24 h. Em seguida, o material foi mecanicamente agitado durante 2 h a 600 rpm até a dispersão das fibras.

Sequencialmente, após a drenagem da água, porções de polpa foram adicionadas em soluções de $CaSiO_3$ ou de $MgSiO_3$ em concentrações de 5% e 10% (m/m), considerando a massa de água retida na polpa (Mascarenhas et al. 2024). Depois, as polpas, misturadas às soluções de silicato, foram agitadas constantemente a 600 rpm sob temperatura de ~80 °C durante 2 h.

Posteriormente, as soluções de silicatos foram removidas por meio de drenagem em tecido filtrante, no qual as polpas foram lavadas em água corrente até a observação de pH ~7, com a finalidade de interromper a reação alcalina. Ao final, a água das polpas foi drenada a fim de reservar porções nunca tratadas (Controle) e tratadas com silicatos para preparo das suspensões de CNF.

Produção das suspensões de CNF

As polpas tratadas com silicatos foram redispersas em água destilada na concentração de 1% (m/m), considerando a massa de água retida no material. Para garantir a dispersão das fibras e desfazer agregados, as polpas foram agitadas durante 15 min a 600 rpm. As suspensões de CNF foram obtidas utilizando-se o Super Mass Colloider Masuko Sangyo MKGA-80 grinder conforme a metodologia descrita por Mascarenhas et al. (2022).

Para facilitar a identificação, os filmes produzidos com 5% e 10% de silicato de cálcio serão descritos como SC 5% e SC 10%, respectivamente. Os filmes obtidos com 5% e 10% de silicato de magnésio serão descritos como SM 5% e SM 10%.

Produção dos filmes de CNF

Os filmes foram produzidos a partir das suspensões de CNF dispersas em água deionizada com concentração de 1% (m/m). Para isso, empregou-se o método *casting* que consiste na evaporação do solvente em temperatura ambiente. Assim, verteu-se, em cinco repetições, 50 g de suspensão em placas de acrílico com 15 cm de diâmetro.

Colorimetria, espessura, transmitância e opacidade dos filmes de CNF

Para cada ensaio, foram utilizadas 5 amostras dos filmes produzidos com cada tipo de suspensão de CNF. Todas as amostras foram previamente acondicionadas em temperatura de 25 °C e umidade relativa de 65%, conforme TAPPI T 402 sp -21 (TAPPI 2021).

Considerando o sistema colorimétrico CIELab, foram obtidos os parâmetros de luminosidade (L*), coordenada colorimétrica verde-vermelho (a*) e azul-amarelo (b*), saturação de cor (C*) e ângulo hue (h). Para as medições, utilizou-se um colorímetro Konica Minolta CM-5, com ângulo de observação definido em 10° e iluminante D65 (luz do dia). Com essas informações, serão apresentadas as cores equivalentes nos sistemas RGB e hexadecimal (HEX) por meio da ferramenta “EasyRGB” (https://www.easyrgb.com/en/convert.php).

Para obter a espessura dos filmes, foi utilizado um micrômetro digital de ponta plana (0,001 mm), conforme indicado pela norma TAPPI T 411 om-15 (TAPPI 2015). A transmitância de luz nos filmes foi obtida por meio do uso de espectrofotômetro Genesys 10S UV-Vis Thermo Scientific, ajustado para o comprimento de onda 600 nm.

Para calcular a opacidade aparente (Equação 1), situada em uma escala de 0 até 100%, empregou-se o colorímetro previamente mencionado para determinação dos valores de L* nos filmes dispostos sobre um padrão preto e sobre um padrão branco (Mascarenhas et al. 2022). A opacidade específica foi obtida por meio da Equação 2, com a finalidade de comparar os filmes sem a influência da dispersão instantânea da luz na superfície.

$$Oa = \frac{Yp}{Yb} \times 100 \quad (1)$$

$$Oe = \frac{Oa}{ef} \quad (2)$$

Em que, Oa = opacidade aparente (%); Oe = Opacidade específica (%/µm); ef = espessura do filme (µm); Yp = luminosidade do filme sobre o padrão preto e Yb = luminosidade do filme sobre o padrão branco.

Design experimental e análises estatísticas

O trabalho foi realizado em delineamento inteiramente casualizado e os dados foram previamente analisados quanto a homogeneidade de variância por meio do teste de Shapiro-Wilk. Em seguida, ao se verificar a normalidade dos dados, realizou-se a análise de variância seguida do teste de Scott-Knott sempre que diferenças entre um par de médias foram

observadas. Todos os testes foram feitos considerando $p<0,01$, aplicando-se o pacote "easyanova" no *software* R.

3. Resultados e discussão

Quanto aos parâmetros colorimétricos, as variações foram incipientes demonstrando uniformidade em cada tratamento. A amplitude geral de variação para L* foi entre 97,4 e 100 (Figura 1a); para a* entre -2,2 e -0,10 (Figura 1b); b* entre 8,3 e 6,2 (Figura 1c); para C* entre 6,1 e 8,6 (Figura 1d) e para h entre 90,9 e 104,9 (Figura 1e). Os menores valores para as variáveis analisadas foram encontrados para o Controle, exceto para a*, cujo menor valor foi visto para SM 10% e o maior para o Controle.

O uso dos silicatos na concentração de 10% resultou nos maiores valores de L*. Nos valores de b* e C*, os maiores valores foram obtidos para $CaSiO_3$, em concentração de 10%, enquanto para h os maiores valores foram observados para $MgSiO_3$ na mesma concentração. Não foram observados efeitos para L* entre os filmes SC 5% e SM 5%, para b* e C* entre os filmes SC 5% e SM 10% e para h entre SC 5% e SC 10%. Exceto para L*, em relação às condições avaliadas, os filmes SM 5% apresentaram valores para os parâmetros colorimétricos superiores ao Controle e intermediários entre os filmes com 5 ou 10% de $CaSiO_3$ ou 10% de $MgSiO_3$.

Exceto para a*, os valores variaram pouco entre e dentro dos filmes avaliados pelo fato da polpa branqueada ser de origem comercial com elevado nível de padronização e índice de alvura (Rocha et al. 2026). Além disso, os silicatos utilizados para o estudo eram de elevada pureza (~95%), o que torna a variabilidade ainda menor. Os valores negativos de a* para os filmes SC ou SM, que tendem ao azul, podem ser explicados pela difração da luz ocasionada pelos cristalitos de $CaSiO_3$ ou $MgSiO_3$ associada ao bloqueio da radiação ultravioleta pelos filmes de CNF. (Mascarenhas et al., 2022).

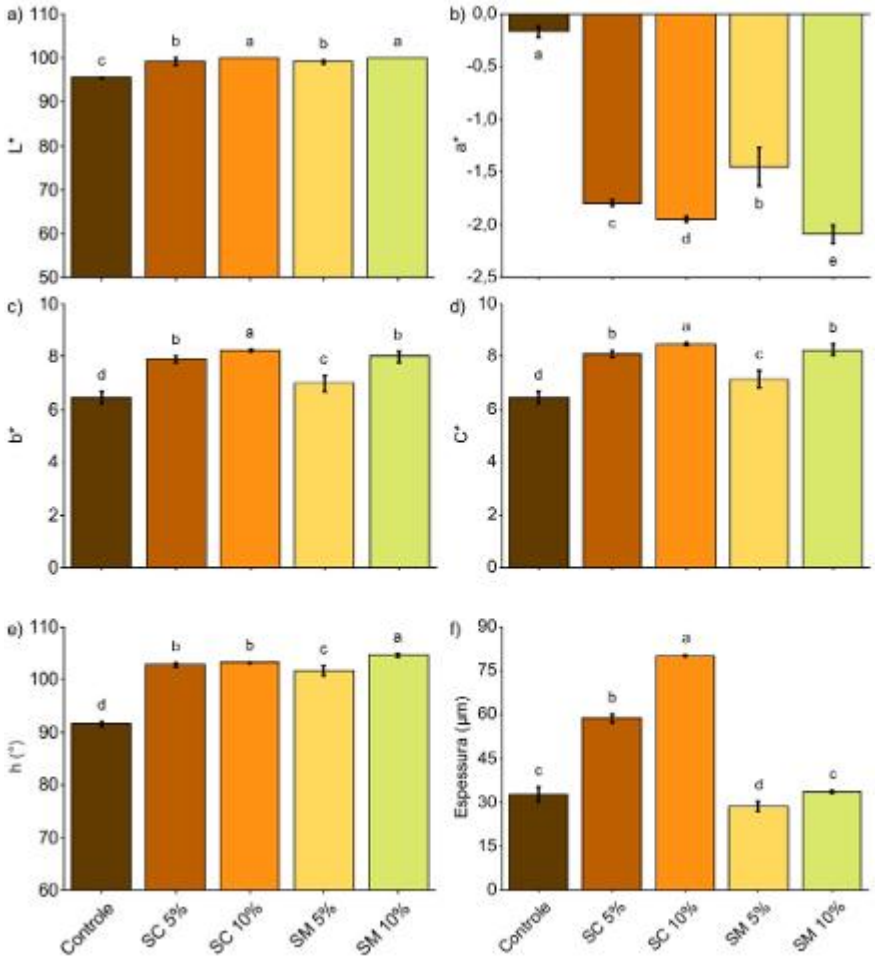


Figura 1 – Parâmetros colorimétricos de luminosidade (L*), coordenadas verde–vermelho (a*) e azul–amarelo (b*), saturação de cor (C*) e ângulo hue (h°), além da espessura dos filmes produzidos a partir de suspensões de celulose microfibrilada (CNF) provenientes de polpa de *Eucalyptus* sp. hidratada (Controle) ou tratada com silicato de cálcio, nas concentrações de 5% (SC 5%) e 10% (SC 10%), ou com silicato de magnésio, nas concentrações de 5% (SM 5%) e 10% (SM 10%). Médias seguida de mesma letra não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott ($p<0,01$).

Outro aspecto que contribui para este entendimento é a espessura dos filmes (Figura 1f), a qual, em amplitude geral, variou entre 30 e 82 µm. Embora os filmes com silicatos tenham apresentado maiores espessuras o que sugeriria menor flexibilidade, especialmente para SC 5% (~60 µm) e SC 10% (~80 µm), todas as composições avaliadas apresentaram maleabilidade, homogeneidade, pouco enrugamento e facilidade de desmoldagem ao final do processo *casting*, comportamento descrito por Mascarenhas et al. (2024) ao reportarem o uso CNF com silicatos no revestimento de papel cartão.

Em seguida, ao observar os valores de T (Tabela 1), quando comparados ao Controle, todos os filmes apresentaram reflexão quase total da luz incidente, conferindo-lhes tons levemente amarelados, o que pode estar associado à degradação oxidativa das hemiceluloses induzida pela alcalinidade dos silicatos (Gautam et al., 2025). O filme SC 5%, mesmo com maior espessura e provável dispersão da luz pelos cristálitos, permitiu a refração da luz, como evidenciado pelos valores de T ligeiramente menores (~25%) em relação ao Controle.

Tabela 1 – Cores, transmitância (T) e códigos no sistema RGB e hexadecimal (HEX) para os filmes produzidos a partir de suspensões de celulose microfibrilada (CNF) provenientes de polpa de *Eucalyptus* sp. hidratada (Controle) ou tratada com silicato de cálcio, nas concentrações de 5% (SC 5%) e 10% (SC 10%), ou com silicato de magnésio, nas concentrações de 5% (SM 5%) e 10% (SM 10%)

Filmes	Cores	T (%)	RGB	HEX
	Transparente	22,15 ± 0,64* a	-	-
	Branco levemente amarelado	16,5 ± 0,59 b	255, 254, 236	#FFFEEC
	Branco amarelado quase puro	0,00 ± 0,00 c	255, 255, 237	#FFFFED
	Branco amarelado muito claro	0,20 ± 0,08 c	255, 253, 237	#FFFDED
	Branco amarelado quase puro	0,08 ± 0,05 c	255, 255, 238	#FFFFEE

* Valores após "±" indicam o desvio-padrão e médias seguida de mesma letra não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott ($p<0,01$).

Ao associar estas características aos parâmetros colorimétricos, foi possível verificar que o uso dos silicatos permitiu obter materiais com algumas características propícias à indústria de embalagens, tais como: uniformidade estrutural, moldagem em superfícies, barreira à luz e fundo com contraste para impressões (Yekta et al., 2023).

Mais evidências destas características podem ser verificadas pela maior opacidade dos filmes com silicatos em sua composição, respondendo a hipótese formulada para execução deste trabalho. Assim, maiores valores de Oa foram registrados para SC 10% e SM 10%, seguidos, respectivamente, de SC 5%, SM 5% e Controle (Figura 2a).

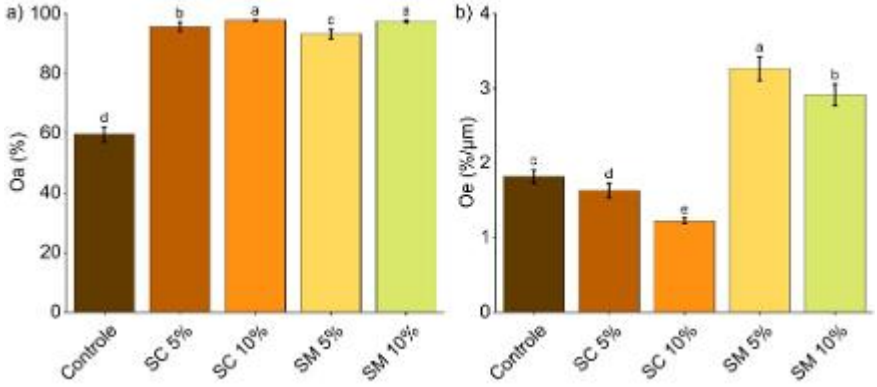


Figura 2 – Opacidade aparente (Oa) e opacidade específica (Oe) dos filmes produzidos a partir de suspensões de celulose microfibrilada (CNF) provenientes de polpa de *Eucalyptus* sp. hidratada (Controle) ou tratada com silicato de cálcio, nas concentrações de 5% (SC 5%) e 10% (SC 10%), ou com silicato de magnésio, nas concentrações de 5% (SM 5%) e 10% (SM 10%). Médias seguida de mesma letra não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott ($p<0,01$).

Quanto aos valores de Oe, os maiores valores foram obtidos para SM 5%, seguido de SM 10%, Controle, SC 5% e SC 10%, nesta ordem (Figura 2b). Como os valores são obtidos em função da espessura dos filmes, é possível verificar que nem sempre o filme de maior opacidade em superfície representará a maior capacidade de bloqueio da luz e que nem sempre o filme mais espesso será o mais opaco.

A opacidade dos filmes é um parâmetro importante para indústria de alimentos, pois está diretamente correlacionada à capacidade do material impedir a fotodegradação dos produtos, sobretudo em faixas de comprimento de onda de alta frequência, sobretudo na faixa do ultravioleta. Ainda, os silicatos avaliados neste estudo não limitariam o uso dos filmes em aplicações associadas aos alimentos, haja vista que são regulamentados para uso na forma de antiumectante e emulsificantes em temperos e em óleos e gorduras para consumo humano, respectivamente (ANVISA, 2023).

As características obtidas para os filmes avaliados são desejáveis para aplicações tecnológicas em embalagens e revestimentos de papéis. Além disso, os filmes com silicatos, além da performance superior em bloquear a luz, possuem a vantagem estratégica de serem compostos por 90% de celulose, tornando-os biodegradáveis e com potencial para que indústrias atendam ao Pacto Global da ONU no contexto da ESG (*Environmental, Social and Governance*), lastrado nos 17 ODS (ONU, 2026).

Para melhor compreensão dos efeitos dos silicatos nas propriedades colorimétricas e ópticas dos filmes seria necessário a realização de estudos da microestrutura por meio de

microscopia eletrônica de varredura, o que poderia ser explorado em pesquisas futuras. Além disso, estudos envolvendo a aplicação dos filmes no revestimento de alimentos poderia trazer respostas mais contundentes a respeito de suas performances frente à redução da fotodegradação de alimentos.

4. Conclusões

O tratamento da polpa com silicatos alterou as propriedades colorimétricas e ópticas dos filmes de CNF, promovendo maior luminosidade, tonalidades branco-amareladas e redução da transmitância em relação ao Controle. Os filmes produzidos com 10% de $CaSiO_3$ e $MgSiO_3$ apresentaram as maiores opacidades, destacando que a capacidade de bloqueio da luz relaciona-se com a espessura e composição do material. Os silicatos mostraram-se promissores para a obtenção de filmes biodegradáveis com potencial de aplicação em embalagens e revestimentos que demandem maior barreira à luz.

5. Agradecimentos

À Universidade Federal de Rondônia (UNIR) e Universidade Federal de Lavras (UFLA) pela concessão de insumos, infraestrutura e recursos financeiros. À Fundação Rondônia de Amparo ao Desenvolvimento das Ações Científicas e Tecnológicas e à Pesquisa (FAPERO) pela concessão de recursos financeiros (Chamada Pública nº 005/2023 – FAPERO/DITT: Termos de Outorga nº 163/2024 e nº 190/2024).

6. Referências bibliográficas

ANVISA - Agência Nacional de Vigilância Sanitária. (2023). Instrução Normativa – IN n° 211, de 1º de março de 2023.

Clarissa, F. R., Lengowski, E. C., Sampaio, N. M. F. M., Nascimento, P. T. H., Zanoni, P. R. S., Oliveira, P. R., Magalhães, W. L. E., Fontana, J. D., & Bonfatti Júnior, E.A. (2026). High-Kappa *Eucalyptus* Kraft Pulp in a Biorefinery Context: Balancing Sugar Production with Fiber-Reinforcement Potential. Forests, 17 (3), 358. https://doi.org/10.3390/f17030358

Fang, Q., Sun, H.N., Zhang, M., Mu, T.H., & Garcia-Vaquero, M. (2025). Cellulose Nanofibers: Current Status and Emerging Development of Sources, Pretreatment, Production, and Applications. ACS Agricultural Science & Technology, 5, 3-27. https://doi.org/10.1021/acsagscitech.4c00593

Gautam, D., Rana, V., Sharma, S., Walia, Y.K., Umar, A., Ibrahim, A. A., & Baskoutas, S. (2025). Hemicelluloses: A Review on Extraction and Modification for Various Applications. Chemistry Select, 10 (24), e06050. https://doi.org/10.1002/slct.202406050

ISO - International Organization for Standardization. (2017). ISO/TS 20477:2017(en), Nanotechnologies - Standard terms and their definition for cellulose nanomaterial.

Mascarenhas, A. R. P., Scatolino, M. V., Dias, M. C., Martins, M. A., Melo, R. R., Damásio, R. A. P., Mendonça, M. C. & Tonoli, G. H. D. (2022). Fibers pre-treatments with sodium silicate affect the properties of suspensions, films, and quality index of cellulose micro/nanofibrils. Nordic Pulp & Paper Research Journal, 37 (3), 534-552. https://doi.org/10.1515/npprj-2022-0037

Mascarenhas, A. R. P., Scatolino, M. V., Lago, R. C., Medeiros, D. T., Batista, F. G., Setter, C., Melo, R. R., Martins, M. A. & Tonoli, G. H. D. (2024). Silicates as alternative pretreatment for cellulose pulp to obtain nanofibrils for application in biodegradable packaging: a technical review. Nordic Pulp & Paper Research Journal, 37 (3), 534-552. https://doi.org/10.1515/npprj-2022-0037

ONU - Organização das Nações Unidas. (2026). Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS). Nações Unidas Brasil. https://brasil.un.org/pt-br/sdgs

TAPPI - Technical Association of the Pulp and Paper Industry. (2015). T 411 om-15, Thickness of paper, paperboard, and combined board.

TAPPI - Technical Association of the Pulp and Paper Industry. (2021). T 402 sp-21, Standard conditioning and testing atmospheres for paper, board, pulp handsheets, and related products.

Xue, H., Zhang, Y., Zhao, Z., Gao, H., Bao, W., Li, J., Zhang, Z., Wang, Q. & He, Q. (2025). A Review: Sources, Preparation and Application of Nanocellulose. Journal of Polymer Materials, 42 (2), 379-409. https://doi.org/10.32604/jpm.2025.066695

Yekta, R., Abedi-Firoozjah, R., Salim, S. A., Khezerlou, A. & Abdolmaleki, K. (2023). Application of cellulose and cellulose derivatives in smart/intelligent bio-based food packaging. Cellulose, 30, 9925-9953. https://doi.org/10.1007/s10570-023-05520-1

Zhou, Z., Rajan, K., Labbé, N. & Wang, S. (2024). Significantly reducing energy consumption during nanolignin production via high-solid content grinding. Industrial Crops and Products, 11. 118209. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2024.118209

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Comportamento reológico de hidrogéis a base de nanocelulose submetidos a secagem em *spray drying*

Rafael Carvalho do Lago[1]; Evelize Aparecida Amaral Shashiki[1]; Cínthia Aparecida Silva[1]; Felipe Gomes Batista[1]; Júlia Naves Teixeira[1]; Gustavo Henrique Denzin Tonoli[1]; Lourival Marin Mendes[1]

[1] Universidade Federal de Lavras

Resumo: A utilização de hidrogéis para plantio figura-se como alternativa sustentável ao intenso uso de recursos hídricos, sobretudo quando são obtidos de matérias primas biodegradáveis, como as micro/nanofibrilas de celulose (MFC), já conhecidas por sua capacidade de formar redes poliméricas e interagir com a água. O processo de secagem é uma maneira de otimizar a logística de transporte e aplicação dos hidrogéis, especialmente aqueles elaborados com matérias primas com baixo teor de sólidos, como as MFC. Diferentes métodos de secagem podem alterar propriedades importantes dos hidrogéis, devendo seus efeitos serem investigados. Deste modo, esse trabalho foca no estudo dos efeitos da secagem por spray drying sobre as propriedades de hidrogéis sustentáveis a base de MFC, utilizando a reologia como resposta. Verificou-se que o processo de secagem por spray drying resultou em partículas aglomeradas e estrutura mais compactada em relação ao hidrogel original, embora a rugosidade tenha sido mantida. A hornificação das fibras pelo processo de secagem resultou em matrizes mais rígidas, com mobilidade reduzida, evidenciada por testes de varredura de amplitude e frequência, o que impactou negativamente na capacidade de intumescimento e retenção de água, tendo sido observada maior histerese em rampas de aquecimento e arrefecimento. O estudo futuro de variáveis operacionais e modificações superficiais das MFC podem otimizar o processo de secagem, com menor impacto estrutural e garantia de maior desempenho após reidratação.

Palavras-chave: Microestrutura; hornificação; polímeros.

Rheological Behavior of Nanocellulose-Based Hydrogels Subjected to Spray Drying

Abstract: The use of hydrogels for planting has emerged as a sustainable alternative to the intensive use of water resources, particularly when they are produced from biodegradable raw materials such as cellulose micro/nanofibrils (CMNFs), which are well known for their ability to form polymeric networks and interact with water. Drying is an effective strategy to optimize the transportation logistics and field application of hydrogels, especially those produced from low-solids-content feedstocks such as CMNF suspensions. However, different drying methods may alter key hydrogel properties, making it essential to investigate their effects. Therefore, this study evaluated the impact of spray drying on the rheological properties of sustainable CMNF-based hydrogels. Spray drying produced agglomerated particles and a more compact structure than the original hydrogel, although surface roughness was largely preserved. Fiber hornification induced by the drying process resulted in stiffer matrices with reduced molecular mobility, as evidenced by amplitude and frequency sweep tests. These structural changes negatively affected the swelling capacity and water retention of the hydrogels and led to greater

hysteresis during heating and cooling temperature ramps. Future investigations on spray-drying operating conditions and CMNF surface modifications may optimize the drying process by minimizing structural damage while ensuring improved hydrogel performance after rehydration.

Keywords: Microstructure; Hornification; Polymers.

1. Introdução

Hidrogéis são materiais tridimensionais compostos por redes poliméricas hidrofílicas capazes de absorver e reter grandes quantidades de água (Mahinroosta et al., 2018). Essa característica torna os hidrogéis promissores para uma ampla gama de aplicações, especialmente na agricultura, onde podem desempenhar um papel crucial na melhoria da retenção de água no solo, na redução da lixiviação de nutrientes e na promoção de maior eficiência no uso dos recursos hídricos (Wu et al., 2024). Dessa forma, os hidrogéis apresentam um grande potencial para contribuir com práticas agrícolas mais sustentáveis, especialmente em regiões vulneráveis à escassez de água (Michalik et al., 2020). Em adição, podem ser obtidos a partir de matérias primas sustentáveis. Dentre as matérias primas com potencial para formação de hidrogéis destacam-se as micro/nanofibrilas de celulose (MFC), devido à sua alta hidrofilicidade e capacidade de formar redes tridimensionais bem estruturadas.

A síntese e o processamento dos hidrogéis envolvem etapas essenciais para garantir a preservação de suas propriedades estruturais e funcionais, sendo a secagem uma das etapas mais importantes (Groult et al., 2021). Esse processo é essencial para o armazenamento e conservação dos hidrogéis, pois influencia diretamente características como morfologia, porosidade e capacidade de reidratação (Gun'ko et al., 2017). É uma forma de otimizar a logística de produção, sobretudo quando se utilizam matérias primas com baixo teor de sólidos, como é o caso das MFC.

A técnica de secagem por *spray drying* destaca-se como alternativa eficiente e escalonável para a produção de nanocelulose seca, sendo mais econômica comparada a outras técnicas, como a liofilização e a secagem supercrítica. Essa técnica contínua, amplamente utilizada em diversas indústrias, facilita a transferência rápida de calor e massa, tornando-se adequada para materiais sensíveis ao calor (Setter et al., 2023 a,b). Além disso, seus parâmetros podem ser ajustados para obter propriedades específicas nos materiais secos.

A escolha da técnica de secagem é um fator decisivo para a estrutura e funcionalidade dos hidrogéis, influenciando diretamente suas propriedades estruturais e funcionais e, consequentemente, sua eficácia nas aplicações agrícolas. O estudo do comportamento reológico

do material seco, após hidratação, permite a análise prévia dessas propriedades, permitindo a otimização do processamento dos hidrogéis, potencializando sua capacidade de retenção de água e liberação controlada de nutrientes, e, consequentemente, promovendo soluções agrícolas mais eficientes e sustentáveis.

O objetivo deste trabalho foi, portanto, estudar o impacto da secagem por *spray drying* sobre as propriedades de hidrogéis a base de MFC, por meio de ensaios reológicos.

371. Material e métodos

As MFC foram obtidas a partir de polpa comercial de eucalipto branqueada após intumescimento e desfibrilação em Moinho Supermass-colloider Masuko Sangyo MKGA-80, conforme metodologia de Mascarenhas et al. (2022).

O preparo dos hidrogéis seguiu metodologia proposta por Silva et al. (2025) e Shashiki et al. (2026), por meio da reticulação iônica da mistura de MFC e alginato de sódio com solução de $CaCl^{2+}$.

Parte do material foram submetida ao processo de secagem utilizando um equipamento Mini Spray dryingLM MSDi 1.0 (LabMaq, Brasil), conforme sugerido por Setter et al. (2023a,b). Foram utilizadas as seguintes condições experimentais: vazão de ar de secagem de 0,64 m³/min, vazão de alimentação de 0,3 L/h, vazão de ar comprimido de 30 L/min durante a atomização, e a temperatura da câmara de entrada ajustada para 150 °C. Essas condições foram previamente definidas com base em testes preliminares, com o objetivo de otimizar a eficiência do processo e garantir a preservação das propriedades estruturais e funcionais dos hidrogéis.

Para a análise morfológica foram avaliados o material seco em *spray drying* e, como controle, o hidrogel original, neste caso, liofilizado para permitir a análise pela técnica. As amostras foram preparadas por meio de corte criogênico utilizando N^2 líquido, fixação em *stubs* com auxílio de fita dupla-face de carbono e metalização em aparelho evaporador de ouro (modelo SCD 050). As amostras foram observadas em em microscópio eletrônico de varredura STEM - FEG, modelo CLARA – TESCAN (Oberkochen, Alemanha), sob as seguintes condições: tensão de aceleração 15 kV, distância de trabalho de 10 mm, com detector Everthart-Thornley (E-T), operando sob vácuo. As magnificações foram padronizadas de modo a permitir a visualização de detalhes na morfologia.

A reologia dos hidrogéis foi avaliada em reômetro rotacional (Anton Paar MCR102e, Austria) utilizando conjunto de medição de placas paralelas com célula P-PTD220

SN84437112 e placas de mensuração D-PP25 SN000000. Foram realizados os testes oscilatórios de varredura de amplitude, varredura de frequência e rampa de temperatura (aquecimento – arrefecimento), avaliando o comportamento dos módulos elástico, ou de armazenamento (G') e viscoso, ou de perda (G''). A varredura de amplitude foi realizada a uma frequência constante de 10 s^{-1} e deformação oscilando de 0,01 a 100%. Foram determinados também o limite da região linear viscoelástica (LVER) e o ponto de cruzamento dos módulos. A varredura de frequência foi realizada em uma rampa variando de 0,1 a 100 $rads^{-1}$, com taxa de deformação constante dentro da região linear viscoelástica. Já a rampa de temperatura e arrefecimento foi conduzida em uma faixa de 25 º C a 90 º C e 90 º C a 25 º C, respectivamente, taxa de deformação de cisalhamento de 0,1% e frequência de 1 Hz. Foram avaliados o material seco em *spray drying* após ressuspensão em água (2 % m/v) e o hidrogel original, úmido (2% de sólidos totais), como controle. Os testes reológicos foram realizados em triplicata.

3. Resultados e discussão

A Figura 1 apresenta a morfologia dos hidrogéis controle e submetidos à secagem em *spray drying.*

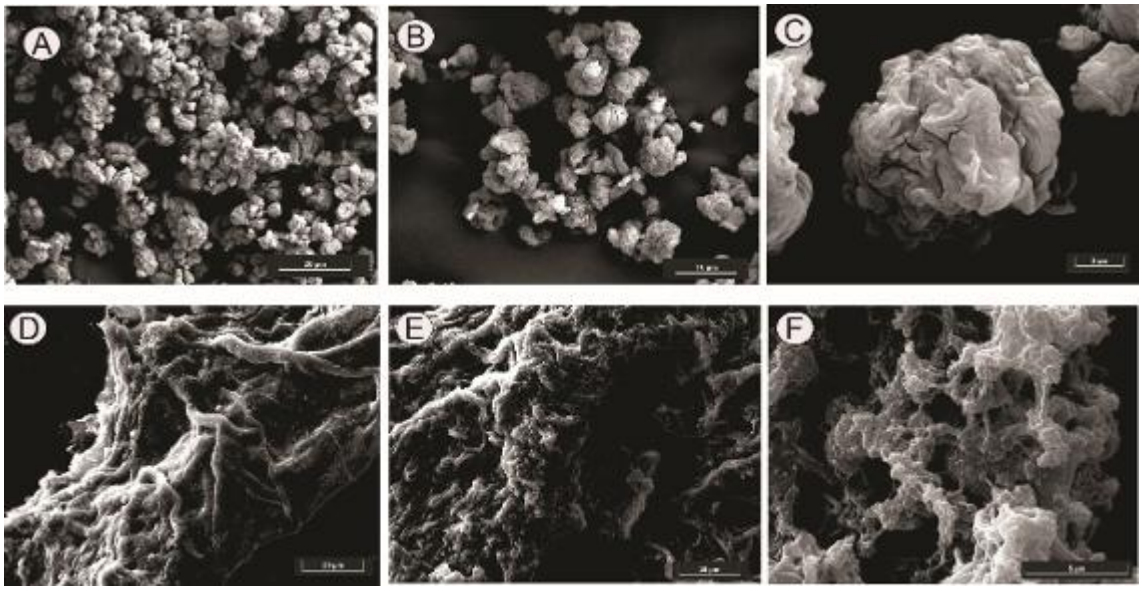


Figura 1 - Morfologia de hidrogéis a base de micro/nanofibrilas de celulose e alginato de sódio. A – C: hidrogéis submetidos à secagem em spray-drying (aumentos 3 kx, 4 kx e 20 kx, respectivamente); D – F: hidrogéis controle (aumentos 3 kx, 4 kx e 20 kx, respectivamente).

A análise por microscopia eletrônica de varredura (MEV) evidenciou alterações expressivas na microestrutura dos hidrogéis após a secagem por *spray drying* (Figura 1A–C) em comparação ao material original (Figura 1D–F). Após a secagem, observou-se a formação de partículas heterogêneas e de morfologia irregular, com predominância de aglomerados com aproximadamente 3–6 µm, além de partículas menores, entre 1–2 µm, e estruturas aglomeradas maiores, que atingiram aproximadamente 10–15 µm. A ampla distribuição de tamanhos sugere que, embora a atomização tenha promovido a fragmentação do material em partículas micrométricas, ocorreu simultaneamente associação entre as estruturas durante e/ou após a remoção da água.

A formação desses aglomerados pode estar relacionada à elevada área superficial e à alta energia superficial características das MFC, que favorecem fortes interações interfibrilares (Setter et al., 2023a,b). Durante a secagem em *spray drying*, a rápida evaporação da água aproxima progressivamente as fibrilas, aumentando a possibilidade de formação de ligações de hidrogênio entre grupos hidroxila adjacentes. Como consequência, as estruturas inicialmente hidratadas podem sofrer contração, colapso parcial e associação irreversível entre fibrilas, fenômenos relacionados à hornificação da celulose. Esse mecanismo ajuda a explicar tanto a formação de agregados quanto a maior compactação observada nas amostras secas.

As diferenças entre os materiais tornam-se ainda mais evidentes quando comparadas as micrografias obtidas antes e após a secagem. O hidrogel original (Figura 1D–F) apresenta uma estrutura tridimensional mais aberta e heterogênea, caracterizada pela presença de cavidades e regiões porosas distribuídas ao longo da matriz. Essa arquitetura é consistente com uma rede polimérica altamente hidratada, na qual a água mantém as fibrilas afastadas e contribui para a preservação dos espaços vazios. Em contraste, nas amostras submetidas ao *spray drying* (Figura 1A–C), essa organização porosa é substancialmente reduzida, dando origem a partículas mais densas e compactadas. Essa alteração sugere que a rápida remoção da água durante a secagem promoveu o colapso parcial dos espaços originalmente ocupados pela fase aquosa e a aproximação das fibrilas. Em contraponto, para permitir o preparo de amostra para visualização em microscopia eletrônica, os hidrogéis originais foram submetidos à liofilização, processo em que a água congelada presente nas cavidades é removida por sublimação, preservando a estrutura porosa e reduzindo a hornificação.

Apesar da redução da estrutura porosa, as partículas obtidas por *spray drying* mantiveram superfícies predominantemente irregulares e rugosas, característica também observada no hidrogel original. Essa rugosidade pode refletir a organização heterogênea das

MFC e a presença de fibrilas e agregados na superfície das partículas. Silva et al. (2025) relacionaram características superficiais de hidrogéis à sua interação com a água e ao comportamento de intumescimento. Entretanto, a manutenção da rugosidade após a secagem não implica necessariamente preservação integral da capacidade de absorção do hidrogel, uma vez que a redução da porosidade e o aumento das interações interfibrilares decorrentes da secagem podem limitar a acessibilidade da água ao interior da matriz.

Dessa forma, as micrografias indicam que o *spray drying* promoveu uma reorganização significativa da estrutura das MFC, convertendo a rede porosa e altamente hidratada do hidrogel original em partículas micrométricas mais compactas e aglomeradas, porém com manutenção parcial da heterogeneidade e rugosidade superficial.

Na Figura 2 é apresentado o comportamento reológico dos hidrogéis controle e aqueles submetidos à secagem em *spray drying.*

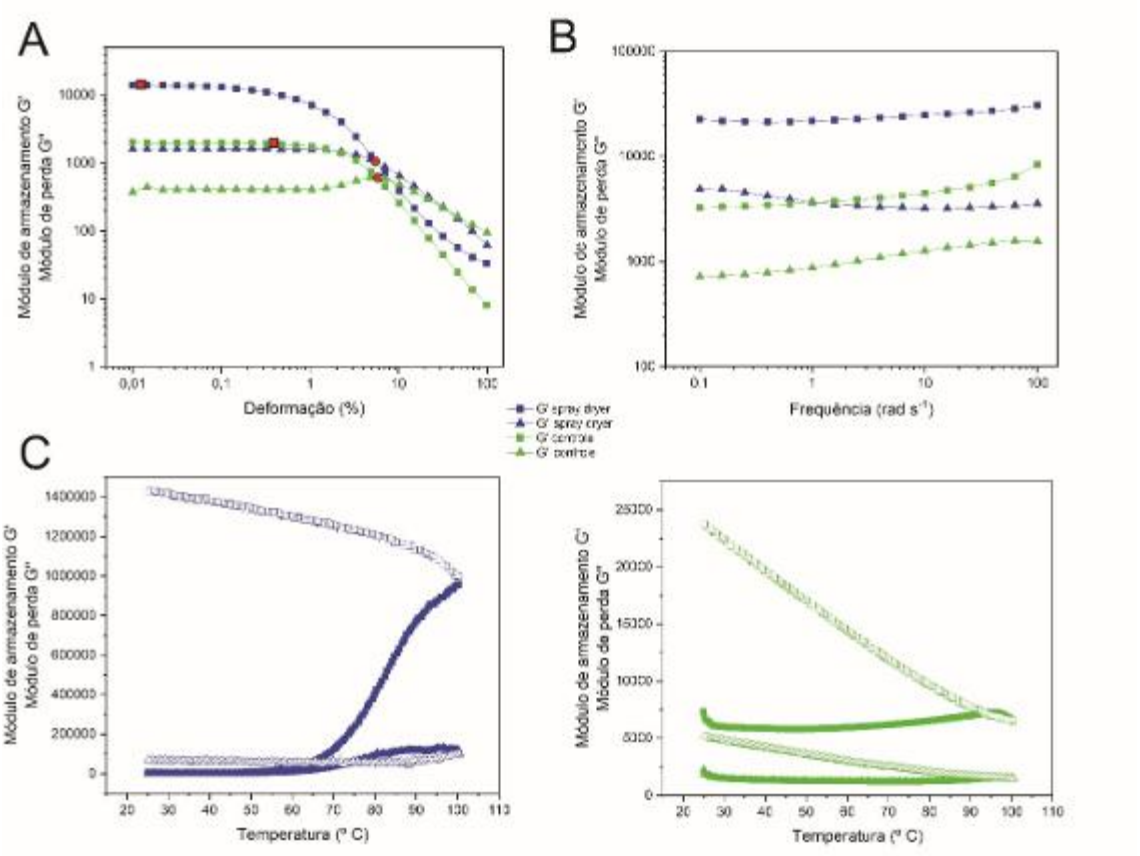


Figura 2 – Comportamento reológico de hidrogéis a base de micro/nanofibrilas de celulose e alginato de sódio. A: varredura de amplitude; B: varredura de frequência; C: rampa de temperatura. Quadrados e esferas em vermelho indicam, respectivamente, o limite da região linear viscoelástica (LVER) e o ponto de cruzamento de módulos. Para a rampa de temperatura

símbolos com preenchimento correspondem à rampa de aquecimento e símbolos sem preenchimento representam a rampa de arrefecimento.

O predomínio do módulo de armazenamento (G') na varredura de amplitude (Figura 2 A) indica a formação de um gel forte sob baixa deformação. Os maiores valores de G' observados nas amostras submetidas à secagem em *spray drying* indicam maior rigidez estrutural inicial. Esse comportamento pode ser atribuído à formação de uma rede mais compacta ou maior número de interações físicas, fato já comprovado pela análise morfológica (Figura 1A-C). Apesar da maior rigidez inicial, os hidrogéis secos em *spray drying* apresentaram curta região viscoelástica linear, evidenciado pelo baixo LVER. Além disso, o ponto de cruzamento dos módulos nessas amostras foi ligeiramente mais precoce em relação ao controle. Isso evidencia maior interferência da deformação e perda da estrutura de gel mais facilmente. Esse comportamento pode estar associado à hornificação e agregação das MFC durante o processo secagem, o que promove uma rede mais compacta, porém menos flexível e menos homogênea (Xu et al., 2022). Assim, a matriz apresenta maior resistência em pequenas deformações, mas rompe estruturalmente mais cedo quando submetida a amplitudes crescentes. Não obstante, esse comportamento pode ser favorável a certas aplicações agrícolas, como enraizamento de mudas e germinação de sementes, em que a estrutura deve ceder para permitir o desenvolvimento radicular (Silva et al., 2025; Shashiki et al., 2026).

Relativo à varredura de frequência (Figura 2B), o predomínio de G' em toda a faixa de estudo reforça a estrutura de gel forte, com pouca dependência da frequência, para ambas as amostras. A amostra submetida ao *spray drying* apresentou os maiores valores de G′ e menor dependência da frequência, indicando a formação de uma rede mais rígida e estável sob pequenas deformações oscilatórias. Esse comportamento pode ser atribuído à maior aproximação entre as MFC durante a secagem, favorecendo interações fibrila–fibrila e fibrila–alginato. Entretanto, quando associado à menor LVER observada na varredura de amplitude, esse aumento de rigidez sugere uma rede mais compacta e menos flexível, capaz de resistir melhor a pequenas perturbações, mas mais suscetível à ruptura estrutural sob deformações crescentes.

A rampa de temperatura (Figura 2C) revela um aumento intenso de G' a partir de 65 ºC, aproximadamente, para as amostras submetidas à secagem por *spray drying*. Isso pode indicar reorganização estrutural induzida pela temperatura, com intensificação de interações fibrila-fibrila, redução da mobilidade da água e possível formação de uma rede mais rígida

durante o aquecimento. Essa mesma amostra apresentou alto *gap* nos valores de G' para aquecimento *x* arrefecimento, indicando alta histerese, provavelmente devida a alterações irreversíveis, como compactação, agregação de fibrilas ou rearranjo da rede polimérica. A amostra controle também apresenta diferenças entre a rampa de aquecimento e arrefecimento, porém o *gap* é menor, demonstrando histerese menos intensa. Além disso, há pouca alteração dos módulos ao longo do aquecimento, indicando maior mobilidade molecular.

Em suma, os resultados reológicos apontam para maior compactação estrutural dos hidrogéis submetidos ao processo de secagem por *spray drying* (corroborado pelas imagens de MEV), seja por interações interfibrilares ou pela hornificação da estrutura, proporcionando uma rede com menor mobilidade, o que provavelmente impactou negativamente na retenção de água. Alterações nos parâmetros operacionais, bem como processos de modificação química e superficial das MFC devem ser estudados a fim de otimizar o processo de secagem, com menor impacto estrutural e menores índices de aglomerações. Como sugestões para estudos futuros, pode-se considerar a adição de componentes na formulação que atuem como barreira física, dificultando a reagregação fibrilar, como o glicerol, por exemplo, comprovadamente eficaz na redução da hornificação de fibras de celulose (Schreeb et al., 2025). Em adição, reações que alterem as interações interfibrilares podem ser consideradas, tais como a carboximetilação (Wei et al., 2019), oxidação mediada por TEMPO (Onyianta et al., 2023) e enxertia ou adsorção de outros polímeros, como a carboximetilcelulose (Kim et al., 2021).

4. Conclusões

A secagem por *spray drying* determinou compactação estrutural com impacto negativo sobre o intumescimento e a capacidade de retenção de água de hidrogéis a base de nanocelulose

A alteração de variáveis operacionais, como adição de componentes na formulação que atuem como barreira física na interação intrafibrilar, bem como estudos de modificação química e superficial das MFC que dificultem sua reagregação podem ser considerados, a fim de otimizar o processo de secagem, com menor impacto estrutural, menor índice de aglomerações e maior desempenho após processo de reidratação.

5. Agradecimentos

Os autores agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) pelo apoio financeiro e incentivo ao desenvolvimento da pesquisa científica. Também expressam seus agradecimentos ao Conselho Nacional de Desenvolvimento

Científico e Tecnológico (CNPq), à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), à Universidade Federal de Lavras (UFLA) e ao Laboratório de Engenharia de Biomateriais pelo suporte técnico, científico e estrutural disponibilizado ao longo da pesquisa.

6. Referências bibliográficas

Groult, S., Buwalda, S., & Budtova, T. (2021). Pectin hydrogels, aerogels, cryogels, and xerogels: Influence of drying on structural and release properties. European Polymer Journal, 149, 110386. https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2021.110386

Gun'ko, V., Savina, I., & Mikhalovsky, S. (2017). Properties of water bound in hydrogels. Gels, 3(4), 37. https://doi.org/10.3390/gels3040037

Kim, Y., McCoy, L.T., Feit, C., Mubaraka, S.A., Sharma, S., Minko, S. (2021). Carboxymethyl Cellulose Enhanced Production of Cellulose Nanofibrils. Fibers, 9 (9), 57. https://doi.org/10.3390/fib9090057

Mahinroosta, M., Jomeh Farsangi, Z., Allahverdi, A., & Shakoori, Z. (2018). Hydrogels as intelligent materials: A brief review of synthesis, properties, and applications. Materials Today Chemistry, 8, 42–55. https://doi.org/10.1016/j.mtchem.2018.05.002

Mascarenhas, A. R. P., Scatolino, M. V., Dias, M. C., Martins, M. A., De Melo, R. R., Damásio, R. A. P., Mendonça, M. C., & Tonoli, G. H. D. (2022). Fibers pre-treatments with sodium silicate affect the properties of suspensions, films, and quality index of cellulose micro/nanofibrils: Effect of Na_2SiO_3. Nordic Pulp & Paper Research Journal. https://doi.org/10.1515/npprj-2022-0037

Michalik, R., & Wandzik, I. (2020). A mini-review on chitosan-based hydrogels with potential for sustainable agricultural applications. Polymers, 12(10), 2425. https://doi.org/10.3390/polym12102425

Onyianta, A.J., Xu, G., Etale, A., Eloi, J., Eichhorn, S.J. (2023). Tackling the challenge of drying and redispersion of cellulose nanofibrils via membrane-facilitated liquid phase

exchange. Carbohydrate Polymers, 314, 120943. https://doi-org.ez26.periodicos.capes.gov.br/10.1016/j.carbpol.2023.120943

Setter, C., Dias, M. C., Mascarenhas, A. R. P., Tonoli, G. H. D., & Oliveira, T. J. P. (2023b). Effect of different pre-treatments on the redispersion capacity of spray-dried microfibrillated cellulose: Elaboration and characterization of biofilms. International Journal of Biological Macromolecules, 243, 125279. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.125279

Setter, C., Mascarenhas, A. R. P., Dias, M. C., Meira, A. C. F. O., Carvalho, N. T. S., Lorenço, M. S., Martins, M. A., Tonoli, G. H. D., & Oliveira, T. J. P. (2023a). Surface modification of cellulosic nanofibrils by spray drying: Drying yield and microstructural, thermal and chemical characterization. Industrial Crops and Products, 201, 116899. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2023.116899

Schreeb, A., Sjöstrand, B., Ek, M., Henriksson, G. (2025). Drying and hornification of swollen cellulose. Cellulose, 32, 5179 -5189. https://doi.org/10.1007/s10570-024-06352-3

Shashiki, E. A. A., do Lago, R. C., Silva, C. A., et al. (2026). Performance of paper waste-derived nanocellulosic hydrogels as new eco-friendly alternatives for in vitro germination and early growth of Coffea arabica. BioNanoScience, 16, 464. https://doi.org/10.1007/s12668-026-02704-4

Silva, C. A., Sashiki, E. A. A., do Lago, R. C., et al. (2025). Biodegradable hydrogel microspheres from paper waste as a substrate for ex vitro adventitious rooting and acclimatisation of Eucalyptus grandis × E. urophylla clonal plants. Plant Cell, Tissue and Organ Culture, 163, 106. https://doi.org/10.1007/s11240-025-03308-8

Wei, J., Zhou, Y., Lv, Y., Wang, J., Jia, C., Liu, J., Zhang, X., Sun, J., Shao, Z. (2019). Carboxymethyl Cellulose Nanofibrils with a Treelike Matrix: Preparation and Behavior of Pickering Emulsions Stabilization. ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 7 (15), 12887 – 12896. https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.9b01822

Wu, Y., Li, S., & Chen, G. (2024). Hydrogels as water and nutrient reservoirs in agricultural soils: A comprehensive review of classification, performance, and economic advantages. Environment, Development and Sustainability, 26, 24653–24685. https://doi.org/10.1007/s10668-023-03706-y

Xu, Y., Xu, Y., Chen, H., Gao, M., Yue, X., & Ni, Y. (2022). Redispersion of dried plant nanocellulose: A review. Carbohydrate Polymers, 294, 119830. https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2022.119830

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Compostos Fenólicos nos Extratos de Espécies Florestais do Nordeste Brasileiro

Denys Santos de Souza[1]; Tatiane Kelly Barbosa de Azevedo[1]; Kayo Lucas Batista de Paiva[1]; Paula Evanyn Pessoa do Nascimento[1];Wilkally Crislian Laynne de Moura[1]; Kedma Carla Santana do Nascimento[1]; Laizy Nascimento dos Santos[1]; Fernando Hermínio Ferreira Milheiro Nunes[2]

[1]Escola Agrícola de Jundiaí. Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN).
[2]Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro (UTAD).

Resumo: Os compostos fenólicos das plantas têm grande valor por suas funções biológicas e também pelo alto potencial de uso nas áreas medicinal, alimentícia, agrícola e ambiental. Este trabalho teve como objetivo quantificar os compostos fenólicos da casca das espécies arbóreas sabiá (*Mimosa caesalpiniifolia*), jurema preta (*Mimosa tenuiflora*) e angico vermelho (*Anadenanthera colubrina*), usando diferentes solventes. A metodologia foi a extração com diferentes solventes e a quantificação dos fenólicos foi pelo método Prussian Blue, com leitura em espectrofotômetro. Os resultados mostraram que o angico vermelho apresentou os maiores teores de fenólicos, enquanto a água foi mais eficaz para o sabiá. É possível concluir que a eficiência da extração varia conforme a espécie e o solvente usado, sendo indicadas novas pesquisas para avaliar e descrever os compostos fenólicos extraídos, ampliando o saber sobre seus usos e incluindo a eficiência do método usado e o efeito dos atributos de cada uma das espécies.

Palavras-chave: Fitoquímica; Bioativos; Metabólitos secundários.

Phenolic Compounds in Extracts of Forest Species from Northeastern Brazil

Abstract: Phenolic compounds from plants have great value for their biological functions and also for their high potential for use in medicinal, food, agricultural and environmental areas. This work aimed to quantify the phenolic compounds in the bark of the tree species sabiá (*Mimosa caesalpiniifolia*), jurema preta (*Mimosa tenuiflora*) and angico vermelho (*Anadenanthera colubrina*), using different solvents. The methodology was extraction with different solvents and the quantification of phenolics was using the Prussian Blue method, with spectrophotometer reading. The results showed that angico vermelho had the highest phenolic content, while water was more effective for thrush. It is possible to conclude that the extraction efficiency varies depending on the species and the solvent used, and further research is advised to evaluate and describe the extracted phenolic compounds, expanding knowledge about their uses and With the efficiency of the method used and the effect of the attributes of each species.

Keywords: Phytochemistry; Bioactives; Secondary metabolites.

1. Introdução

A Caatinga ocupa grande parte da região Nordeste do Brasil, estendendo-se ao norte de Minas Gerais, e constitui um bioma de elevada biodiversidade, caracterizado pela interação entre fatores climáticos, geomorfológicos, hidrológicos, pedológicos e botânicos, embora ainda seja uma das regiões biogeográficas menos investigadas do país (Melo et al., 2023). Estudos demonstram que diversas espécies da Caatinga são ricas em metabólitos secundários, especialmente compostos fenólicos, os quais desempenham importante papel nos mecanismos de defesa e adaptação das plantas (Naczk e Shahidi, 2006).

Além disso, os compostos fenólicos destacam-se pela elevada diversidade estrutural e pelo potencial na prevenção de doenças, bem como por suas propriedades antioxidante, antimicrobiana, antiviral e anticarcinogênica, além de contribuírem para a estabilidade oxidativa dos alimentos (Silva, 2020; Ignat et al., 2010; Naczk e Shahidi, 2006; Tanase et al., 2014). Em razão dessas características, esses metabólitos vêm sendo amplamente investigados para o desenvolvimento de produtos farmacêuticos, destacando-se as espécies lenhosas como importantes fontes de compostos bioativos e de interesse para o aproveitamento sustentável (Ignat et al., 2010; Tanase et al., 2019).

Dentre as espécies lenhosas da Caatinga com potencial para obtenção de compostos bioativos, destaca-se a *Mimosa caesalpiniifolia* Benth., conhecida como sabiá ou sansãodocampo. Trata-se de uma espécie da família Fabaceae amplamente distribuída no Nordeste brasileiro, caracterizada pelo rápido crescimento, elevada capacidade de regeneração, tolerância à seca e importância econômica, sendo utilizada na produção de madeira, mourões, lenha, carvão, cercas vivas e na recomposição vegetal (Passos et al., 2007; Melo et al., 2018; Muniz et al., 2024).

Além de seu valor econômico, a espécie é amplamente empregada na medicina tradicional, principalmente em processos de cicatrização e no tratamento da bronquite. Estudos fitoquímicos demonstraram a presença de diversos metabólitos secundários, como fenóis, antocianinas, esteroides, catequinas e elevadas concentrações de taninos, evidenciando seu potencial farmacológico e antioxidante e reforçando a necessidade de novas investigações sobre suas propriedades bioativas (Oliveira et al., 2020).

Outra espécie de destaque é *Mimosa tenuiflora*, conhecida como jurema preta, um arbusto arbóreo amplamente distribuído no Nordeste do Brasil e em Minas Gerais, com grande importância econômica, social e medicinal, sendo utilizada na pecuária, produção de cercas, carvão e lenha, além do tratamento de queimaduras, acne, inflamações e infecções. A espécie também apresenta propriedades analgésicas, antipiréticas, adstringentes e regeneradoras

celulares, além de relevante importância cultural e espiritual para povos indígenas (Santos et al., 2012; Lucena et al., 2014).

De forma semelhante, o angico vermelho apresenta ampla distribuição nas regiões Nordeste, Centro Oeste, Sudeste e Sul do Brasil e destaca-se por seus múltiplos usos. Sua madeira, de alta densidade e durabilidade, é empregada na construção civil, marcenaria, fabricação de móveis, cercas, postes, lenha e carvão, enquanto a casca, rica em taninos, é utilizada nas indústrias de curtimento e tintas, além de fornecer goma-resina substituta da goma arábica (Pareyn et al., 2018; Zufo et al., 2025).

No âmbito medicinal, a espécie é amplamente utilizada, especialmente por meio da casca e da entrecasca, devido às suas propriedades terapêuticas, enquanto a resina e a infusão da casca são empregadas no tratamento de gripe, tosse, bronquite, afecções pulmonares e processos inflamatórios. Além disso, apresenta ação depurativa, adstringente, antirreumática, cicatrizante, expectorante e anti-inflamatória, sendo também utilizada no tratamento de furúnculos, ferimentos, dores abdominais e quadros alérgicos (Maia, 2004; Zufo et al., 2025).

Diante desse potencial, a crescente demanda por novos fármacos eficazes contra microrganismos têm impulsionado a busca por compostos naturais de origem vegetal com atividade antimicrobiana (Bezerra et al., 2012). Nesse contexto, a investigação de espécies da Caatinga e a quantificação de seus compostos fenólicos contribuem para ampliar o conhecimento sobre um dos biomas brasileiros menos explorados cientificamente, evidenciando seu potencial farmacêutico, alimentício e cosmético, além de favorecer o uso sustentável da biodiversidade, fortalecer estratégias de conservação, valorizar as espécies nativas e subsidiar futuras pesquisas voltadas à prospecção de compostos bioativos e à inovação tecnológica.

2. Material e métodos

Caracterização da área

Foram utilizadas cinco árvores saudáveis de sabiá (*Mimosa caesalpiniifolia*), jurema preta (*Mimosa tenuiflora*) e angico vermelho (*Anadenanthera colubrina*) obtidas em plantios florestais, localizadas na Área Experimental da Unidade Acadêmica Especializada em Ciências Agrárias (UAECIA), da Escola Agrícola de Jundiaí (EAJ), da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), município de Macaíba-RN. O solo é classificado como latossolo amarelo de textura arenosa e topografia plana (BELTRÃO et al.1975). O clima local é uma

transição entre os tipos As e BSw caracterizado como tropical chuvoso, de acordo com a classificação de Köppen com temperatura média anual de 27,1°C, umidade relativa anual de 76% e precipitação pluviométrica variando entre 863,7 e 1.070,7 mm (IDEMA, 2013).

Coleta e preparo das amostras

Foram coletadas cascas de plantas com boas características fitossanitárias e sem ataques de insetos. Suas cascas foram separadas do fuste com auxílio de um facão. Em seguida, foram secas ao ar em casa de vegetação, moídas em uma forrageira (e as amostras de cada espécies foram homogeneizadas) e foi peneirado e utilizado o material retido na peneira de 40 mesh (440mm) para a seleção de um material de granulometria homogênea.

Extração e quantificaçãodos compostos fenólicos totais

Para a obtenção dos extratos enriquecidos em compostos fenólicos, as cascas de sabiá, jurema preta e angico vermelho moídas e selecionadas, foram pesadas cerca de 0,500 g de cada amostra. As extrações foram realizadas utilizando 50,0 mL de três solventes distintos (metanol, água e acetona), em procedimentos independentes, durante 1 hora à temperatura ambiente, sob agitação orbital a 300 rpm. Ao término da extração, os extratos foram filtrados em papel de filtro para remoção do material particulado. Os compostos fenólicos totais foram mensurados pelo método Prussian Blue Test desenvolvido por Price e Butler, (1977). Para as análises foram utilizados 5mL de hexahidrato de cloreto de ferro (III) 0.1M ($FeCl_3.6H_2O$) em HCl 0.1M, onde foram adicionados a 50µl de extrato, seguido imediatamente pela adição de 5mL de hexacianoferrato de potássio (III) ($K_3Fe(CN)_6$) 0.008M. As absorvâncias foram lidas após 10 min em células de 1 cm de comprimento de onda a 720 nm em espectrofotômetro (Thermo Scientific Genysis 50) que foi zerado com água. Foi elaborada uma curva de calibração do ácido gálico e analisadas seguindo as condições utilizadas nos extratos e os resultados foram expressos em equivalentes de ácido gálico. Todas as análises foram realizadas em triplicata.

Os dados obtidos foram submetidos à análise estatística utilizando o software ASSISTAT, empregando-se um delineamento fatorial com dois fatores (espécie vegetal × solvente extrator). As médias foram comparadas pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade ($p \leq 0,05$).

3. Resultados e discussão

A análise estatística (Tabela 1) demonstrou que a eficiência da extração dos compostos fenólicos foi influenciada pela interação entre a espécie vegetal e o solvente utilizado, o angico vermelho apresentou maior teor de compostos fenólicos quando extraído com metanol, diferindo significativamente dos demais solventes. Para o sabiá, a extração aquosa proporcionou o maior rendimento, indicando maior solubilidade dos compostos fenólicos em solvente de elevada polaridade. Na jurema preta, não houve diferença significativa entre as extrações com acetona e metanol, evidenciando eficiência semelhante desses solventes na recuperação dos compostos fenólicos.

Tabela 6 - Teores de compostos fenólicos totais (mg EAG g^{-1} de casca) das espécies*Anadenanthera* colubrina (angico vermelho), *Mimosa caesalpiniifolia* (sabiá) e*Mimosa tenuiflora* (jurema preta). E os solventes extratores, água, acetona e metanol

Espécie	Solventes		
	Água	**Acetona**	**Metanol**
Anadenanthera colubrina	159,53 aB	123,01 aC	289,68 aA
Mimosa caesalpiniifolia	78,42 bA	64,18 bB	68,23 cAB
Mimosa tenuiflora	69,05 bB	111,42 aA	114,56 bA

Letras minúsculas indicam a comparação entre as espécies dentro de cada solvente, enquanto as letras maiúsculas representam a comparação entre os solventes dentro de cada espécie. Médias seguidas por letras minúsculas iguais na coluna e letras maiúsculas iguais na linha não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$).

Na comparação entre as espécies, o angico vermelho apresentou os maiores teores de compostos fenólicos nas extrações com água e metanol, enquanto a jurema-preta obteve melhor desempenho com acetona. O sabiá apresentou os menores teores na maioria das condições avaliadas. Esses resultados indicam que a eficiência da extração depende não apenas da polaridade do solvente, mas também da composição química e da distribuição dos compostos fenólicos em cada espécie, evidenciando a importância da seleção do solvente conforme as características do material vegetal.

A Figura 1 permite visualizar de forma mais clara a amplitude da variação dos teores de compostos entre as espécies e os solventes de extração. *Anadenanthera colubrina* apresentou os maiores teores, especialmente na extração com metanol, destacando-se das demais espécies. A *Mimosa caesalpiniifolia* apresentou pequenas variações entre os solventes, indicando menor influência do extrator na recuperação dos compostos fenólicos. Por sua vez, *Mimosa tenuiflora* apresentou comportamento intermediário, com aumento dos teores nas extrações com solventes orgânicos, sugerindo maior afinidade de seus compostos fenólicos por esses extratores.

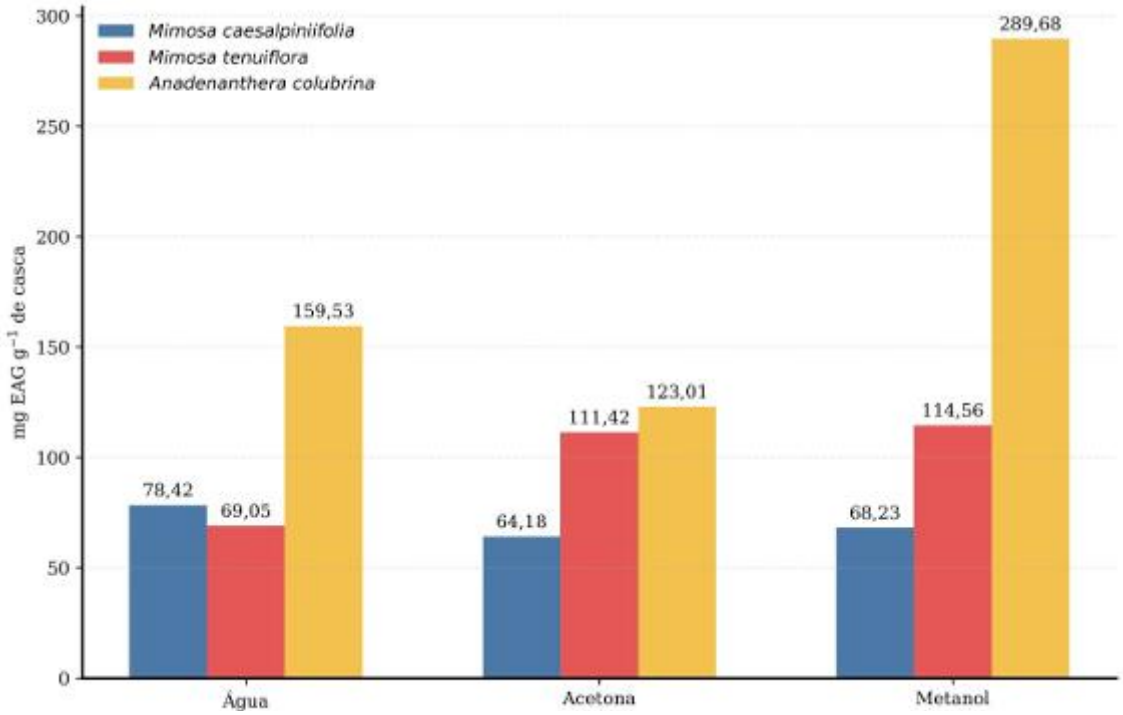


Figura 1 - Comparação entre teores de fenólicos de sabiá (*Mimosa caesalpiniifolia*), jurema preta (*Mimosa tenuiflora*) e angico vermelho (*Anadenanthera colubrina*) com os diferentes solventes.

Resultados semelhantes quanto à influência do solvente de extração foram observados por Rocha et al. (2011), que avaliaram compostos fenólicos em frutos nativos do Cerrado pelo método de Folin-Ciocalteu. No caso das espécies de *Anacardium*, verificou-se que os extratos obtidos com metanol apresentaram, de modo geral, os maiores teores de compostos fenólicos totais, seguidos pelos extratos etanólicos e acetônicos. No presente estudo, comportamento semelhante foi observado para jurema preta e angico vermelho, cujos maiores teores de compostos fenólicos também foram obtidos com o metanol, evidenciando que a resposta ao solvente depende não apenas de sua polaridade, mas também da composição química da espécie vegetal e do tecido analisado.

Ainda sobre o trabalho de Rocha et al. (2011) metanol foi o solvente mais eficiente, exatamente como ocorreu para jurema preta e, principalmente, para angico vermelho no estudo, isso permite sustentar que o metanol apresenta elevada eficiência na extração de compostos fenólicos em diferentes espécies vegetais. A única exceção no trabalho foi o sabiá, em que a água apresentou maior rendimento, possivelmente devido à predominância de metabólitos de maior polaridade. Essa interpretação é corroborada por Monção et al. (2015), que identificaram ácidos fenólicos, flavonoides e taninos na casca da espécie e observaram

elevado teor de fenólicos na fração aquosa na casca do sabiá, resultado que pode estar relacionado às características químicas dos compostos presentes na casca da espécie.

A capacidade antioxidante de extratos vegetais apresenta estreita relação com o teor de compostos fenólicos totais, sendo amplamente reconhecido que concentrações mais elevadas desses metabólitos estão associadas à maior potencial antioxidante (Sá et al., 2012). Entretanto, a comparação entre estudos deve ser realizada com cautela, especialmente quando são empregados diferentes métodos de extração e quantificação, no presente trabalho, os compostos fenólicos foram determinados pelo método Prussian Blue, enquanto Rocha et al. (2011) utilizaram o método de Folin-Ciocalteu, o que impede uma comparação quantitativa direta entre os valores obtidos. Dessa forma, o estudo de Rocha et al. (2011) é utilizado apenas como referência qualitativa para discutir a influência do solvente sobre a recuperação de compostos fenólicos.

Nesse sentido, a maior eficiência do metanol observada para a jurema preta e, principalmente, para o angico vermelho, apresenta comportamento semelhante ao relatado por Rocha et al. (2011), embora os valores absolutos não sejam diretamente comparáveis em razão das diferenças metodológicas. Além dos aspectos metodológicos, fatores intrínsecos ao material vegetal, como a idade da planta, o local de cultivo, as condições climáticas e a época de coleta da casca, também contribuem para a variabilidade dos teores de fenóis totais encontrados entre diferentes estudos (Azevedo et al., 2017; Souza et al., 2021). Portanto, os trabalhos disponíveis na literatura devem ser considerados principalmente como referências para a interpretação das tendências observadas, e não como parâmetros absolutos para comparação dos valores obtidos no presente estudo.

4. Conclusões

O angico vermelho apresentou os maiores teores de compostos fenólicos entre as espécies avaliadas, com destaque para a extração em metanol. A jurema preta apresentou maiores teores nas extrações com acetona e metanol, enquanto o sabiá apresentou maior teor na extração com água. Portanto, a eficiência da extração variou de acordo com a espécie e o solvente utilizado.

Os resultados demonstram o potencial das espécies avaliadas como fontes de compostos fenólicos, especialmente do angico vermelho. Entretanto, são necessários estudos adicionais

para caracterizar os compostos presentes nos extratos e avaliar condições de extração que possibilitem maior recuperação desses metabólitos. O avanço dessas pesquisas contribuirá para o melhor aproveitamento dos recursos florestais e para o desenvolvimento de processos mais eficientes e sustentáveis voltados à obtenção de compostos fenólicos de elevado interesse científico, tecnológico e industrial.

5. Agradecimentos

Agradeço ao Programa de Pós-Graduação da Escola Agrícola de Jundiaí da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN) pela oportunidade de realização deste trabalho. À Fundação Norte-Rio-Grandense de Pesquisa e Cultura (FUNPEC) e à TotalEnergies Brasil LTDA, expresso minha sincera gratidão pelo apoio e incentivo ao desenvolvimento desta pesquisa.

6. Referências bibliográficas

Beltrão, V. A., Freire, L. C. M., & Santos, M. F. (1975). Levantamento Semidetalhado da Área do Colégio 379 Agrícola de Jundiaí – Macaíba/RN. Recife: SUDENE – Recursos de Solos, Divisão de Reprodução, 380 p. 1975.

Bezerra, D. A. C., Rodrigues, F. F. G., Costa, J. G. M. da, Pereira, A. V., Sousa, E. O. de, & Rodrigues, O. G. (2011). Abordagem fitoquímica, composição bromatológica e atividade antibacteriana de *Mimosa tenuiflora* (Wild) Poiret e *Piptadenia stipulacea* (Benth) Ducke. Acta Scientiarum. Biological Sciences, 33(1), 99–106. https://doi.org/10.4025/actascibiolsci.v33i1.5366.

Fernandes, J. M. (2025). Uso do angico *(Anadenanthera colubrina, Leguminosae*) na medicina popular brasileira: uma espécie com distribuição geográfica recém-ampliada para a Amazônia. Em *Ciência em foco* (Vol. XVI, Cap. 4). Pantanal Editora. https://doi.org/10.46420/9786585756570cap4.

Ignat, I., Volf, I., & Popa, V. I. (2011). A critical review of methods for characterisation of polyphenolic compounds in fruits and vegetables. Food Chemistry, 126(4), 1821–1835. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2010.12.026.

Instituto de Desenvolvimento Econômico e Meio Ambiente do Rio Grande do Norte (IDEMA). (2013). Perfil do seu município: Macaíba. IDEMA.

Lucena, R. F. P. de, Abreu, D. B. de O., Leal, J. L. de M., Guerra, N. M., Leite, A. P., Ribeiro, J. E. da S., Ribeiro, J. P. de O., Nunes, E. N., Anselmo, M. da G. V., Alves, C. A. B., Sousa

Junior, S. P. de, Nunes, A. T., Souto, J. S., Carvalho, T. K. N., & Sousa, R. F. de. (2014). Traditional knowledge and use of *Mimosa tenuiflora* (Wild.) Poir. (jurema-preta) in the semi-arid region from Northeastern Brazil. Gaia Scientia, 8(1), 34–50.

Maia, G. N. (2004). Caatinga: árvores e arbustos e suas utilidades. Leitura & Arte.

Melo, J. de O., Dantas-Medeiros, R., Moreira, L. G. L., Giordani, R. B., & Zucolotto, S. M. (2023). A Caatinga: Um bioma exclusivamente brasileiro. Ciência & Cultura, 75(4), 1–9. https://doi.org/10.5935/2317-6660.20230048

Melo, L. A., Abreu, A. H. M., Leles, P. S. S., Oliveira, R. R., & Silva, D. T. (2018). Qualidade e crescimento inicial de mudas de *Mimosa caesalpiniifolia* Benth. produzidas em diferentes volumes de recipientes. Ciência Florestal, 28(1), 47–55. https://doi.org/10.5902/1980509831574.

Monção, N. B. N., Araújo, B. Q., Silva, J. do N., Lima, D. J. B., Ferreira, P. M. P., Airoldi, F. P. S., Pessoa, C., & Citó, A. M. G. L. (2015). Assessing Chemical Constituents of *Mimosa caesalpiniifolia* Stem Bark: Possible Bioactive Components Accountable for the Cytotoxic Effect of M. caesalpiniifolia on Human Tumour Cell Lines. Molecules, 20(3), 4204–4224. https://doi.org/10.3390/molecules20034204.

Muniz, S. P., Felix, J. de L., & Silva, J. A. dos S. (2024). Recuperação de área degradada das margens do Rio Carius utilizando espécies *Mimosa caesalpiniifolia* Benth nativa da Caatinga – planta sabiá, no município de Nova Olinda – CE. Revista Multidisciplinar em Educação e Meio Ambiente, 5(3). https://doi.org/10.51189/integrar/rema/4446

Naczk, M., & Shahidi, F. (2006). Phenolics in cereals, fruits and vegetables: Occurrence, extraction and analysis. Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis, 41(5), 1523–1542. https://doi.org/10.1016/j.jpba.2006.04.002.

Oliveira, J. C. G. de, Linhares, M. G., Linhares, L. G., Câmara, L. M. A., Bertini, L. M., & Alves, L. A. (2020). Capacidade antioxidante e caracterização fitoquímica de *Mimosa caesalpiniifolia*. Research, Society and Development, 9(8), e915986555. https://doi.org/10.33448/rsd-v9i8.6555.

Pareyn, F. G. C., Araújo, E. de L., & Drumond, M. A. (2018). *Anadenanthera colubrina*: Angico. Em L. Coradin, J. Camillo, & F. G. C. Pareyn (Eds.), Espécies nativas da flora brasileira de valor econômico atual ou potencial: plantas para o futuro: região Nordeste (pp. 740–745). Ministério do Meio Ambiente. https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1103448.

Passos, M. A., Tavares, K. M. P., & Alves, A. R. (2007). Germinação de sementes de sabiá (*Mimosa caesalpiniifolia* Benth.). Revista Brasileira de Ciências Agrárias, 2(1), 51–56. https://doi.org/10.5039/agraria.v2i1a542.

Price, M. L., & Butler, L. G. (1977). Rapid visual estimation and spectrophotometric determination of tannin content of sorghum grain. Journal of Agricultural and Food Chemistry,25(6), 1268–1273. https://doi.org/10.1021/jf60214a034.

Rocha, W. S., Lopes, R. M., Silva, D. B., Vieira, R. F., Silva, J. P., & Agostini-Costa, T. S. (2011). Compostos fenólicos totais e taninos condensados em frutas nativas do cerrado. Revista Brasileira de Fruticultura, 33(4), 1215–1221. https://doi.org/10.1590/S0100-29452011000400021.

Sá, P. G. S. de, Guimarães, A. L., Oliveira, A. P. de, Siqueira Filho, J. A., Fontana, A. P., Damasceno, P. K. F., Branco, C. R. C., Branco, A., & Almeida, J. R. G. da S. (2012). Total phenols, total flavonoids and antioxidant activity of Selaginella convoluta (Arn.) Spring (Selaginellaceae). Revista de Ciências Farmacêuticas Básica e Aplicada,33(4), 561–566.

Santos, E. A., Santana, A. E. G., Oliveira, E. P. de S., Santos, J. M., & Albuquerque, U. P. (2012). Etnografia e etnobiologia sobre o uso da jurema-preta (*Mimosa tenuiflora* (Willd.) Poir.) pelos índios Pankararé (Nordeste do Brasil). Revista Ouricuri, 2(1), 55–74. https://doi.org/10.59360/ouricuri.vol2.i1.a6457.

Souza, V. G. (2018). Tecnologias de produção e controle de qualidade da matéria-prima vegetal obtida a partir de folhas de angico (*Anadenanthera colubrina* (Vell.) Brenan var. cebil (Griseb.) Altschul) (Tese de doutorado). Universidade Federal da Paraíba.

Tanase, C., Boz, I., Stingu, A., Volf, I., & Popa, V. I. (2014). Physiological and biochemical responses induced by spruce bark aqueous extract and deuterium depleted water with synergistic action in sunflower (*Helianthus annuus* L.) plants. Industrial Crops and Products, 60, 160–167. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2014.05.039

Tanase, C., Coşarcă, S., Muntean, D.-L., Pellati, F., Mercolini, L., & Sardella, R. (2019). A critical review of phenolic compounds extracted from the bark of woody vascular plants and their potential biological activity. Molecules, 24(6), 1182. https://doi.org/10.3390/molecules24061182.

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Correlação entre parâmetros da extração e composição do óleo essencial de *Corymbia citriodora*

Letícia Costa Peres[1]; Benedito Rocha Vital[1]; Angélica de Cássia Oliveira Carneiro[1]; Iara Fontes Demuner[1]; Êmilly Wakim de Almeida[1], Lawrence Pires de Oliveira[1]

[1] Universidade Federal de Viçosa

Resumo: Óleos essenciais são substâncias compostas aromáticas, sendo *Corymbia citriodora* uma espécie florestal muito utilizada para sua extração. A composição do óleo essencial varia com diversos fatores, dentre eles os parâmetros de extração. Foi utilizado o método de arraste de vapor, com três tempos de extração (1, 2 ou 3 horas) e diferentes massas de folhas (0,5, 1,0 ou 1,5kg de folhas frescas), compondo um delineamento fatorial 3x3. Foi realizada cromatografia gasosa - espectroscopia de massas no óleo essencial obtido em cada extração de forma a identificar a proporção de cada componente. Foram identificados onze componentes. Foi realizada Correlação de Pearson entre tempo, massa de folhas na extração e teor dos componentes no óleo essencial. O componente majoritário, citronelal, apresentou correlação negativa (-0,81) com o tempo de extração e os compostos cariofileno (0,97), acetato de citronelila (0,77) e citronelol (0,72) apresentaram correlação positiva. Quanto a massa de folhas por extração, eucaliptol (0,84) e linalol (0,70) apresentaram correlação positiva. Não há correlação entre o tempo e massa de folhas na extração, de forma que estes agem como fatores independentes. Os parâmetros e extração tempo e massa de folhas influenciam na composição do óleo essencial de *Corymbia citriodora*.

Palavras-chave: citronelal; destilação a vapor; CG-EM.

Correlation between extraction parameters and *Corymbia citriodora* essential oil composition

Abstract: Essential oils are aromatic compounds, and *Corymbia citriodora* is a forest species widely used for their extraction. Essential oil composition varies depending on several factors, including extraction parameters. Steam distillation was employed using three extraction times (1, 2, or 3 hours) and leaf masses (0.5, 1.0, or 1.5 kg of fresh leaves) in a 3x3 factorial design. Gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS) was performed on the essential oil obtained from each extraction to determine the proportion of each component. Eleven components were identified. Pearson correlation analysis was conducted to examine the relationships between extraction time, leaf mass, and component content in the essential oil. The major component, citronellal, showed a negative correlation (-0.81) with extraction time, whereas caryophyllene (0.97), citronellyl acetate (0.77), and citronellol (0.72) showed positive correlations. Regarding leaf mass per extraction, eucalyptol (0.84) and linalool (0.70) showed positive correlations. No correlation was found between extraction time and leaf mass, indicating that they act as independent factors. Extraction time and leaf mass influence the composition of *Corymbia citriodora* essential oil.

Keywords: citronellal; steam distillation; GC-MS.

1. Introdução

Óleos essenciais são substâncias compostas aromáticas produzidas pelo metabolismo secundário de plantas, são matérias-primas das indústrias de fragrâncias, aromas, alimentícia, farmacêutica, cosméticos e produtos de limpeza (Yousefi et al., 2019; Goodine & Oelgemoller, 2020; Radwan et al., 2020).

A composição do óleo essencial varia com a espécie e seu estágio de desenvolvimento, a parte que é utilizada, o método de extração e diversas variáveis edafoclimáticas. No entanto, mesmo com estas variações, existem propriedades esperadas de cada óleo a ser comercializado, sendo essas caracterizadas nas farmacopeias e diferentes normas. Nos gêneros *Eucalyptus* e *Corymbia*, o óleo essencial se concentra nas folhas sendo extraído principalmente pelo método da destilação a vapor ou arraste de vapor (Goodine & Oelgemoller, 2020; ANVISA, 2026).

Apesar de ser um método simples de extração, diversos fatores relacionados aos parâmetros de processo podem influenciar no rendimento e qualidade do óleo essencial, como a proporção de vapor para folhas e o tempo que essas ficam submetidas ao processo de extração. O objetivo deste trabalho é estudar a correlação entre tempo e massa de folhas na extração e a composição do óleo essencial de *Corymbia citriodora*.

2. Material e métodos

2.1 Coleta das folhas

Foram utilizadas folhas de *Corymbia citriodora* (Hook.) K.D. Hill & L.A.S. Johnson coletadas de uma árvore plantada no município de Viçosa-MG, coletadas no período de novembro a dezembro de 2020. As folhas foram coletadas às 7 da manhã, em quantidade suficiente para realização das extrações a serem realizadas no mesmo dia, visando evitar a influência da temperatura e do tempo de armazenamento sobre os tratamentos.

O clima da cidade é do tipo Cwa (Dos Santos et al., 2021), temperado úmido com inverno seco e verão quente. Durante o período de coleta das amostras, a temperatura média foi de 22°C, a umidade relativa média foi de 81% e a pluviosidade somou 196,4mm de chuva, de acordo com os dados obtidos no sistema TEMPO (INMET, 2020). As folhas foram retiradas, com o auxílio de um podão, em diferentes partes da árvore.

2.2 Extração do óleo essencial

Posteriormente, as folhas foram retiradas dos galhos, homogeneizadas e retiradas amostras para as extrações.

As extrações dos óleos essenciais foram realizadas em extrator tipo Clevenger, em inox, modelo SL-76/I, da marca Solab, por destilação a vapor, capacidade volumétrica de 8,5 litros, sendo utilizados 5 litros de água por extração. O óleo essencial foi separado da água (hidrolato) por meio de um funil de separação devido as diferentes densidades. O volume foi mensurado em uma proveta e o óleo essencial armazenado em vidro âmbar. A sequência da extração, com as diferentes combinações dos parâmetros, foi realizada em ordem aleatória.

2.3 Cromatografia gasosa - Espectrometria de massas

As Análises Cromatográficas foram realizadas no Laboratório de Catálise Homogênea e Heterogênea (LabCat) do Departamento de Química da Universidade Federal de Viçosa. Para tanto, as amostras de óleo essencial foram previamente diluídas em hexano (50 µL de amostra para 1 ml de hexano). A composição química das amostras foi obtida por análises qualitativas por cromatografia gasosa acoplada à espectrometria de massas (CG-EM). A análise de CG foi realizada em um equipamento da marca Shimadzu, modelo GC-2010 Plus, equipado com um processador de dados. Utilizou-se uma coluna capilar RTX – 5 (30 m de comprimento × 0,250 mm de diâmetro interno x 0,25 µm de espessura). O programa de temperatura da coluna foi: 40 °C a 240 °C à 3,5 °C/min. As temperaturas do injetor e do detector foram mantidas em 250 °C, o gás de arraste utilizado foi o hélio na pressão de 5,8 psi, em uma taxa de fluxo de entrada 3 mL/min e de fluxo total 46,2 mL/min. O volume injetado das amostras foi de 0,4 µL com um Split de 1:100. As análises no EM foram realizadas em um equipamento da marca Shimadzu, modelo GCMS – QP2010 Ultra, operando em 70eV, e a temperatura da fonte de íon foi mantida em 200 °C. A identificação dos componentes foi realizada, a partir da fragmentação das suas massas, por comparação dos espectros de massa dos componentes aos espectros das bibliotecas de referência NIST17 (NIST, 2017), armazenados na base de dados do EM utilizando o software GC-MS Solutions. Foram obtidos a proporção dos compostos e o tempo de retenção dos compostos na coluna.

2.4 Correlação de Pearson

Foi realizada análise de Correlação de Pearson utilizando software Excel (Microsoft 365) entre tempo de extração (1, 2 ou 3 horas), massa de folhas na extração (0,5, 1,0 ou 1,5kg) e teor dos componentes no óleo essencial de *Corymbia citriodora*.

O fluxograma da metodologia do trabalho está representado na Figura 1.



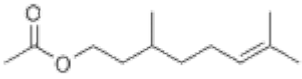
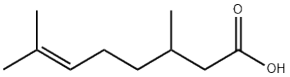
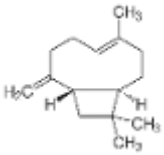
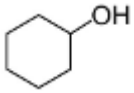
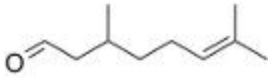
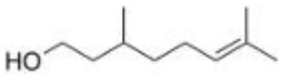
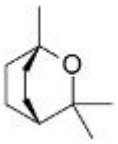
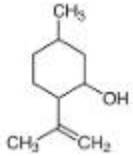
Figura 1 – Fluxograma da extração e análise do óleo essencial de *Corymbia citriodora*

3. Resultados e discussão

Foram identificados onze compostos no óleo essencial de *Corymbia citriodora*, entre compostos majoritários e minoritários. A maioria dos compostos são terpenóides, característico da composição de óleos essenciais, sendo a maior prevalência de monoterpenos. A temperatura de ebulição de cada composto variou, sendo a faixa de 80 a 259 °C. Quanto as propriedades organolépticas, os compostos identificados apresentam diferentes classificações olfativas, sendo floral a mais comum (Tabela 1).

Tabela 1 – Compostos identificados no óleo essencial de *Corymbia citriodora*, sua fórmula química e temperatura de ebulição (KIM et al., 2025)

Composto	Representação da	Fórmula	Ponto de	Classificação

	estrutura química	química	ebulição	Olfativa
5-Heptenal		$C_7H_{12}O$	116-124 °C	melão
Acetato de citronelila		$C_{12}H_{22}O_2$	229 °C	floral
Ácido citronélico		$C_{10}H_{18}O_2$	121-122 °C	verde
Cariofileno		$C_{15}H_{24}$	256-259 °C	especiada
Cicloexanol		$C_6H_{12}O$	161.8 °C	canforoso
Ciclohexano		C_6H_{12}	80,7 °C	animálico
Citronelal		$C_{10}H_{18}O$	205-207 °C	floral
Citronelol		$C_{10}H_{20}O$	224 °C	floral
Eucaliptol		$C_{10}H_{18}O$	176-177 °C	herbáceo
Isopulegol		$C_{10}H_{18}O$	216-218 °C	mentolado
Linalol		$C_{10}H_{18}O$	198-199 °C	floral

Na Correlação de Pearson entre tempo de extração (1, 2 ou 3 horas), massa de folhas na extração (0,5, 1,0 ou 1,5kg) e teor dos componentes no óleo essencial de *Corymbia citriodora* é possível observar que os parâmetros e extração influenciam na composição do óleo essencial (Tabela 2).

A composição do óleo essencial variou devido aos parâmetros de extração tempo e massa de folhas. Quanto ao tempo, os compostos que apresentaram correlação positiva foram cariofileno (0,97), acetato de citronelila (0,77) e citronelol (0,72), que estão entre os compostos

com maior temperatura de ebulição. Apenas o citronelal apresentou correlação negativa (-0,81) com o tempo de extração, sendo este o componente majoritário e de maior interesse no óleo essencial de *Corymbia citriodora* (ANVISA, 2026). Desta forma, extrações mais curtas favorecem a maior proporção deste composto.

Quanto a massa de folhas por extração, eucaliptol (0,84) e linalol (0,70) apresentaram correlação positiva, sendo que a maior massa de folhas por extração favoreceria a maior proporção destes compostos. A massa de folhas interfere na composição do óleo essencial devido a maior ou menos facilidade do vapor de água permear a carga de folhas, sendo que no processo de arraste de vapor é a água o solvente responsável pela extração dos compostos.

Não há correlação entre o tempo e massa de folhas na extração, de forma que estes agem como fatores independentes. Alguns compostos apresentaram correlações entre si, por exemplo, ácido citronélico e 5-heptenal (0,84), sugerindo que os dois compostos são extraídos nas mesmas condições, sendo que os dois tem pontos de ebulição na mesma faixa de temperatura. Além disso, os dois não apresentaram correlação forte com a massa e o tempo de extração.

Apresentaram correlação negativa citronelal com acetato de citronelila (-0,77) e com cariofileno (-0,72), provavelmente pois o citronelal é extraído em menor tempo e os outros dois em maior tempo de extração, desta forma, quando acetato de citronelila e cariofileno são extraídos em maiores tempos de extração eles diminuem a proporção de citronelal no óleo essencial.

Citronelol e acetato de citronelila tem forte correlação positiva (0,96), devido a sua maior proporção em maiores tempos de extração. Além disso, a relação pode ser por um composto ser derivado do outro, uma vez que o acetato de citronelila é um éster derivado diretamente do citronelol.

Tabela 2 – Correlação de Pearson entre tempo de extração (1, 2 ou 3 horas), massa de folhas na extração (0,5, 1,0 ou 1,5kg) e teor dos componentes no óleo essencial de *Corymbia citriodora*

	Tempo	Massa	5-Heptenal	Acetato de citronelila	Ácido citronélico	Cariofileno	Cicloexanol	Ciclohexano	Citronelal
Tempo	1,00								
Massa	0,00	1,00							
5-Heptenal	-0,26	-0,24	1,00						
Acetato de citronelila	0,77	-0,40	-0,18	1,00					
Ácido citronélico	0,10	-0,32	0,84	0,26	1,00				
Cariofileno	0,97	0,13	-0,35	0,65	-0,02	1,00			
Cicloexanol	0,40	0,44	-0,33	0,24	-0,02	0,55	1,00		
Ciclohexano	0,06	0,32	0,01	-0,11	0,09	0,14	0,61	1,00	
Citronelal	-0,81	0,16	-0,26	-0,77	-0,64	-0,72	-0,40	-0,20	1,00
Citronelol	0,72	-0,55	-0,26	0,96	0,18	0,59	0,12	-0,19	-0,65
Eucaliptol	-0,20	0,84	0,04	-0,46	-0,03	-0,14	0,36	0,57	0,12
Isopulegol	0,14	-0,15	0,35	-0,04	0,10	0,01	-0,75	-0,38	-0,06
Linalol	0,52	0,70	-0,19	-0,06	-0,21	0,66	0,53	0,30	-0,27

4. Conclusões

O componente majoritário, citronelal, apresentou correlação negativa (-0,81) com o tempo de extração e os compostos cariofileno (0,97), acetato de citronelila (0,77) e citronelol (0,72) apresentaram correlação positiva. Quanto a massa de folhas por extração, eucaliptol (0,84) e linalol (0,70) apresentaram correlação positiva. Não há correlação entre o tempo e massa de folhas na extração, de forma que estes agem como fatores independentes. Os parâmetros e extração tempo e massa de folhas influenciam na composição do óleo essencial de *Corymbia citriodora*.

5. Agradecimentos

Aos técnicos Chico, Eder, Machado (*in memoriam*) e Mauro do Departamento de Engenharia Florestal da Universidade Federal de Viçosa. O presente trabalho foi realizado

com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

6. Referências bibliográficas

Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA). Farmacopéia Brasileira, 8 ed., Brasília - DF, 2026, 1086 páginas.

Dos Santos, P. A. B., Monti, C. A. U., De Carvalho, L. G., Lacerda, W. S., Schwerz, F. (2021) Air temperature estimation techniques in Minas Gerais state, Brazil, Cwa and Cwb climate regions according to the Köppen-Geiger climate classification system. Ciência e Agrotecnologia, v. 45.

Goodine, T., & Oelgemöller, M. (2020). corymbia citriodora: A valuable resource from australian flora for the production of fragrances, repellents, and bioactive compounds. ChemBioEng Reviews, 7(6), 170–192.

Instituto Nacional de Meteorologia - INMET. Sistema Tempo. Disponível em: https://bdmep.inmet.gov.br/

Kim, S., Chen, J., Cheng, T., Gindulyte, A., He, J., He, S., Li, Q., Shoemaker, B. A., Thiessen, P. A., Yu, B., Zaslavsky, L., Zhang, J., & Bolton, E. E. (2025). PubChem 2025 update. Nucleic acids research, 53(D1), D1516–D1525.

National Institute of Standards and Technology - NIST. NIST17 Mass Spectral Library. National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD, USA, 2017.

Radwan, M. N., Morad, M. M., Ali, M. M., & Wasfy, K. I. (2020). Extraction of peppermint volatile oil using a simple constructed steam distillation system, Plant Archives, 2020, 20, 1487–1491.

Yousefi, M., Rahimi-Nasrabadi, M., Pourmortazavi, S. M., Wysokowski, M., Jesionowski, T., Ehrlich, H., & Mirsadeghi, S. (2019). Review of Supercritical fluid extraction of essential oils. TrAC Trends in Analytical Chemistry, 118, 182–193.

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Desempenho mecânico e propriedades de barreira de nanofibrilas de celulose obtidas de resíduos de tubos de papel

Evelize Aparecida Amaral Shashiki[1]; Felipe Gomes Batista[1], Luiz Otávio de Souza Pereira[1]; Rafael Carvalho do Lago[1]; Cínthia Aparecida Silva[1]; Júlia Naves Teixeira[1]; Gustavo Henrique Denzin Tonoli[1]; Lourival Marin Mendes[1]

[1] Universidade Federal de Lavras

Resumo: A crescente demanda por materiais sustentáveis e de base renovável tem impulsionado o desenvolvimento de nanofibrilas de celulose (NFC) como alternativa aos polímeros sintéticos convencionais, promovendo o aproveitamento de resíduos lignocelulósicos em aplicações de maior valor agregado. Nesse contexto, objetivou-se avaliar filmes obtidos a partir de NFC produzidas de resíduos industriais de tubos de papel, investigando o efeito do branqueamento químico sobre suas propriedades. Os resíduos foram submetidos a fragmentação, branqueamento e fibrilação mecânica, sendo os filmes produzidos pelo método casting. Posteriormente, foram avaliadas as propriedades mecânicas, ângulo de contato, molhabilidade superficial e permeabilidade ao vapor de água. O branqueamento promoveu aumento do módulo de elasticidade, do ângulo de contato e da permeabilidade ao vapor de água, sem comprometer as demais propriedades mecânicas dos filmes. Os resultados evidenciaram o potencial do aproveitamento de resíduos lignocelulósicos na produção de biomateriais sustentáveis para aplicações em embalagens e outros materiais de base renovável.

Palavras-chave: Biomateriais; Sustentabilidade; Economia circular.

Mechanical performance and barrier properties of cellulose nanofibrils obtained from paper tube waste

Abstract: The growing demand for sustainable and renewable-based materials has driven the development of cellulose nanofibrils (CNF) as an alternative to conventional synthetic polymers, promoting the valorization of lignocellulosic waste into high-value-added applications. In this context, this study aimed to evaluate films produced from CNFs obtained from industrial paper tube waste, investigating the effect of chemical bleaching on their properties. The waste was subjected to shredding, chemical bleaching, and mechanical fibrillation, and the films were prepared using the casting method. Subsequently, the films were characterized in terms of their mechanical properties, contact angle, surface wettability, and water vapor permeability. Chemical bleaching increased the elastic modulus, contact angle, and water vapor permeability without compromising the other mechanical properties of the films. The results demonstrated the potential of utilizing lignocellulosic waste for the production of sustainable biomaterials suitable for packaging and other renewable-based material applications.

Keywords: Biomaterials; Sustainability; Circular Economy.

1. Introdução

O avanço das demandas globais por materiais sustentáveis e de baixo impacto ambiental tem impulsionado o desenvolvimento de alternativas renováveis capazes de substituir polímeros sintéticos derivados de fontes fósseis, especialmente em aplicações voltadas às indústrias de embalagens, biomateriais e compósitos (Luo et al., 2025). Nesse cenário, as NFC destacam-se devido a elevada resistência mecânica, biodegradabilidade, baixa densidade, elevada área superficial e versatilidade funcional, características que ampliam seu potencial tecnológico em diferentes setores industriais (Zhang et al., 2021; Carolin et al., 2023).

As NFC podem ser obtidas a partir de diferentes fontes lignocelulósicas, incluindo madeira, resíduos agrícolas e subprodutos industriais (Ntsie et al., 2025). Entre essas fontes, os resíduos de tubos de papel apresentam elevado potencial de aproveitamento, uma vez que constituem materiais ricos em fibras celulósicas e frequentemente destinados ao descarte. A valorização desses resíduos como matéria-prima para obtenção de nanocelulose contribui simultaneamente para a redução da geração de resíduos sólidos, diminuição da pressão sobre recursos naturais e agregação de valor a subprodutos industriais (Ansari et al., 2024). Dessa forma, o reaproveitamento de resíduos lignocelulósicos representa uma estratégia promissora para o desenvolvimento de materiais com menor impacto ambiental.

Entretanto, a eficiência da obtenção de NFC está diretamente relacionada aos tratamentos aplicados às fibras precursoras, especialmente em materiais oriundos de fontes não convencionais (Feng et al., 2024). Entre os métodos empregados, o branqueamento químico destaca-se por promover a remoção parcial de lignina, hemiceluloses e impurezas presentes na estrutura fibrosa, favorecendo a individualização das nanofibrilas e influenciando diretamente propriedades morfológicas, mecânicas e de barreira dos materiais obtidos (Li et al., 2025). De acordo Asadnia, & Sadat-Shojai, 2025 modificações estruturais decorrentes de pré-tratamentos químicos podem alterar significativamente parâmetros como hidrofilicidade, estabilidade em suspensão, formação de filmes e desempenho mecânico, fatores determinantes para aplicações industriais de maior valor agregado.

Nesse contexto, este estudo buscou ampliar o conhecimento sobre a produção de NFC a partir de resíduos industriais de tubos de papel, com ênfase na influência do branqueamento químico sobre as propriedades dos materiais obtidos.

2. Material e métodos

Os resíduos industriais de tubos de papel utilizados neste estudo foram fornecidos pela empresa Tubominas Indústria e Comércio LTDA e empregados como matéria-prima para a

obtenção das NFC. Inicialmente, os resíduos foram fragmentados em moinho de facas, com a finalidade de reduzir e padronizar o tamanho das partículas, promovendo maior homogeneidade do material e favorecendo as etapas subsequentes de processamento. Em seguida, o material foi dividido em dois grupos experimentais: um mantido sem tratamento químico e outro submetido ao processo de branqueamento utilizando hidróxido de sódio (NaOH) e peróxido de hidrogênio (H_2O_2).

O pré-tratamento químico teve como objetivo remover parcialmente lignina, hemiceluloses e demais impurezas presentes na estrutura lignocelulósica, visando melhorar a desfibrilação das fibras e avaliar a influência do branqueamento sobre as propriedades das NFC e dos filmes produzidos.

A obtenção das NFC foi realizada por fibrilação mecânica, promovendo a desagregação das fibras em estruturas de escala nanométrica. Posteriormente, suspensões de NFC na concentração de 1% (m/v) foram utilizadas para produção de filmes pelo método casting. As suspensões foram vertidas em moldes de acrílico e submetidas à secagem em condições controladas de temperatura e umidade, visando a formação de filmes homogêneos e estruturalmente estáveis, conforme figura 1.



Figura 1 – Fluxograma esquemático das etapas de obtenção da NFC a partir de resíduos industriais de tubos de papel.

Os filmes obtidos foram caracterizados quanto as propriedades mecânicas, superficiais e de barreira. As propriedades mecânicas foram avaliadas por ensaios de tração e punctura, conforme a norma ASTM D882-12 (ASTM, 2018). A molhabilidade e o ângulo de contato foram determinados segundo o método TAPPI T458 cm-14 (TAPPI, 2014). As propriedades de barreira foram investigadas por meio da taxa de transmissão de vapor de água (TPVA) e da permeabilidade ao vapor de água (PVA), de acordo com os procedimentos estabelecidos pela norma ASTM E96 (ASTM, 2016).

2. Resultados e discussão

A Figuras 2 apresenta os resultados das propriedades mecânicas dos filmes produzidos a partir de NFC obtidas de resíduos de tubos de papel branqueados e não branqueados. De forma geral, os filmes submetidos ao branqueamento apresentaram leve aumento da resistência a tração (Figura 2 A), enquanto o elongamento (Figura 2B) não apresentou diferenças significativas entre os tratamentos. Em contrapartida, observou-se aumento expressivo do módulo de Young (Figura 3C) nos filmes branqueados, indicando maior rigidez estrutural. Esses resultados sugerem que o branqueamento promoveu alterações na organização e compactação das nanofibrilas, favorecendo maior rigidez dos filmes sem comprometer seu desempenho mecânico.

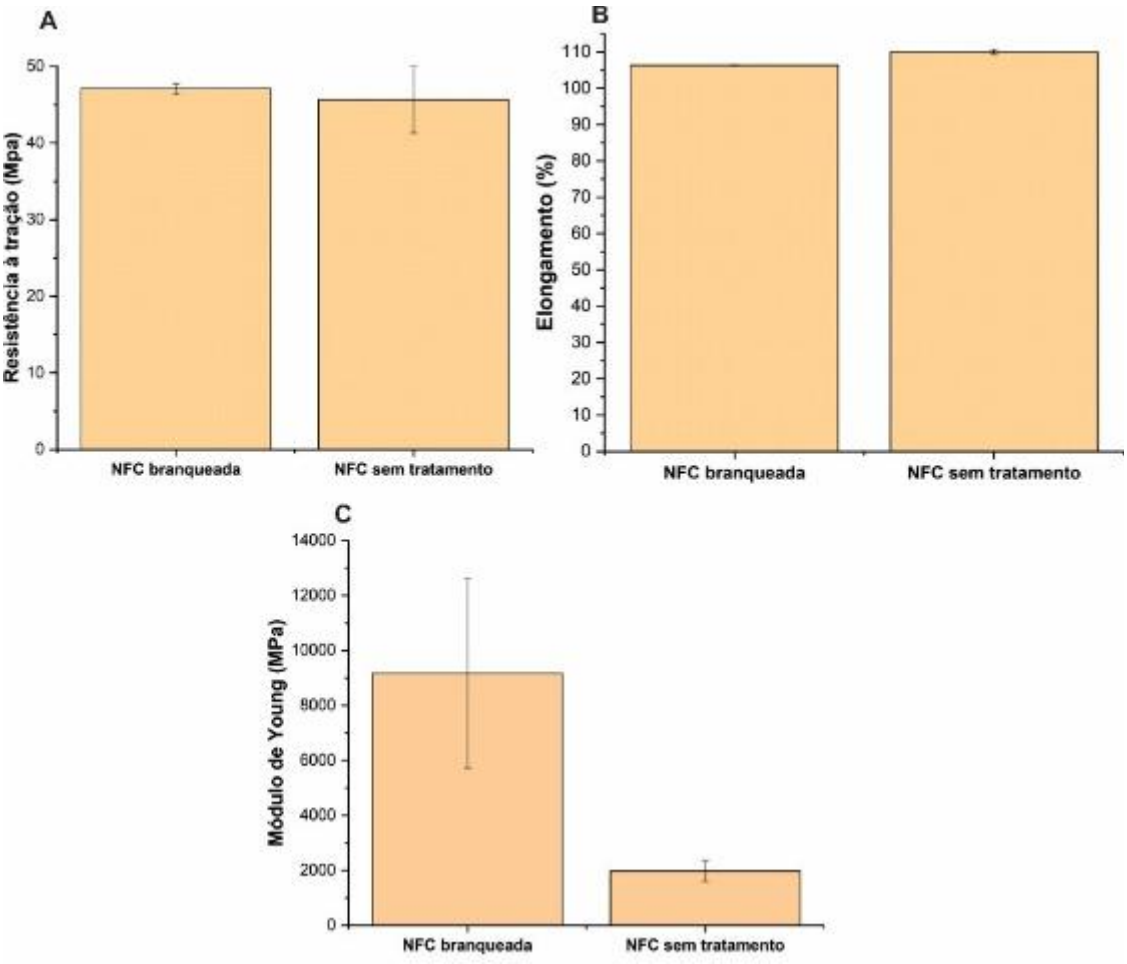


Figura 2 – Propriedades mecânicas dos filmes produzidos a partir de NFC obtidas de resíduos de tubos de papel branqueados e sem tratamento: (A) resistência a tração, (B) elongamento na ruptura e (C) módulo de Young.

Os resultados da Figura 2A demonstraram que o branqueamento não promoveu alterações significativas na resistência à tração dos filmes, indicando que o pré-tratamento químico não comprometeu a capacidade do material de suportar esforços mecânicos. Esse comportamento sugere que, embora o branqueamento tenha promovido modificações estruturais nas nanofibrilas, a integridade da matriz formada pelas NFC foi preservada, mantendo a estabilidade mecânica dos filmes (Papini et al., 2025).

Os valores de elongamento apresentados na Figura 2B permaneceram superiores a 90% para ambos os tratamentos, com baixa dispersão entre as amostras, evidenciando elevada flexibilidade e boa homogeneidade estrutural dos filmes. A elevada capacidade de deformação observada nos filmes representa uma característica relevante para aplicações que demandam maior maleabilidade e flexibilidade, como embalagens biodegradáveis e filmes poliméricos sustentáveis (Ursachi et al., 2024).

Embora os valores de resistência a tração e elongamento tenham permanecido semelhantes entre os tratamentos, a Figura 2C demonstrou aumento expressivo do módulo de Young nos filmes produzidos com NFC branqueadas, indicando maior rigidez estrutural. Esse resultado sugere que o branqueamento favoreceu maior compactação e organização da rede de nanofibrilas, aumentando a resistência da estrutura a deformação elástica sem comprometer sua flexibilidade. Assim, os filmes branqueados apresentaram comportamento mecânico mais rígido no estágio inicial de deformação, mas ainda capazes de sofrer elevada deformação antes da ruptura. Resultados semelhantes foram observados por Mascarenhas et al. (2022), que também relataram aumento da rigidez em filmes submetidos a pré-tratamentos químicos.

As Figuras 3A e 3B apresentam os resultados de ângulo de contato e molhabilidade dos filmes produzidos a partir de NFC obtidas de resíduos de tubos respectivamente. De maneira geral, os filmes submetidos ao branqueamento apresentaram aumento do ângulo de contato e tendência a redução da molhabilidade, indicando alterações nas propriedades superficiais dos materiais.

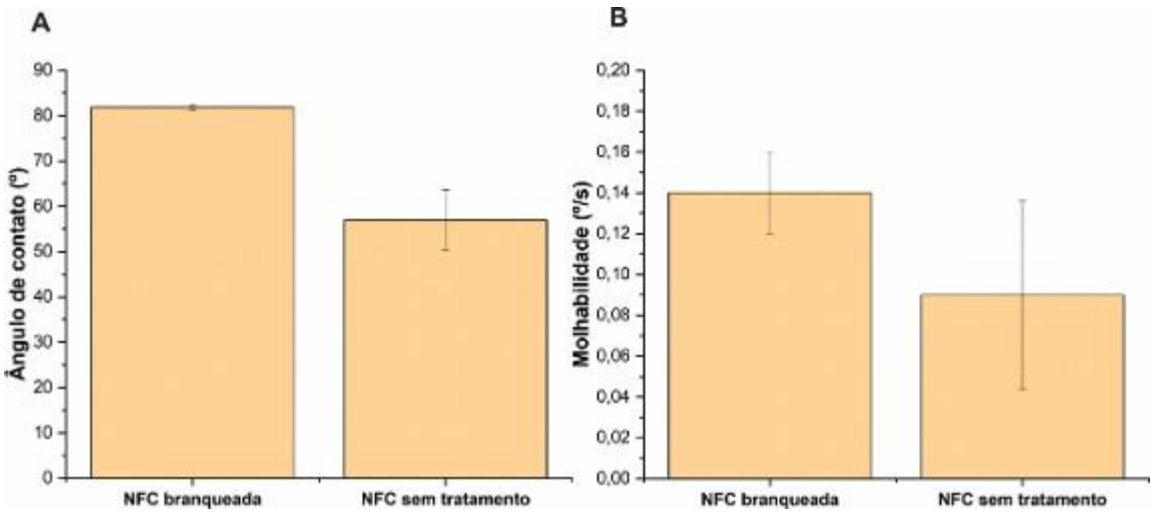


Figura 3 – Propriedades superficiais dos filmes produzidos a partir de NFC obtidas de resíduos de tubos de papel branqueados e sem tratamento: (A) ângulo de contato e (B) molhabilidade.

Esses resultados sugerem que o pré-tratamento químico influenciou diretamente a interação dos filmes com a água, promovendo mudanças na hidrofilicidade superficial das NFC. O aumento do ângulo de contato (Figura 3A) indica superfícies menos hidrofílicas, possivelmente em função da reorganização estrutural das nanofibrilas e da redução da disponibilidade de grupamentos hidroxila livres para interação com moléculas de água (Costa et

al., 2024). Além disso, a tendência de redução da molhabilidade (Figura 3B) pode favorece aplicações que demandam melhor estabilidade superficial e menor afinidade por umidade, características relevantes para materiais destinados a embalagens sustentáveis e aplicações de barreira (Karimdoost Yasur, 2026).

As Figuras 4A e 4B apresentam os resultados da taxa de transmissão de vapor de água (TPVA) e da permeabilidade ao vapor de água (PVA) dos filmes produzidos.

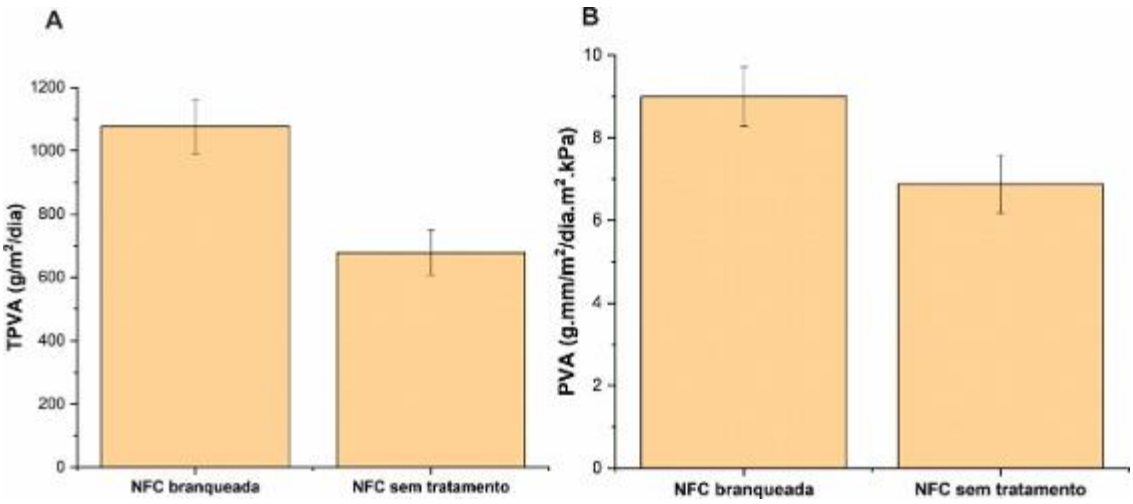


Figura 4 – Propriedades de barreira dos filmes produzidos a partir de nanofibrilas de celulose (NFC) obtidas de resíduos de tubos de papel branqueados e sem tratamento: (A) taxa de transmissão de vapor de água (TPVA) e (B) permeabilidade ao vapor de água (PVA).

Os filmes submetidos ao branqueamento apresentaram maiores valores de TPVA (Figura 4A) e PVA (Figura 4B), indicando aumento da permeabilidade ao vapor de água após o tratamento químico. Embora esse comportamento pareça contradizer os maiores valores de ângulo de contato observados anteriormente, os resultados sugerem que as modificações estruturais promovidas pelo branqueamento influenciaram diretamente as propriedades de barreira dos filmes. A remoção parcial de componentes amorfos da parede celular, como lignina e hemiceluloses, promove a reorganização da rede de nanofibrilas e aumenta a exposição das superfícies celulósicas, favorecendo uma maior interação intermolecular por meio de ligações de hidrogênio. Entretanto, esse processo também pode ocasionar uma redistribuição da matriz polimérica, reduzindo sua uniformidade e favorecendo a formação de regiões menos compactas, microvazios ou descontinuidades estruturais. Como consequência, são criados caminhos preferenciais para a difusão das moléculas de água através do material, justificando os maiores valores de permeabilidade ao vapor de água observados após o branqueamento (Baric

et al., 2019). Esse comportamento evidencia que a permeabilidade ao vapor de água não é determinada exclusivamente pelas características superficiais dos filmes, mas também pela continuidade e organização da estrutura interna da matriz nanofibrilar. Dessa forma, os resultados demonstram que o desempenho de barreira dos filmes depende não apenas da hidrofilicidade superficial, mas principalmente da organização microestrutural da rede formada pelas nanofibrilas.

3. Conclusões

Os resultados obtidos demonstraram que as NFC produzidas a partir de resíduos de tubos de papel apresentam elevado potencial para aplicação em filmes sustentáveis, com propriedades mecânicas, superficiais e de barreira compatíveis com materiais de maior valor agregado. O branqueamento promoveu aumento do módulo de elasticidade, alterações na hidrofilicidade superficial e incremento da permeabilidade ao vapor de água, evidenciando que as modificações estruturais decorrentes do tratamento influenciaram diretamente o desempenho dos filmes. A reorganização da rede de nanofibrilas e as possíveis alterações na compactação da matriz podem ter contribuído para a formação de regiões menos compactas, favorecendo a difusão do vapor de água através do material e, consequentemente, o aumento da permeabilidade. Esses resultados demonstram que as propriedades de barreira dos filmes dependem não apenas de sua molhabilidade superficial, mas também da organização microestrutural da matriz nanofibrilar. De forma geral, os resultados reforçam a viabilidade do aproveitamento de resíduos lignocelulósicos na produção de biomateriais avançados, conciliando desempenho funcional, sustentabilidade ambiental e os princípios da economia circular, além de evidenciar o potencial das NFC como alternativa promissora aos polímeros sintéticos em aplicações como embalagens biodegradáveis e outros materiais sustentáveis.

4. Agradecimentos

Os autores agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) pelo apoio financeiro e pelo incentivo ao desenvolvimento da pesquisa científica. Agradecem à empresa Tubominas Indústria e Comércio Ltda. pelo fornecimento dos resíduos utilizados neste estudo e pela parceria institucional, fundamentais para a execução deste trabalho. Também expressam seus agradecimentos ao Conselho Nacional de

Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), à Universidade Federal de Lavras (UFLA) e ao Laboratório de Engenharia de Biomateriais pelo suporte técnico, científico e estrutural disponibilizado ao longo da pesquisa.

5. Referências bibliográficas

American Society for Testing and Materials. (2016). Standard test methods for water vapor transmission of materials (ASTM E96). ASTM International.

American Society for Testing and Materials. (2018). Standard test methods for tensile properties of thin plastic sheeting (ASTM D882-12). ASTM International.

Ansari, M. M., Heo, Y., Do, K., Ghosh, M., & Son, Y.-O. (2024). Nanocellulose derived from agricultural biowaste by-products–Sustainable synthesis, biocompatibility, biomedical applications, and future perspectives: A review. Carbohydrate Polymer Technologies and Applications, 8, 100529. https://doi.org/10.1016/j.carpta.2024.100529

Asadnia, M., & Sadat-Shojai, M. (2025). Recent perspective of synthesis and modification strategies of cellulose nanocrystals and cellulose nanofibrils and their beneficial impact in scaffold-based tissue engineering: A review. International Journal of Biological Macromolecules, 293, 139409. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.139409

Baric, V., Ciacchi, L. C., & Mädler, L. (2019). Compaction-induced restructuring of aggregated nanoparticle films using the discrete element method. Powder Technology, 342, 773–779. https://doi.org/10.1016/j.powtec.2018.10.038

Carolin, F. C., Kamalesh, T., Kumar, P. S., Hemavathy, R. V., & Rangasamy, G. (2023). A critical review on sustainable cellulose materials and its multifaceted applications. Industrial Crops and Products, 203, 117221. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2023.117221

Costa, G. R., Nascimento, M. V., Marotti, B. S., & Arantes, V. (2024). Reducing hydrophilicity of cellulose nanofibrils through lipase-catalyzed surface engineering with renewable grafting agents. *Journal of Polymers and the Environment, 32*(12), 5254–5271. https://doi.org/10.1007/s10924-024-03316-3

Feng, Y., Hao, H., Lu, H., Chow, C. L., & Lau, D. (2024). Exploring the development and applications of sustainable natural fiber composites: A review from a nanoscale perspective. Composites Part B: Engineering, 276, 111369. https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2024.111369

Karimdoost Yasur, A. (2026). Review of surface engineering through wettability control: Innovations, sustainability, and interdisciplinary impact. Journal of Coatings Technology and Research, 23(2), 255–272. https://doi.org/10.1007/s11998-025-01158-9

Li, J., Zha, Y.-N., Wang, H.-M., Tian, J.-N., & Hou, Q.-X. (2025). Advances in lignin chemistry during pulping and bleaching. Industrial Crops and Products, 229, 121004. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2025.121004

Luo, T., Hu, Y., Zhang, M., Jia, P., & Zhou, Y. (2025). Recent advances of sustainable and recyclable polymer materials from renewable resources. Resources Chemicals and Materials, 4(2), 100085. https://doi.org/10.1016/j.recm.2024.10.004

Mascarenhas, A. R. P., Scatolino, M. V., Dias, M. C., Martins, M. A., Melo, R. R., Damásio, R. A. P., Mendonça, M. C., & Tonoli, G. H. D. (2022). Fibers pre-treatments with sodium silicate affect the properties of suspensions, films, and quality index of cellulose micro/nanofibrils. Nordic Pulp & Paper Research Journal, 37(3), 1–14. https://doi.org/10.1515/npprj-2022-0037

Ntsie, O. D., Phiri, R., Boonyasopon, P., et al. (2025). Advancing sustainable infrastructure: Natural fiber-reinforced composites in engineering. Discover Applied Sciences, 7(1), 884. https://doi.org/10.1007/s42452-025-07266-w

Papini, S., Aretxabaleta, M. A., Zoppe, J. O., & Lizundia, E. (2025). Green bleaching of fungal nanochitin to enhance the functional properties of food packaging materials. Colloids and Surfaces B: Biointerfaces, 256(1), 114997. https://doi.org/10.1016/j.colsurfb.2025.114997

Technical Association of the Pulp and Paper Industry. (2014). Surface wettability of paper (angle of contact method) (TAPPI T458 cm-14). TAPPI Press.

Ursachi, V.-F., Oroian, M., & Spinei, M. (2024). Development and characterization of biodegradable films based on cellulose derivatives and citrus pectin: A comparative study. Industrial Crops and Products, 219, 119052. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2024.119052

Zhang, L., Guo, L., & Wei, G. (2021). Recent advances in the fabrication and environmental science applications of cellulose nanofibril-based functional materials. Materials, 14(18), 5390. https://doi.org/10.3390/ma14185390

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Desenvolvimento de filmes de nanocelulose a partir de resíduos lignocelulósicos do açaí

Mário Vanoli Scatolino[1]; Alex Jesuíno Dantas[2]; Matheus Cordazzo Dias[1]; Adriano Reis Prazeres Mascarenhas[3]; Carla Priscilla Távora Cabral[1]

[1] Universidade do Estado do Amapá (UEAP)
[2] Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA)
[3] Universidade Federal de Rondônia (UNIR)

Resumo: O setor de embalagens busca opções de materiais que sejam biodegradáveis e altamente disponíveis. O objetivo do trabalho foi estudar a aplicação de nanofibrilas de celulose (NFC) obtidas de fibras de açaí in natura, açaí tratado com oxidação mediada por 2,2,6,6-tetrametilpiperidina 1-oxil (TEMPO), e pinus como matéria-prima para filmes de embalagem biodegradáveis. As fibras de açaí foram preparadas para tratamento alcalino e branqueamento para subsequente fibrilação mecânica. Filmes formados foram avaliados quanto à molhabilidade e as propriedades mecânicas por ensaios de tração. Os filmes produzidos com polpa de pinus e polpa de açaí TEMPO se destacaram pela resistência mecânica superior, atingindo 80 e 68 MPa, respectivamente. Além do baixo custo, os nanomateriais de base vegetal podem apresentar propriedades atraentes, com potencial para aplicação como algum tipo de embalagem, para transporte de produtos básicos, como pães, farinhas ou produtos com baixo teor de umidade, possibilitando o aproveitamento eficiente de resíduos florestais.

Palavras-chave: Nanotecnologia; Embalagens; Sustentabilidade

Development of nanocellulose films from lignocellulosic waste from açai

Abstract: The packaging sector is seeking biodegradable and readily available material options. This study aimed to investigate the application of cellulose nanofibrils (CNF) obtained from raw açaí fibers, açaí treated with 2,2,6,6-tetramethylpiperidine 1-oxyl (TEMPO)-mediated oxidation, and pine as raw materials for biodegradable packaging films. Açaí fibers were prepared for alkaline treatment and bleaching followed by mechanical fibrillation. The resulting

films were evaluated for wettability and mechanical properties through tensile tests. Films produced with pine pulp and TEMPO açaí pulp stood out for their superior mechanical strength, reaching 77 and 68 MPa, respectively. In addition to their low cost, plant-based nanomaterials can exhibit attractive properties, with potential applications in packaging for transporting basic products such as bread, crackers, or low-moisture items, thereby enabling the efficient use of forest residues.

Keywords: Nanotechnology; Packaging; Sustainability

1. Introdução

Ao longo da última década, houve um significativo avanço no desenvolvimento de processos viáveis para a obtenção de nanofibrilas de celulose (NFC) a partir de fibras celulósicas. Estas NFC, de dimensões nanométricas, apresentam propriedades atrativas, como grande área superficial e capacidade mecânica, permitindo seu uso como reforço em materiais estruturais ou na formação de redes entrelaçadas para melhorar propriedades de barreira. Suas dimensões podem ser influenciadas pelo método de extração e matéria-prima utilizada.

No Brasil, onde se localiza a Amazônia, uma vasta diversidade de matérias-primas pode ser explorada seguindo os preceitos do manejo sustentável. A floresta amazônica oferece desde variadas espécies madeireiras (Scatolino et al., 2017) até diversos produtos florestais não lenhosos, como óleos, resinas, taninos e gomas (Pena et al., 2021). Nesse contexto, surge um crescente interesse em fibras nativas com grande potencial para o desenvolvimento de produtos com aplicações nas indústrias farmacêutica, cosmética, sanitária e alimentícia.

Fibras vegetais têm sido exploradas para a produção de filmes nanoestruturados e nanocompósitos, como fibra do pseudocaule da bananeira (Guimarães et al. 2021), abacaxi (Abraham et al. 2011), juta (Fonseca et al. 2021), palmeira (Okahisa et al. 2018), algodão (Chen et al. 2022), sisal (Santana et al. 2017), bambu (Guimarães Jr et al. 2015), palha de aveia (do Lago et al. 2020), casca de cacau (Souza et al. 2019), casca de cedro vermelho (Zhang et al. 2019), entre outros. Este projeto visa abordar essa questão no contexto de filmes para embalagens, buscando facilitar o processo de fibrilação e melhorar as propriedades de hidrofobicidade através da incorporação de componentes renováveis. No entanto, obstáculos como a baixa resistência à água persistem. Além disso, falta informação sobre a aplicação de NFC e as propriedades dos filmes resultantes.

Considerando o cenário brasileiro, onde a economia agrícola predomina e o país possui potencial para se tornar um grande produtor de fibras celulósicas, a promoção do uso dessas fibras e suas derivações para embalagens sustentáveis é crucial. Isso contribuiria não apenas para o crescimento econômico, mas também para o desenvolvimento ambientalmente responsável.

Um pré-tratamento químico que se destaca em estudos recentes é a oxidação com 2,2,6,6-tetrametilpiperidina 1-oxil, conhecida como oxidação mediada por TEMPO (Wu et al. 2019; Balea et al. 2021). A crescente busca por soluções sustentáveis tem impulsionado cientistas a explorar alternativas renováveis para substituir polímeros derivados de petróleo. As embalagens celulósicas surgem como alternativas robustas aos plásticos, embora apresentem porosidade e alta permeabilidade a gases oxidativos devido à ineficiência de sua estrutura em rede para barrar a difusão de gases e umidade. Isso desafia sua aplicação como embalagem.

Esse projeto propõe a utilização de NFC como matéria-prima, impulsionando a implementação de tecnologias de menor impacto ambiental no Brasil. Além disso, possibilita a consolidação de novos materiais sustentáveis, incorporando fibras vegetais residuais e matérias-primas celulósicas de baixo custo provenientes de processos industriais. O resultado é a promoção de embalagens mais amigáveis ao meio ambiente, alinhadas às demandas atuais por sustentabilidade. Neste contexto, este trabalho teve como objetivo avaliar a influência do pré-tratamento por oxidação mediada por TEMPO sobre a molhabilidade e as propriedades mecânicas de filmes de NFC de açaí e polpa de pinus comercial.

2. Material e métodos

2.1. Obtenção das fibras de açaí e polpas comerciais

Nesta primeira fase do projeto, houve o preparo das fibras de açaí e da polpa comercial de pinus para as etapas de tratamento alcalino, branqueamento e futura produção das NFC. Os frutos de açaí foram obtidos de plantios de *Euterpe oleracea* Mart., região de Paragominas, Estado do Pará, PA. A polpa de açaí e resíduos de fibras da semente do fruto foram coletados em um estabelecimento comercial denominado “batedeira”, onde a polpa é aproveitada como alimento e os resíduos são separados. As fibras do açaí foram retiradas manualmente dos caroços. A celulose comercial branqueada de pinus, foi fornecida pela Suzano Papel e Celulose (Suzano - SP, Brasil).

2.2. Tratamento alcalino e branqueamento das fibras de açaí

O pré-tratamento alcalino das fibras de açaí foi realizado seguindo os procedimentos descritos em Yue et al. As polpas de açaí branqueadas e a polpa comercial de pinus foram dispersas separadamente em 4 L de água e agitadas por 30 min (200 rpm), obtendo-se uma suspensão com concentração de 2% (com base na massa seca das fibras). O branqueamento foi feito com 100 ml de solução 1:1 (v/v) de peróxido de hidrogênio H_2O_2 (Bianquímica; SP, Brazil; grau de pureza 35%) a 24% (v/v) e NaOH at 4% (w/v) por 2 h a 80 °C (banho-maria) e agitação mecânica de 1500 rpm.

2.3. Tratamento com oxidação mediada por TEMPO

O pré-tratamento com oxidação mediada por TEMPO foi feito nas fibras branqueadas de açaí obtidas e seguiu as indicações sugeridas por Saito et al. (2007), em que 60 g de celulose contendo TEMPO (0,96 g) e NaBr (6 g) (reagente ACS, Synth, Brasil; 99%) foram imersos a 2% em massa. A oxidação mediada por TEMPO ocorreu com a adição de 10% de NaClO (3,1 g, 5,0 mmol) (reagente ACS, Dinâmica, Brasil; ≥ 10%) a 25 °C sob agitação mecânica a 750 rpm. O pH foi mantido em 10 pela adição de solução de NaOH 0,5 M. Após a estabilização do pH, a reação ocorreu por 3 h. Posteriormente, o pH foi ajustado para 7 pela adição de solução de HCl 0,5 M (reagente ACS, Neon, Brasil; 37%) e as polpas foram lavadas com água deionizada. As polpas foram secas em estufa para posterior fibrilação mecânica.

2.4. Fibrilação mecânica do açaí e da polpa comercial de pinus

As NFC de cada matéria-prima foram obtidas usando um desfibrilador mecânico Masuko Supermasscolloider (grinder) a 1600 rpm, seguindo os métodos sugeridos por Bufalino et al. (2015). As fibras de açaí branqueadas e as tratadas com TEMPO foram colocadas em água na concentração de 1,5% (m/v), o mesmo para a polpa comercial de pinus. No caso deste trabalho, a polpa de pinus não passou por tratamentos, pois os processos de polpação e branqueamento foram feitos na própria empresa. A água causa um inchamento das fibras e facilita o processo de fibrilação da parede celular. As NFC foram obtidas após 5 passagens das fibras e polpas pelo grinder.

2.5. Estabilidade das suspensões

A estabilidade das amostras em suspensão foi conduzida de acordo com Guimarães Jr et al. (2015). As suspensões foram diluídas a 0,25% em peso e alíquotas de 15 ml foram colocadas

em tubos de ensaio para aquisição das imagens. As imagens foram adquiridas de hora em hora por 8 h. O software Image J (Schindelin et al., 2012) foi usado para estimar a decantação NFC nas suspensões e, em seguida, a estabilidade foi calculada.

2.6. Ângulo de contato e molhabilidade dos filmes

A molhabilidade de superfície foi avaliada por meio do equipamento Kruss Drop Shape Analyzer — DSA25 (Hamburg, Alemenha). Uma gota de água foi depositada sobre a superfície com auxílio de uma seringa. A imagem da gota teve a apuração feita pela câmera e o sistema do equipamento utilizado determinou o ângulo de contato entre a gota e a superfície do filme, sendo medido em temperatura ambiente (20 °C). Para cada amostra, foram feitas quatro leituras de ângulos após a estabilização da gota. Sendo assim, no total foram avaliadas 4 amostras por tratamento na face superior e inferior do filme.

2.7. Propriedades mecânicas dos filmes

As propriedades mecânicas dos filmes micro/nanofibrilas foram avaliadas pelo ensaio de tração seguindo os procedimentos da norma ASTM D828-16 (2016). As amostras obtidas com dimensões de 10,0 x 2,5 cm. Cada média de resultado foi obtido a partir da média de 10 amostras. O módulo de elasticidade (MOE) ou módulo de Young foi calculado pela Eq. 1:

$$E = \sigma/\varepsilon \quad (1)$$

Onde E é o MOE (Pa), σ é a tração aplicada (Pa), e Ɛ é a deformação longitudinal da amostra (adimensional). O módulo de tração será obtido pela Eq.2:

$$\sigma b = F/A \quad (2)$$

Onde σb é a tensão de ruptura (MPa), F é a força aplicada na ruptura da amostra (N); A é a area da secção transversal da amostra (mm²). O teste foi feito na máquina Zwick/Roell - GmbH & Co (Einsingen, Alemanha) com velocidade de tração de 10 mm/min.

3. Resultados e discussão

3.1. Estabilidade das suspensões

As suspensões de polpa comercial de pinus apresentaram maior estabilidade em relação às de açaí NFC (Figura 1). As nanofibrilas de celulose de pinus apresentaram estabilidade final próxima a 95%, enquanto os tratamentos de açaí in natura atingiram 70% após 24 h. Já os tratamentos com açaí TEMPO alcançaram 54% de estabilidade da suspensão, demonstrando

uma possível influência do tratamento na alteração da estabilidade das nanofibrilas de celulose na suspensão.

Figura 1 – Estabilidade das suspensões de NFC estudadas.

A sedimentação mostrou uma tendência crescente na estabilidade das suspensões de NFC de açaí e de açaí tratado com TEMPO durante as horas de análise. Nas primeiras 4 h, houve uma queda abrupta na estabilidade das NFC de açaí in natura e açaí TEMPO, sendo observada maior diminuição. Após esse período, observou-se um aumento semelhante na sedimentação (diminuição da estabilidade). A polpa de pinus é oriunda de polpação comercial Kraft, na qual as condições são controladas por processos automatizados, que garantem boa qualidade de remoção de componentes não-celulósicos como hemiceluloses e ligninas. As NFCs de pinus foram mais estáveis entre os tratamentos avaliados. Esses resultados indicam que a suspensão de NFC de pinus contém partículas dispersas em movimento browniano por um intervalo de tempo maior, o que tende a randomizar a orientação das fibrilas quando a dispersão é suficientemente diluída, mantendo-as em suspensão pela interação de forças repulsivas (Setter et al. 2023). Devido à correlação entre formas e tamanhos de partículas, bem como à correlação entre aglomerados de partículas e estabilidade, a análise de sedimentação tem sido amplamente estudada para avaliar a qualidade de nanopartículas de celulose (Dias et al. 2022).

3.2. Ângulo de contato e molhabilidade de superfície

O açaí in natura apresentou o menor ângulo de contato (59°), indicando uma maior tendência ao espalhamento da gota sobre a superfície do filme, assim como a penetração da gota pela sua estrutura em comparação com os outros dois materiais (Tabela 1). O açaí TEMPO apresentou um ângulo de contato intermediário (63°), enquanto o pinus apresentou o maior ângulo de contato (67°), indicando que a gota de água manteve-se mais estável em comparação com os outros dois tratamentos. A partir desses resultados, podemos inferir que os filmes feitos de NFC do açaí in natura tendem a ser mais hidrofílicos do que os filmes feitos com açaí TEMPO ou pinus.

Tabela 1 – Ângulo de contato e molhabilidade dos filmes produzidos

Tratamento	AC*	Molhabilidade

Açaí in natura	59 ± 9°	0,19 °/s
Açaí TEMPO	63 ± 4°	0,10 °/s
Pinus	67 ± 6°	0,22 °/s

*AC = Ângulo de contato;

Em relação à molhabilidade, os filmes feitos com NFC de açaí tratados com TEMPO atingiram menores valores, isto é, caracterizando o material como tendo uma menor tendência ao espalhamento da gota de água sobre a superfície do filme. Os materiais com características mais hidrofóbicas comumente geram menor adesão entre as moléculas do líquido e a superfície do filme, sendo empregados em produtos que necessitam de um revestimento com maior impermeabilidade. Enquanto isso, os filmes feitos com características hidrofílicas proporcionam maior adesão entre líquidos e revestimentos. Tanto no caso de penetração quanto no de espalhamento da gota de água pela superfície do filme, a ocorrência de poros pode ser um fator crucial. Filmes ou papéis mais porosos podem ser encaminhados facilmente para finalidades que necessitem de impressão, pinturas ou colagem nas superfícies.

3.3. Propriedades mecânicas

Observa-se na figura 2 que o filme de NFC derivado da polpa comercial do pinus revelou maior resistência à tração, alcançando 80 MPa. Esta resistência superior é consistente com estudos anteriores que destacam as propriedades mecânicas vantajosas das NFC derivadas de coníferas, como o pinus, que exibem uma estrutura interna altamente organizada e uma distribuição uniforme de fibrilas (da Silva Costa et al. 2026). A menor resistência entre os tratamentos foi do filme de açaí in natura, com um valor de 55 Mpa, entretanto, apresentou maior plasticidade na deformação total alcançada sem rompimento, quando comparado com o açaí TEMPO.

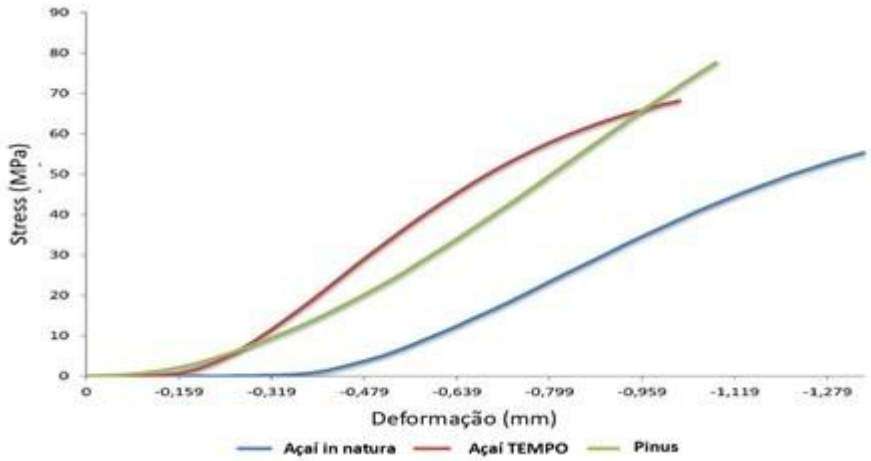


Figura 2 – Curvas de stress x deformação dos filmes de NFC das matérias-primas estudadas.

O filme de açaí TEMPO demonstrou uma resistência à tração de 68 MPa, valor esse satisfatório quando comparado com o tratamento com celulose comercial de pinus. Contudo, ocorreu um rompimento prematuro antes de atingir a mesma deformação dos dois outros tratamentos. Este rompimento precoce pode ser atribuído à maior fibrilação das NFC derivadas do açaí tratado com TEMPO. No tratamento de oxidação mediada por TEMPO, parte do NaClO é usado na oxidação e polimerização da lignina, reduzindo o consumo energético na fibrilação (Balea et al. 2026). Oxidação de ligninas após o tratamento alcalino e branqueamento pode resultar em ligações mais estáveis na pós-fibrilação, causando menor deformação dos filmes nos ensaios mecânicos. Guimarães et al. (2021) produziram filmes com NFC de pseudocaule de bananeira após 20 e 40 passagens pelo moedor Supermasscolloider que apresentaram resistência à tração de 46 e 51 MPa, respectivamente. Esses resultados foram inferiores aos valores encontrados nesta pesquisa. A resistência à tração é um indicador crítico da capacidade de um material suportar cargas mecânicas sem se romper.

4. Conclusões

Esse projeto propõe a utilização de NFC como matéria-prima, impulsionando a implementação de tecnologias de menor impacto ambiental no Brasil. Além disso, possibilita a consolidação de novos materiais sustentáveis, incorporando fibras vegetais residuais e matérias-primas celulósicas de baixo custo provenientes de processos industriais. O tratamento de oxidação mediada por TEMPO não proporcionou as melhorias nas características do filme que justifique sua aplicação na etapa pré-fibrilação para as fibras de açaí. No geral, os filmes produzidos com NFC derivada de polpa comercial de pinus apresentaram melhores propriedades. O trabalho mostrou que, além do baixo custo, os nanomateriais de base vegetal podem apresentar propriedades atraentes, com potencial para aplicação como algum tipo de embalagem, para transporte de produtos básicos, como pães, farinhas ou produtos com baixo teor de umidade, possibilitando o aproveitamento eficiente de resíduos florestais.

5. Agradecimentos

Os autores agradecem à Universidade do Estado do Amapá (UEAP) pelo suporte financeiro fornecido pelo EDITAL Nº 014/2026-PROPESP/UEAP. Os autores mencionam também o apoio da Universidade Federal de Lavras (UFLA) pelo apoio de pesquisadores

essenciais para a pesquisa desenvolvida. Agradecemos também à Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA) pelo apoio.

6. Referências bibliográficas

Abraham, E., Deepa, B., Pothan, L.A., Jacob, M., Thomas, S., Cvelbar, U., Anandjiwala, R. (2011). Extraction of nanocellulose fibrils from lignocellulosic fibres: a novel approach. Carbohyd Polym, 86, 14681475. https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2011.06.034

Balea, A., Merayo, N., Fuente, E., Negro, C., Blanco, A. (2016). Assessing the influence of refining, bleaching and TEMPO-mediated oxidation on the production of more sustainable cellulose nanofibers and their application as paper additives. Ind Crop Prod, 97, 374–387. DOI 10.1016/j.indcrop.2016.12.050

Balea, A., Fuente, E., Tarrés, Q., Àngels Pèlach, M., Mutjé, P., Delgado-Aguilar, M., Blanco, A., Negro, C. (2021). Influence of pretreatment and mechanical nanofibrillation energy on properties of nanofibers from Aspen cellulose. Cellulose, 28, 9187-9206. https:// doi. org/ 10. 1007/ s10570- 021- 04109-w

Chen, H., Jiang, J., Zhang, S., Yu, J., Liu, L., Fan, Y. (2022). Surface modification of cellulose originated from different plant sources through TEMPO/Laccase/O_2 oxidation. Ind Crop Prod, 176, 114295. https:// doi. org/ 10. 1016/j. indcr op. 2021. 114295

da Silva Costa, M., Pinto, E. P., Scatolino, M. V., Menezes, R. P., Mascarenhas, A. R. P., Dias, M. C., de Souza, T. M. (2026). Influence of Botanical Origin on the Optical, Surface, and Nanomechanical Properties of Nanocellulose-Based Films: A Comparative Study. Journal of Applied Polymer Science, 143, (19), e70631. https://doi.org/10.1002/app.70631

Dias, M.C., Belgacem, M.N., Resende, J.V., Martins, M.A., Damasio, R.A.P., Tonoli, G.H.D., Ferreira, S.R. (2022). Eco-friendly laccase and cellulase enzymes pretreatment for optimized production of high-content lignin-cellulose nanofibrils. Int. J. Biol. Macromol, 209, 413–425, https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2022.04.005.

do Lago, R.C., de Oliveira, A.L.M., Dias, M.C., de Carvalho, E.E.N., Tonoli, G.H.D.,VilasBoas, E.V.B. (2020). Obtaining cellulosic nanofibrils from oat straw for biocomposite reinforcement: mechanical and barrier properties. Ind Crop Prod, 148, 112264. https://doi.org/10.1016/j. indcrop.2020.112264

Guimarães, B. M. R., Scatolino, M. V., Martins, M. A., et al. (2022). Bio-based films/nanopapers from lignocellulosic wastes for production of added-value micro-/nanomaterials. Environmental science and pollution research, 29 (6), 8665-8683. https://doi.org/10.1007/s11356-021-16203-4

Fonseca, C.S., Scatolino, M.V., Silv,a L.E., Martins, M.A., Guimarães M Jr, Tonoli, G.H.D. (2021). Valorization of jute biomass: performance of fiber–cement composites extruded with hybrid reinforcement (fibers and nanofibrils). Waste Biomass Valor, 12, 5743-5761. https://doi.org/10.1007/ s12649-021-01394-1

Guimarães JR, M., Botaro, V.R., Novack, K.M., Teixeira, F.G., Tonoli, G.H.D. (2015). Starch/PVA-based nanocomposites reinforced with bamboo nanofibrils. Ind Crop Prod, 70, 72–83. https://doi.org/10.1016/j. indcrop.2015.03.014

Okahisa, Y., Furukawa, Y., Ishimoto, K., Narita, C., Intharapichai, K., Ohara, H. (2018). Comparison of cellulose nanofiber properties produced from different parts of the oil palm tree. Carbohyd Polym, 198, 313–319. https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2018.06.089

Pena, D.W.P., Tonoli, G.H.D., de Paula, P.T., et al. (2021). Exfoliating agents for skincare soaps obtained from the crabwood waste bagasse, a natural abrasive from Amazonia. Waste Biomass Valor, 12, 4441-4461. https:// doi. org/ 10. 1007/ s12649- 020- 01336-3

Saito, T., Kimura, S., Nishiyma, Y., Isogai, A. (2007). Cellulose nanofibers prepared by TEMPO-mediated oxidation of native cellulose. Biomacromol, 8 (8), 2485-2491. https:// doi. org/ 10. 1021/ bm070 3970

Santana, J.S., do Rosário, J.M,, Pola. C,C,, Otoni. C,G., Soares, N.F.F., Camilloto, G.P., Cruz, R.S. (2017). Cassava starch-based nanocomposites reinforced with cellulose nanofibrils extracted from sisal. J Appl Polym Sci, 134, 44637. https://doi.org/10.1002/app.44637

Scatolino, M.V., Bufalino, L., Mendes, L.M., Guimarães Júnior, M., Tonoli, G.H.D. (2017). Impact of nanofibrillation degree of eucalyptus and Amazonian hardwood sawdust on physical properties of cellulose nanofibril films. Wood Sci Technol, 51, 1095-1115. https:// doi. org/ 10. 1007/ s00226- 017- 0927-4

Setter, C., Mascarenhas, A.R.P., Dias, M.C., Meira, A.C.F.O., Carvalho, N.T.S., Lorenço, M.S., Martins, M.A., Tonoli, G.H.D., Oliveira. TJP. (2023). Surface modification of cellulosic nanofibrils by spray drying: drying yield and microstructural, thermal and chemical characterization. Ind. Crop. Prod, 201, 116899, https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2023.116899.

Souza LO, Lessa OA, Dias MC, Tonoli GHD, Rezende DVB, Martins MA,Neves ICO, de Resende JV, Carvalho EEN, Vilas Boas EVB, de Oliveira JR, Franco M (2019) Study of morphological properties and rheological parameters of cellulose nanofibrils of cocoa shell (Theobroma cacao L.). Carbohyd Polym 214:152–158. https://doi. org/10.1016/j.carbpol.2019.03.037

Wu, T., Cai, B., Wang, J., Zhang, C., Shi, Z., Yang, Q., Hu, G., Xiong, C. (2019). TEMPO-oxidized cellulose nanofibril/layered double hydroxide nanocomposite films with improved hydrophobicity, flame retardancy and mechanical properties. Compos Sci Technol, 171, 111117. https:// doi. org/ 10. 1016/j. comps citech. 2018. 12. 019

Zhang, C., Nair, S.S., Chen, H., Yan, N., Farnood, R., Li, F. (2019). Thermally stable, enhanced water barrier, high strength starch bio-composite reinforced with lignin containing cellulose nanofibrils. Carbohydr Polym, 230, 115626. https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2019.115626

a.

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Desenvolvimento de um hidrogel sustentável à base de nanofibrilas de celulose para o gerenciamento de água na produção de mudas de café

Felipe Gomes Batista[1]; Evelize Aparecida Amaral Shashiki[1]; Júlia Naves Teixeira[1]; Luiz Otávio de Souza Pereira[1]; Rafael Carvalho do Lago[1]; Cínthia Aparecida Silva[1]; Gustavo Henrique Denzin Tonoli[1]; Lourival Marin Mendes[1]

[1] Universidade Federal de Lavras

Resumo: O uso de hidrogéis superabsorventes em sistemas de produção de mudas representa uma estratégia promissora para a mitigação dos efeitos do déficit hídrico em viveiros agrícolas. Este estudo avaliou o desempenho agronômico de um hidrogel à base de nanofibrila de celulose (HNFC) em comparação a um hidrogel comercial em duas concentrações de sólidos ($HC_{0,5}$ e $HC_{1,2}$), utilizando mudas de *Coffea arabica* submetidas a estresse hídrico severo (25% da capacidade de retenção de água) e ausência de estresse (100%). Foram avaliados altura da planta, diâmetro do coleto, número de folhas, galhos e nós, volume radicular e vigor visual. O $HC_{1,2}$ apresentou melhor desempenho sob estresse hídrico, promovendo maior manutenção do número de folhas, indicando maior eficiência na retenção e disponibilização de água. Altura e diâmetro do coleto foram semelhantes entre o controle e os tratamentos com hidrogel comercial, enquanto o HNFC apresentou valores inferiores para essas variáveis, sugerindo a necessidade de otimização de sua formulação. Por outro lado, o HNFC preservou o volume radicular, o número de nós e o vigor visual, sem comprometer a qualidade das mudas. Os resultados demonstram o potencial do hidrogel à base de nanofibrila de celulose como alternativa sustentável aos polímeros sintéticos, destacando a otimização de sua capacidade de intumescimento e liberação de água como etapa essencial para sua aplicação em viveiros de café.

Palavras-chave: Hidrogel biodegradável; Estresse hídrico; Produção de mudas.

Development of a Sustainable Cellulose Nanofibril-Based Hydrogel for Water Management in Coffee Seedling Production

Abstract: The use of superabsorbent hydrogels in seedling production systems represents a promising strategy for mitigating the effects of water deficit in agricultural nurseries. This study evaluated the agronomic performance of a cellulose nanofibril-based hydrogel (CNFH) in comparison with a commercial hydrogel applied at two solid concentrations ($CH_{0.5}$ and $CH_{1.2}$) and a control treatment without hydrogel, using *Coffea arabica* seedlings subjected to severe water stress (25% of water retention capacity) and well-watered conditions (100%). Plant height, stem diameter, number of leaves, branches and nodes, root volume, and visual vigor were evaluated. $CH_{1.2}$ showed the best performance under water stress, maintaining a higher number of leaves and indicating greater efficiency in water retention and availability. Plant height and stem diameter were similar between the control and the commercial hydrogel treatments, whereas CNFH showed lower values for these traits, suggesting the need for optimization of its formulation. Conversely, CNFH preserved root volume, node number, and visual vigor without compromising seedling quality. These findings demonstrate the potential of cellulose nanofibril-based hydrogels as a sustainable alternative to synthetic polymers and

highlight the optimization of their swelling capacity and water-release kinetics as essential steps toward their application in coffee nurseries.

Keywords: Biodegradable hydrogel; Water stress; Seedling production.

1. Introdução

A crescente demanda por alimentos e as mudanças climáticas têm intensificado a pressão sobre os recursos hídricos, tornando indispensável o desenvolvimento de tecnologias que aumentem a eficiência do uso da água na agricultura. Como principal consumidora de água doce, essa atividade enfrenta desafios relacionados à escassez hídrica, à degradação do solo e ao uso intensivo de insumos agrícolas (Wang e Azam, 2024). Nesse contexto, os hidrogéis destacam-se como materiais capazes de aumentar a retenção de água no solo e melhorar a eficiência do uso hídrico, contribuindo para sistemas produtivos mais sustentáveis (Qin et al., 2024).

Na cafeicultura, cultura de elevada importância econômica para o Brasil, o déficit hídrico compromete significativamente o crescimento e o estabelecimento das mudas, especialmente em regiões sujeitas a longos períodos de seca (Dominghetti et al., 2024). Assim, a utilização de hidrogéis no manejo hídrico representa uma estratégia promissora para reduzir a frequência de irrigação e aumentar a disponibilidade de água às plantas (Li e Chen, 2020; Wu et al., 2024).

Os hidrogéis são redes poliméricas tridimensionais capazes de absorver e liberar água de forma gradual, apresentando características como estabilidade, biocompatibilidade e biodegradabilidade (Mehta et al., 2023). Entre os materiais de origem renovável utilizados em sua formulação, a nanocelulose destaca-se por sua elevada área superficial, resistência mecânica e abundância de grupos hidrofílicos, propriedades que favorecem a retenção de água e a formação de estruturas poliméricas estáveis (Ghasemlou et al., 2021; Tofanica et al., 2025; Jaramillo-Quiceno et al., 2024). Além disso, sua obtenção a partir de resíduos de papel agrega valor a subprodutos industriais e fortalece os princípios da economia circular (Wang et al., 2024).

Embora apresentem elevado potencial, hidrogéis sustentáveis à base de nanocelulose ainda demandam estudos para comprovar sua eficiência agronômica e otimizar suas propriedades físico-químicas. Nesse contexto, este trabalho avaliou o desempenho de um hidrogel desenvolvido com nanofibrilas de celulose obtidas de resíduos de tubos de papel na produção de mudas de *Coffea arabica* sob diferentes condições de disponibilidade hídrica.

2. Material e métodos

O experimento foi conduzido no viveiro da Universidade Federal de Lavras (UFLA), localizado no município de Lavras, Minas Gerais, Brasil, durante um período experimental de 60 dias. Foram utilizadas mudas de *Coffea arabica* L., cultivadas em vasos plásticos com capacidade volumétrica de 3,6 L, preenchidos com substrato comercial à base de fibras de madeira.

Para a produção do hidrogel experimental, foram utilizados resíduos de tubos de papel Kraft, com gramatura média de 400 g m^{-2}, fornecidos pela empresa Tubominas Indústria e Comércio Ltda., como matéria-prima para obtenção das nanofibrilas de celulose (NFC). As NFCs foram produzidas por meio de um pré-tratamento químico de branqueamento, seguido de homogeneização mecânica. O hidrogel (HNFC) foi formulado pela combinação das nanofibrilas de celulose branqueadas com alginato de sódio, sendo posteriormente reticulado com cloreto de cálcio di-hidratado (massa molar de 147,01 g mol^{-1}). O processo de branqueamento empregou peróxido de hidrogênio P.A. a 35% e hidróxido de sódio, ambos de grau analítico.

Além do hidrogel experimental, foi utilizado um hidrogel comercial amplamente empregado em viveiros agrícolas, aplicado em duas concentrações distintas, com teores de sólidos de 0,5% ($HC_{0,5}$) e 1,2% ($HC_{1,2}$). Adicionalmente, foi incluído um tratamento controle, sem aplicação de hidrogel, para fins de comparação.

O experimento foi instalado em delineamento em blocos casualizados, constituído por 13 blocos e quatro tratamentos: (i) controle, sem aplicação de hidrogel; (ii) hidrogel comercial na concentração de 0,5% de sólidos; (iii) hidrogel comercial na concentração de 1,2% de sólidos; e (iv) hidrogel experimental à base de nanocelulose branqueada. Cada tratamento foi composto por 25 unidades experimentais, totalizando 100 mudas avaliadas.

As mudas foram submetidas a duas condições de disponibilidade hídrica, correspondentes a 100% da capacidade de campo (sem estresse hídrico) e 25% da capacidade de campo (estresse hídrico severo), com distribuição uniforme das unidades experimentais entre os tratamentos e as condições de irrigação.

Os hidrogéis foram incorporados diretamente ao substrato no momento do transplantio, na proporção de 500 g por vaso. Simultaneamente, foi realizada a adubação de plantio com superfosfato simples e sulfato de magnésio. Durante a condução do experimento, efetuou-se adubação foliar com o fertilizante Prime Energy®, contendo manganês, zinco, cobre

e enxofre, na dosagem de 5 mL para cada 2 L de água, aplicada em um lote de 100 plantas. A cada 30 dias, em alternância com a fertilização foliar, realizou-se aplicação preventiva dos inseticidas Voliam Targo® e K-Othrine®, visando ao controle do bicho-mineiro (*Leucoptera coffeella*), conforme as recomendações técnicas para viveiros de cafeeiro.

A eficiência dos hidrogéis na retenção de água foi avaliada por meio do monitoramento da perda hídrica ao longo do experimento. Para isso, os vasos foram pesados periodicamente, permitindo estimar a evaporação e o consumo de água pelas plantas. Sempre que a umidade do substrato atingia valores inferiores aos níveis estabelecidos para cada tratamento hídrico (25% ou 100% da capacidade de campo), realizava-se a irrigação até o restabelecimento da capacidade de campo correspondente, assegurando a manutenção das condições experimentais previamente definidas.

Ao final do período experimental, foram avaliados os parâmetros morfológicos da parte aérea e do sistema radicular das mudas. A altura da parte aérea foi mensurada com régua milimetrada, considerando a distância entre o colo e o ápice da planta, enquanto o diâmetro do coleto foi determinado com paquímetro digital. Também foram quantificados, por contagem manual, o número de folhas completamente expandidas, o número de galhos laterais desenvolvidos e o número de nós presentes ao longo do caule principal.

Para a avaliação do sistema radicular, as mudas foram cuidadosamente removidas dos vasos e o substrato aderido às raízes foi eliminado por lavagem. Em seguida, foram determinados o número de raízes visíveis e o comprimento médio das raízes, utilizando contagem manual e régua milimetrada, respectivamente. A massa fresca do sistema radicular foi obtida imediatamente após a coleta em balança analítica, enquanto a massa seca foi determinada após secagem do material em estufa de circulação forçada de ar até massa constante.

O vigor das mudas foi avaliado por meio de análise visual, considerando características como coloração da parte aérea, integridade das folhas, espessura do caule e uniformidade do desenvolvimento entre as plantas de cada tratamento. Com base nesses critérios, as mudas foram classificadas em uma escala ordinal de 1 a 5, em que 1 correspondeu a mudas muito fracas e 5 a mudas muito vigorosas.

Os dados obtidos foram submetidos à análise de variância (ANOVA) e, quando constatado efeito significativo dos tratamentos pelo teste F ($p \leq 0,05$), as médias foram comparadas pelo teste de Scott–Knott ao nível de 5% de probabilidade. As análises estatísticas foram realizadas utilizando o software R.

2. Resultados e discussão

Os parâmetros morfológicos avaliados nas mudas de café submetidas a diferentes tratamentos com hidrogel, sob condições de estresse hídrico severo e sem estresse hídrico, evidenciaram respostas distintas em função do tipo e da concentração do polímero utilizado (Figura 1). De maneira geral, os tratamentos com hidrogel comercial ($HC_{0,5}$ e $HC_{1,2}$) apresentaram desempenho equivalente ou superior ao controle em diversas variáveis, enquanto o hidrogel à base de nanofibrila de celulose (HNFC) demonstrou limitações em algumas características morfológicas, indicando a necessidade de ajustes em sua formulação para aplicação em condições de viveiro.

O diâmetro do coleto apresentou tendência semelhante à altura (Figura 1a), sendo inferior no tratamento HNFC. Esse atributo é amplamente reconhecido como um dos mais confiáveis indicadores da qualidade de mudas, por integrar características de crescimento e refletir o potencial de estabelecimento, sobrevivência e desenvolvimento inicial das plantas após o transplantio (Eloy et al., 2026). A ausência de diferença entre Controle, $HC_{0,5}$ e $HC_{1,2}$ sugere que, nessas concentrações, o hidrogel comercial não promoveu incremento adicional no diâmetro, mas foi capaz de manter níveis equivalentes ao tratamento sem polímero, mesmo sob severo déficit hídrico, o que representa um resultado positivo do ponto de vista da economia hídrica em viveiros.

Para a altura de mudas (Figura 1b), os tratamentos Controle, $HC_{0,5}$ e $HC_{1,2}$ não diferiram estatisticamente entre si em nenhuma das condições hídricas avaliadas, enquanto o HNFC apresentou valores significativamente inferiores, com médias de 42,8 cm (estresse severo) e 45,7 cm (sem estresse). A menor eficiência do HNFC na manutenção da altura pode estar associada à sua maior rigidez estrutural e menor capacidade de intumescimento em condições de baixo potencial hídrico do substrato, características inerentes ao processo de reticulação de nanofibrilas de celulose (Baraka et al. 2025).

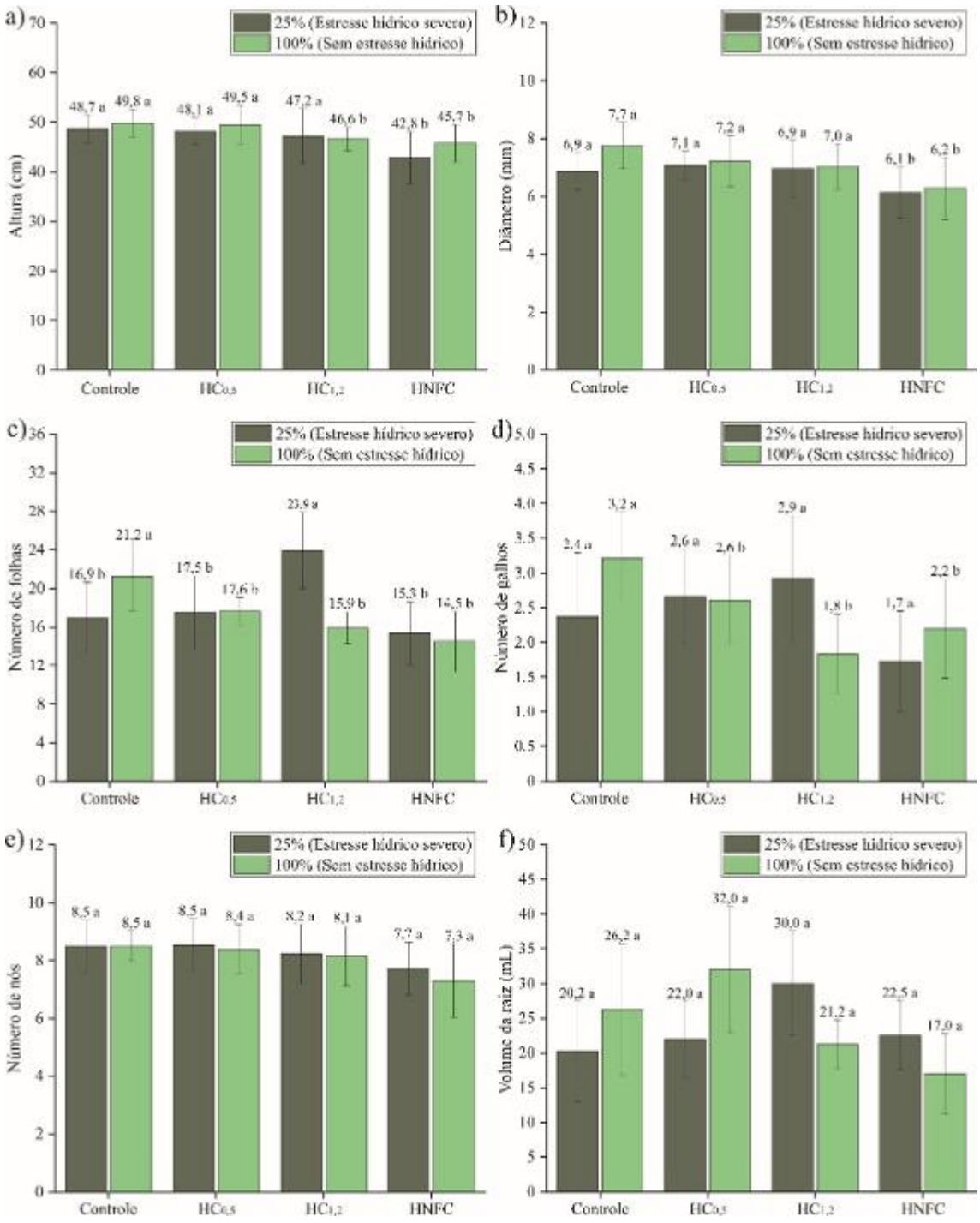


Figura 1 – Parâmetros morfológicos da parte aérea e do sistema radicular de mudas submetidas a diferentes tratamentos com hidrogel sob duas condições hídricas: Médias seguidas pela mesma letra, dentro de cada condição hídrica, não diferem entre si pelo teste de Scott–Knott a 5% de probabilidade.

O número de folhas foi a variável que melhor discriminou os tratamentos sob estresse hídrico severo (Figura 1c). O tratamento $HC_{1,2}$ apresentou a maior média (23,9 folhas), diferindo significativamente dos demais, o que indica maior capacidade de manutenção da área foliar sob déficit hídrico, provavelmente em função da maior retenção e disponibilidade de água no substrato. Em contraste, na ausência de estresse hídrico, o tratamento controle apresentou o maior número de folhas (21,2), superando os tratamentos com hidrogel. Esse comportamento sugere que, sob irrigação plena, o excesso de água retida pelo polímero pode reduzir a porosidade de aeração do substrato, limitando a difusão de oxigênio para o sistema radicular e comprometendo o crescimento vegetativo, fenômeno associado à hipoxia radicular em substratos com elevada retenção de água (Montesano et al., 2015; Oladosu et al., 2022).

Para o número de galhos, não foram detectadas diferenças estatísticas entre os tratamentos sob estresse severo (Figura 1d). Sob condição hídrica plena, o Controle tendeu a apresentar maior número de galhos, embora sem diferença significativa em relação ao $HC_{0,5}$ e HNFC. O $HC_{1,2}$ apresentou o menor valor, sugerindo que a maior retenção de água nesse tratamento pode ter influenciado o padrão de partição de assimilados entre órgãos vegetativos.

O número de nós não apresentou diferenças significativas entre os tratamentos (Figura 1e), indicando baixa sensibilidade dessa variável às condições hídricas e aos hidrogéis avaliados. Esse comportamento sugere que a arquitetura básica do caule é menos influenciada por fatores ambientais de curto prazo e apresenta maior controle genético e ontogenético.

O volume radicular também não diferiu significativamente entre os tratamentos, embora o HC0,5 tenha apresentado tendência a maiores valores (Figura 1f). A elevada variabilidade experimental pode ter reduzido o poder de detecção de diferenças estatísticas, indicando a necessidade de avaliações de maior duração. A manutenção do volume radicular no tratamento com hidrogel à base de nanofibrilas de celulose (HNFC) sugere que esse material não compromete o desenvolvimento das raízes e pode favorecer a retenção de água na rizosfera por meio de sua rede hidrofílica tridimensional, contribuindo para a manutenção de microambientes com maior disponibilidade hídrica (Navroski et al. 2016; Baraka et al. 2025).

O vigor visual das mudas, avaliado por meio de escala de classes, não apresentou diferença estatística significativa entre os tratamentos em nenhuma das condições hídricas testadas, com médias variando de 1,8 a 2,3 (Figura 2). Esse resultado indica que os diferentes hidrogéis não promoveram alterações expressivas na qualidade visual das mudas, sugerindo desempenho semelhante quanto aos atributos morfofisiológicos integrados. Além disso, a manutenção do vigor mesmo sob estresse hídrico evidencia a capacidade adaptativa do cafeeiro

e indica que os hidrogéis contribuíram para preservar a qualidade mínima das mudas durante o período experimental.

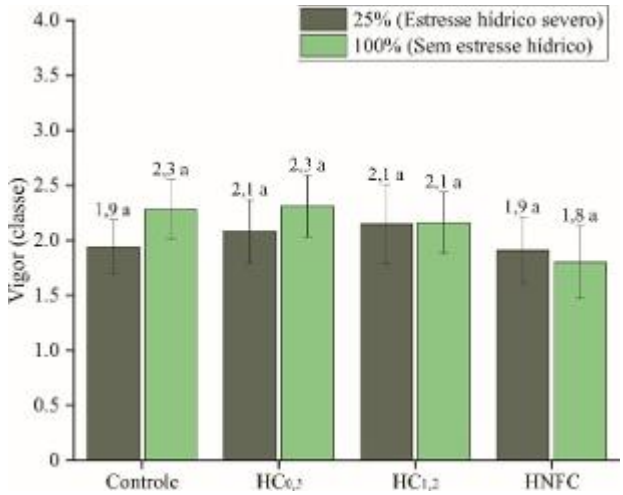


Figura 2 – Parâmetro visual das mudas (vigor) submetidas a diferentes tratamentos com hidrogel sob duas condições hídricas: Médias seguidas pela mesma letra, dentro de cada condição hídrica, não diferem entre si pelo teste de Scott–Knott a 5% de probabilidade.

3. Conclusões

Os resultados demonstram que os hidrogéis influenciaram o desenvolvimento das mudas de *Coffea arabica* de forma dependente da disponibilidade hídrica. O hidrogel comercial na concentração de 1,2% ($HC_{1,2}$) apresentou melhor desempenho sob estresse hídrico, promovendo maior manutenção do número de folhas e evidenciando maior eficiência na retenção e disponibilização de água. O hidrogel à base de nanofibras de celulose (HNFC), embora tenha apresentado desempenho inferior para altura e diâmetro do coleto, preservou o desenvolvimento radicular, indicando potencial para aplicação agrícola e necessidade de otimização de sua capacidade de intumescimento e liberação de água. A ausência de diferenças no vigor visual reforça que nenhum dos tratamentos comprometeu a qualidade das mudas. Em conjunto, os resultados evidenciam o potencial dos hidrogéis de base biológica como alternativa sustentável para o manejo hídrico na produção de mudas de café, destacando a necessidade de estudos adicionais para aprimorar suas propriedades e validar seu desempenho em condições de campo.

4. Agradecimentos

Os autores agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) pelo apoio financeiro e pelo incentivo ao desenvolvimento da pesquisa científica. Agradecem à empresa Tubominas Indústria e Comércio Ltda. pelo fornecimento dos resíduos utilizados neste estudo e pela parceria institucional, fundamentais para a execução deste trabalho. Também expressam seus agradecimentos ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), à Universidade Federal de Lavras (UFLA) e ao Laboratório de Engenharia de Biomateriais pelo suporte técnico, científico e estrutural disponibilizado ao longo da pesquisa.

5. Referências bibliográficas

Baraka, F., Morales, A., Velazco-Cabral, I., Rivilla, I., & Labidi, J. (2025). Physically cross-linked cellulose nanofiber (LCNF/CNF) hydrogels: impact of the composition on mechanical and swelling properties. Advanced Composites and Hybrid Materials, 8(1), 151. https://doi.org/10.1007/s42114-025-01218-z

Dominghetti, A. W., Freitas, T., Silveira, H. R. D. O., & Guimarães, R. J. (2024). Resilience to water deficit of coffee seedlings produced through cuttings and somatic embryogenesis. Revista Ceres, 71, e71051. https://doi.org/10.1590/0034-737X2024710051

Eloy, E., de Souza Mangini, T., Junior, R. L., & Nardini, C. (2026). Seedling density on the morphological quality of *Toona ciliata* M. Roem. (MELIACEAE). Floresta, 56(1), e96770-e96770. https://doi.org/10.5380/rf.v56i1.96770

Ghasemlou, M., Daver, F., Ivanova, E. P., Habibi, Y., & Adhikari, B. (2021). Surface modifications of nanocellulose: From synthesis to high-performance nanocomposites. Progress in Polymer Science, 119, 101418. https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2021.101418

Jaramillo-Quiceno, N., Duque Carmona, A. S., Serna Serna, J., Carmona, D. M., Torres-Taborda, M., Hincapié-Llanos, G. A., Santa Marín, J. F., & Álvarez-López, C. (2024). Enhancing soil water retention and plant growth with thermal crosslinked silk sericin-based hydrogel. Journal of Environmental Chemical Engineering, 12(2), 112260. https://doi.org/10.1016/j.jece.2024.112260

Li, S., & Chen, G. (2020). Agricultural waste-derived superabsorbent hydrogels: Preparation, performance, and socioeconomic impacts. Journal of Cleaner Production, 251, 119669. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119669

Qin, C., Wang, H., Zhao, Y., Qi, Y., Wu, N., Zhang, S., & Xu, W. (2024). Recent advances of hydrogel in agriculture: Synthesis, mechanism, properties and applications. European Polymer Journal, 219, 113376. https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2024.113376

Mehta, P., Sharma, M., & Devi, M. (2023). Hydrogels: An overview of its classifications, properties, and applications. Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials, 147, 106145. https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2023.106145

Montesano, F. F., Parente, A., Santamaria, P., Sannino, A., & Serio, F. (2015). Biodegradable superabsorbent hydrogel increaseswater retention properties of growing media and plant growth. Agriculture and agricultural science procedia, 4, 451-458. https://doi.org/10.1016/j.aaspro.2015.03.052

Navroski, M. C., Araújo, M. M., Cunha, F. D. S., Berghetti, Á. L. P., & Pereira, M. D. O. (2016). Redução da adubação e melhoria das características do substrato com o uso do hidrogel na produção de mudas de *Eucalyptus dunnii* Maiden. Ciência Florestal, 26, 1155-1165. https://doi.org/10.5902/1980509825106

Oladosu, Y., Rafii, M. Y., Arolu, F., Chukwu, S. C., Salisu, M. A., Fagbohun, I. K., Muftaudeen, T. K., Swaray, S., & Haliru, B. S. (2022). Superabsorbent polymer hydrogels for sustainable agriculture: A review. Horticulturae, 8(7), 605. https://doi.org/10.3390/horticulturae8070605

Tofanica, B.-M.; Mikhailidi, A.; Fortună, M.E.; Rotaru, R.; Ungureanu, O.C.; Ungureanu, E. Cellulose Nanomaterials: Characterization Methods, Isolation Techniques, and Strategies. Crystals 2025, 15, 352. https://doi.org/10.3390/cryst15040352

Wang, J., & Azam, W. (2024). Natural resource scarcity, fossil fuel energy consumption, and total greenhouse gas emissions in top emitting countries. Geoscience Frontiers, 15(2), 101757. https://doi.org/10.1016/j.gsf.2023.101757

Wang, Y., Wang, Z., Lin, Y., Qin, Y., He, R., Wang, M., Sun, Q., & Peng, Y. (2024). Nanocellulose from agro-industrial wastes: A review on sources, production, applications, and current challenges. Food Research International, 192, 114741. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2024.114741

Wu, Y., Li, S. & Chen, G. Hydrogels as water and nutrient reservoirs in agricultural soil: a comprehensive review of classification, performance, and economic advantages. Environ Dev Sustain 26, 24653–24685 (2024). https://doi.org/10.1007/s10668-023-03706-y

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Determinação da Força Máxima de Ruptura e Alongamento de Fios de Algodão revestidos com Látex de *Hevea brasiliensis*

Davi Ferreira Castro Cabral[1]; Ana Julia Alves Pereira[1]; Davi Bueno Araujo[1]; Davih Barbosa Abranches[1]; Laura Menezes Côrrea[1]; William Colatino Martins[1]; William Moreira de Oliveira[1]; Vinicius Resende de Castro[1]

[1] Universidade Federal de Viçosa

Resumo: O revestimento de látex natural de *Hevea brasiliensis* em fios de algodão forma uma camada elastomérica que altera suas propriedades mecânicas. Este estudo avaliou a força máxima de ruptura e o alongamento de fios de algodão com e sem revestimento de látex, em diferentes espessuras, por ensaios de tração realizados em máquina universal, conforme a ABNT NBR ISO 13934-1:2016. Os resultados demonstraram aumento significativo da resistência dos fios revestidos, com maior força de ruptura à medida que a espessura aumentou. O fio revestido de 10 mm apresentou resistência média de 176,1 kgf, enquanto o controle atingiu 51,0 kgf, correspondendo a incremento de aproximadamente 245%. O alongamento não aumentou proporcionalmente, indicando maior estabilidade estrutural. Conclui-se que o látex natural de *Hevea brasiliensis* é uma alternativa eficiente e sustentável para reforçar fios de algodão, ampliando seu potencial de aplicação na indústria têxtil e na moda sustentável.

Palavras-chave: Amazônia; Sustentabilidade; Tração.

Determination of the Maximum Force and Elongation of Cotton Yarns Coated with *Hevea brasiliensis* Latex

Abstract: Natural *Hevea brasiliensis* latex coating on cotton yarns forms an elastomeric layer that modifies their mechanical properties. This study evaluated the maximum breaking force and elongation of cotton yarns with and without latex coating at different thicknesses through tensile tests performed on a universal testing machine, according to ABNT NBR ISO 13934-1:2016. The results showed a significant increase in the mechanical strength of the coated yarns, with breaking force increasing as coating thickness increased. The 10 mm coated yarn exhibited an average breaking strength of 176.1 kgf, whereas the uncoated control reached 51.0 kgf, corresponding to an increase of approximately 245%. Elongation did not increase proportionally, indicating greater structural stability. It was concluded that natural *Hevea*

brasiliensis latex is an efficient and sustainable alternative for reinforcing cotton yarns, expanding their potential applications in the textile industry and sustainable fashion.

Keywords: Amazon; Sustainability; Tensile.

398.Introdução

A seringueira *Hevea brasiliensis* (Wild. Ex. Adr. De Juss) Müell Arg. originária da região amazônica do Brasil, tem uma grande representatividade no mundo quando o assunto se trata de borracha natural (Alvarenga, 2014). A borracha natural é utilizada por diversos produtos desde a indústria têxteis, indústria farmacêutica, hospitalar, automotiva e até mesmo materiais bélicos, entre outros (Alvarenga, 2014). Além da importância econômica da borracha natural, a atividade extrativista desempenha papel relevante na Amazônia, contribuindo para a geração de emprego, renda e para o aproveitamento dos recursos florestais (Homma, 2014). O látex natural oriundo de *Hevea brasiliensis* constitui uma matéria-prima renovável e ambientalmente favorável, sendo considerado um biomaterial promissor para aplicações sustentáveis em revestimentos têxteis (Prasad et al., 2026).

O látex natural proveniente de *Hevea brasiliensis* consiste em uma dispersão coloidal complexa composta predominantemente por partículas de poli (cis-1,4-isopreno), sendo responsável por trazer as características essenciais como alta elasticidade e flexibilidade, resistência mecânica e maleabilidade (Prasad et al., 2016). Em comparação aos sintéticos derivados do petróleo (uma fonte não renovável), o látex natural gera menores impactos ambientais e potencial biodegradável, tornando-se uma fonte sustentável (Prasad et al., 2016). A borracha natural tem grandes limitações quando comparada à borracha sintética, pelo fato de apresentar alta susceptibilidade à ação de fungos e a degradação em ambientes úmidos, além de sua produção depender de fatores biológicos e climáticos, o que pode causar oscilações na disponibilidade e na qualidade da matéria-prima (Mark et al., 2013).

Entre as diversas aplicações do látex natural, se destaca a indústria têxtil, onde se utiliza para revestimentos de fios de algodão como produto da indústria da moda como biojóias, crachás, acessórios e peças vestuários, bem como no uso em cadarços de sapatos e tênis. O crescente interesse por materiais de origem renovável tem impulsionado a utilização de fibras naturais na indústria da moda, uma vez que consumidores tendem a associá-las a produtos mais sustentáveis e ambientalmente responsáveis (Sigaard & Laitala, 2023).

Nesses produtos têxteis, os fios revestidos devem apresentar propriedades mecânicas adequadas, como elevada resistência a tração, boa capacidade de alongamento, garantindo a

integridade do revestimento durante o uso e a fabricação. A determinação destas propriedades pode ser realizada por ensaios de tração de acordo com a norma ABNT NBR ISO 13934-1, que descreve o método para determinação da força máxima e do alongamento de materiais têxteis.

O valor do látex natural puro e dos fios de algodão, isoladamente, são consideravelmente baixos, surgindo assim o revestimento do fio de algodão revestidos de látex agregando mais valor no produto final, além de modificar as propriedades mecânicas. O revestimento de látex ao fio de algodão faz com que surge uma camada elastomérica em volta do fio, alterando a resistência à tração e na capacidade de deformação do material, características fundamentais para aplicações que exigem desempenho mecânico (Ahmad et al., 2012).

Dessa forma, a determinação da resistência máxima e do alongamento de fios de algodão revestidos com látex natural torna-se essencial para avaliar a capacidade de carga para romper os fios e definir usos para este biomaterial. Assim, o presente trabalho teve como objetivo caracterizar a resistência máxima e alongamento de diferentes espessuras de fios de algodão embebidos com látex não coagulado, por meio dos ensaios mecânicos de tração.

399.Material e métodos

Os fios de algodão cru foram revestidos com látex natural não coagulado de *Hevea brasiliensis*, oriundas da região amazônica (Belém, Pará). Aditivos para promover adesão e estabilização da dispersão foram utilizados, em que inicialmente, o látex foi submetido a um processo de clarificação e armazenamento com fosfato de amônio (DAP), na proporção de 20 mL/L, permanecendo em decantação por 24 horas. Em seguida, o material foi filtrado com tecido tipo voal, sendo descartada uma fração do sobrenadante.

O látex filtrado foi então submetido à vulcanização térmica com adição de agente vulcanizante (Vulkatar MC, 20 mL/L), sob aquecimento a 65 °C por 20 minutos, seguido de repouso por 24 horas em ambiente coberto. Após esse processo, o sobrenadante foi removido e o material passou por nova filtração e armazenamento.

Antes da aplicação nos fios, o látex vulcanizado recebeu aditivos complementares: amaciante (15 mL/L), antioxidante/anticoagulante (5 mL/L), solução diluída de simeticona (5 ml/L) e essência de lavanda (5 ml /L). Em casos de baixa viscosidade, foi adicionado espessante (Torgnol W), na proporção de 50 g/L.

Os fios de algodão foram previamente imergidos em uma solução de ácido acético (8%) e em seguida na solução contendo o látex natural não coagulado com os aditivos mencionados, para favorecer a adesão ao algodão. O processo de secagem foi ao sol durante 1 hora.

As amostras utilizadas no ensaio mecânico foram os fios de algodão embebidos no látex em diferentes espessuras (1, 2, 3, 4 e 10 mm) e dois tratamentos de fio de algodão de 4 mm e 10 mm sem nenhum revestimento, que foram fixados nas garras da máquina universal de ensaios, e realizado o ensaio de alongamento a uma taxa constante de deformação de 10 Mpa/min (Figura 1). Durante o teste, sensores captaram continuamente a força aplicada e o deslocamento ocorrido, permitindo a geração de gráficos de tensão x deformação x tempo. O procedimento seguiu normas técnicas da norma ABNT NBR ISO 13934-1 (2016), adaptada para fios.

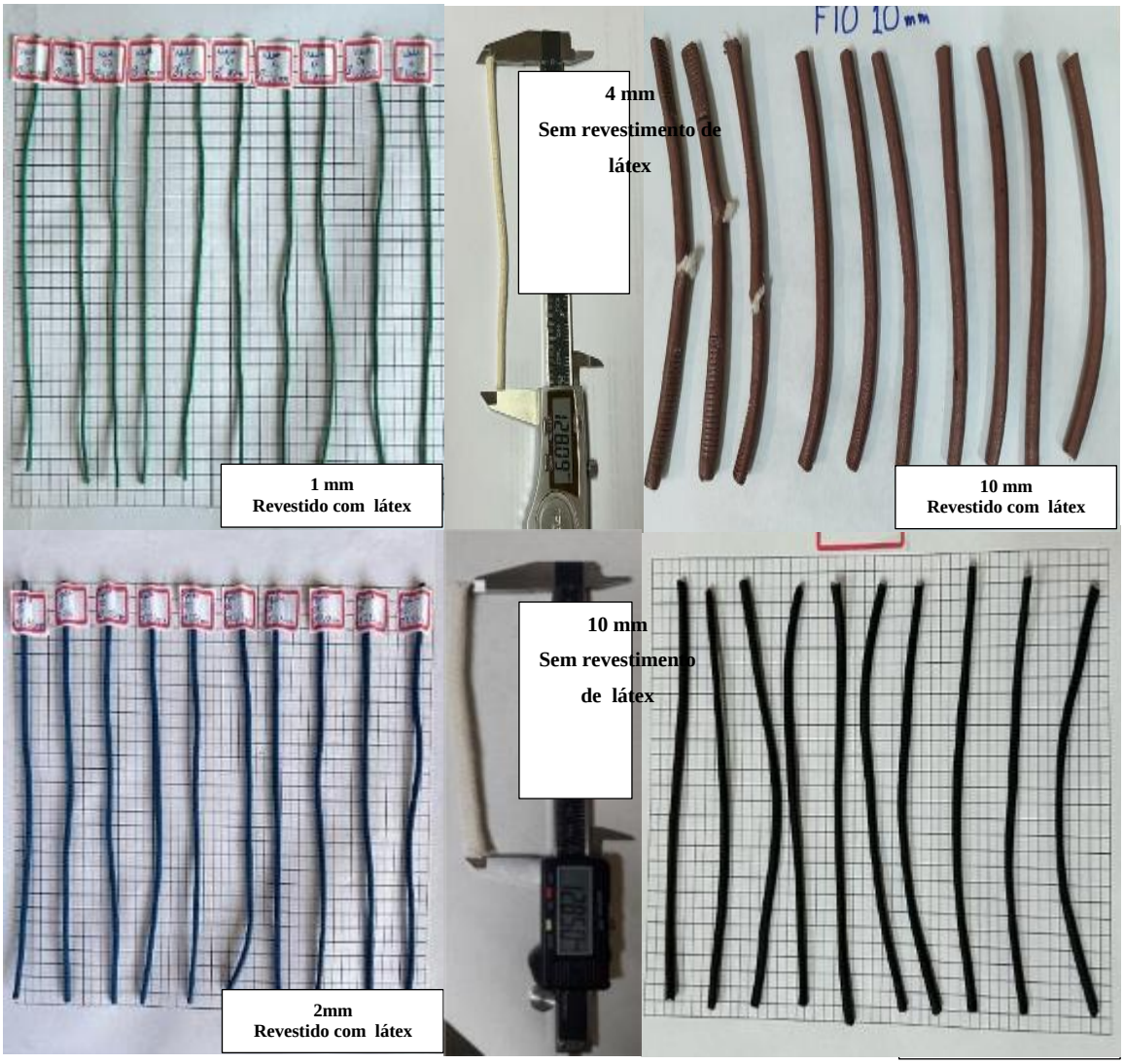


Figura 1- Fios de diferentes espessuras (1mm, 2mm, 10mm, 4 mm, 4mm – revestidos com látex e os fios 4 e 10 mm sem revestimento de látex), submetidos ao ensaio mecânico.



Figura 2- Montagem e execução do ensaio de tração dos fios, evidenciando o posicionamento das amostras entre as garras e o sistema de carregamento utilizado para determinação da determinação da força máxima de ruptura e alongamento.

400.Resultados e discussão

O revestimento dos fios de algodão com látex natural de *Hevea brasiliensis* promoveu alterações significativas no comportamento mecânico do material, principalmente em relação à resistência máxima de ruptura. O revestimento com látex ao substrato fibroso do fio de algodão resultou em aumento expressivo da capacidade de suporte de carga dos fios quando comparados aos tratamentos sem revestimento com látex. Para o fio de 10 mm, a força máxima média aumentou de 51,0 kgf no controle (sem revestimento) para 176,1 kgf após o revestimento com látex, representando incremento aproximado de 245%. De maneira semelhante, o fio de 4 mm apresentou aumento da resistência de 24,8 kgf para 71,6 kgf, correspondente a um ganho de aproximadamente 189%. Esses resultados demonstram que a aplicação do látex atua como uma estratégia eficiente de reforço mecânico para fios de algodão..

O aumento da resistência mecânica pode estar relacionado à formação de uma camada elastomérica contínua ao redor das fibras de algodão, promovendo maior interação entre os elementos constituintes do material. Durante o ensaio de tração, essa camada atua como uma

matriz de transferência de tensões, reduzindo o deslizamento entre as fibras individuais e favorecendo uma distribuição mais homogênea dos esforços aplicados. Dessa forma, o sistema algodão/látex apresenta comportamento semelhante ao observado em materiais compósitos naturais, nos quais uma fase contínua polimérica contribui para o aumento da resistência e estabilidade estrutural do conjunto.

Tabela 1 – Resultado médio da Força Máxima de ruptura dos fios

Espessura do fio (mm)	Tipo de revestimento	Força Máxima (kgf)	Coef. De variação (%)
1	Com Látex	4,0	16,67
2	Com Látex	12,7	3,80
3	Com Látex	29,7	4,21
4	Com Látex	71,6	3,56
10	Com Látex	176,1	8,94
4	Sem revestimento	24,8	10,63
10	Sem revestimento	51,0	8,94

A influência da espessura do revestimento também foi evidente nos resultados obtidos. Os fios revestidos apresentaram aumento progressivo da força máxima de ruptura com o incremento da espessura, variando de 4,0 kgf para o fio de 1 mm, 12,7 kgf para 2 mm, 29,7 kgf para 3 mm, 71,6 kgf para 4 mm e 176,1 kgf para 10 mm. Esse comportamento indica que maiores quantidades de látex aderidas ao fio proporcionam maior área efetiva resistente e ampliam a capacidade do material de suportar cargas de tração. Assim, o aumento da espessura do revestimento representa um fator determinante para o desempenho mecânico do biomaterial desenvolvido.

Os resultados estão de acordo com Ahmad et al. (2012), que observaram melhoria das propriedades mecânicas de materiais têxteis revestidos com látex natural devido à formação de uma película polimérica capaz de aumentar a coesão estrutural e melhorar a distribuição das tensões durante o carregamento. Entretanto, diferentemente de materiais totalmente elastoméricos, nos quais o aumento da quantidade de borracha geralmente proporciona maior deformabilidade, o sistema avaliado apresentou aumento da resistência sem incremento proporcional do alongamento. O comportamento do alongamento demonstrou que o revestimento modifica não apenas a resistência, mas também o mecanismo de deformação dos fios. Os valores obtidos para os fios revestidos variaram entre 14,1 e 29,1 mm, enquanto os controles sem revestimento apresentaram valores de 24,7 e 31,1 mm (Tabela 2). A ausência de aumento proporcional do alongamento sugere que o látex atua restringindo parcialmente o movimento relativo entre as fibras de algodão, reduzindo o deslizamento interfibrilar durante

a aplicação da carga. Esse efeito contribui para maior estabilidade estrutural do material, embora resulte em menor capacidade de deformação antes da ruptura.

Tabela 2 – Resultado do Alongamento Médio

Espessura do fio (mm)	Tipo de revestimento	Alongamento Médio (mm)	CV%
1	Látex	14,1	8,28
2	Látex	29,1	12,59
3	Látex	18,6	26,25
4	Látex	24,5	20,71
10	Látex	26,1	4,31
4	Sem revestimento	24,7	7,89
10	Sem revestimento	31,1	13,23

Segundo Tusief et al. (2014), as propriedades mecânicas do algodão são totalmente influenciadas por características de sua estrutura, como torção, pilosidade e atrito entre fibras. Com a ausência deste revestimento as fibras ficam mais soltas, logo torna mais suscetíveis ao deslizamento e a concentração de localizada de tensões, favorecendo assim a rupturas a cargas mais baixas conforme avaliado no fio sem tratamento de 4 mm – média 24,8 kgf, e no fio sem tratamento de 10 mm – média 51,0 kgf. Diante disso, observamos que o látex atua como uma matriz de reforço, promovendo maior coesão entre as fibras e aumentando acentuadamente a resistência ao biomaterial.

Além do ganho mecânico, a aplicação do látex desempenha importante papel na funcionalidade. Conforme destacou Prasad et al. (2026), revestimentos poliméricos são amplamente empregados para aumentar a durabilidade, a resistência ao desgaste e agregar novas funções aos materiais têxteis, sendo o látex natural considerado uma alternativa ambientalmente sustentável por sua origem renovável e biodegradável. Neste caso, os resultados obtidos reforçam o potencial do látex de *Hevea brasiliensis* como matéria-prima para revestimentos de fios de algodão destinados à fabricação de produtos artesanais, acessórios têxteis e aplicações voltadas à moda sustentável. Além da elevação do desempenho mecânico do material, o emprego de uma matéria-prima renovável agrega valor tecnológico e ambiental ao produto final, ampliando suas aplicações industrial e comercial.

401.Conclusões

O revestimento de fios de algodão com látex natural de *Hevea brasiliensis* promoveu melhorias significativas no desempenho mecânico das amostras, principalmente quanto à resistência à tração, sendo os maiores valores observados nos fios de maior espessura. Em relação ao alongamento, verificou-se que o revestimento não promoveu aumento proporcional da

deformação, indicando que o látex atua como uma matriz de reforço, aumentando a coesão entre as fibras e proporcionando maior estabilidade estrutural durante o carregamento. Dessa forma, o uso de látex natural mostra potencial para aplicações em produtos têxteis sustentáveis, agregando valor tecnológico e ambiental aos fios de algodão.

402.Agradecimentos

Os autores agradecem à EMBRAPII (Empresa Brasileira de Pesquisa e Inovação Industrial) e à empresa DaTribu pelo apoio financeiro concedido ao projeto de inovação ao qual este trabalho está vinculado, tornando possível o desenvolvimento das atividades de pesquisa.

Agradecem, ainda, ao Laboratório de Propriedades da Madeira (LPM) – Universidade Federal de Viçosa (UFV) pela disponibilização de sua infraestrutura e equipamentos, bem como pelo apoio técnico na realização dos ensaios experimentais, fundamentais para a obtenção dos resultados apresentados neste trabalho.

403.Referências bibliográficas

Alvarenga, A. de P. (2021). Seringueira. EPAMIG.

Mark, J. E., Erman, B., & Roland, C. M. (Eds.). (2013). Science and Technology of Rubber (4th ed.). Academic Press.

Sigaard, A. S., & Laitala, K. (2023). Natural and sustainable? Consumers' textile fiber preferences. Fibers, 11(2), 12. https://doi.org/10.3390/fib11020012

Homma, A. K. O. (2014). Extrativismo vegetal na Amazônia: história, ecologia, economia e domesticação. EMBRAPA

Ahmad, M. R., Ahmad, N. A., Ahmad Suhaimi, S., Abu Bakar, N. A., Wan Ahmad, W. Y., & Salleh, J. (2012). Tensile and tearing strength of uncoated and natural rubber latex coated high strength woven fabrics. *In* 2012 IEEE Symposium on Humanities, Science and Engineering Research (pp. 541–545). IEEE. https://doi.org/10.1109/SHUSER.2012.6268888

Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2016). ABNT NBR ISO 13934-1:2016 — Têxteis — Propriedades de resistência à tração de tecidos — Parte 1: Determinação da resistência máxima e do alongamento na força máxima usando o método de faixa (strip method). Associação Brasileira de Normas Técnicas.

Prasad, G., Sethulekshmi, A. S., & Saritha, A. (2026). Innovations in natural rubber latex coated textiles: A brief overview. Polymer Bulletin, 83, 83. https://doi.org/10.1007/s00289-025-06133-3

Tusief, M. Q., Amin, N., Mahmood, N., & Iqbal, W. (2014). Tensile properties of cotton yarn as affected by different yarn singeing machine variables. Pakistan Journal of Scientific and Industrial Research Series A: Physical Sciences, 57(3), 172–175.

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Determinação de extrativos totais na madeira de três espécies amazônicas e aplicação como corante natural

Jhêmilly da Silva dos Santos[1]; Renata Alice Ribeiro do Carmo[1]; Maria Naruna Felix de Almeida[1].

[1] Departamento de Ciências Florestais / Universidade do Estado do Pará

Resumo: Conhecer a quantidade de extrativos presentes em espécies nativas possibilita aplicações industriais. O objetivo foi determinar os teores de extrativos totais na madeira de três espécies amazônicas: cupiúba (*Goupia glabra* Aublet), coração de negro (*Poecilanthe parviflora*) e jarana (*Lecythis lurida*), e verificar o potencial de uso desses extrativos no tingimento de tecidos. As amostras foram obtidas por doação de serrarias do município de Paragominas/PA. Os extrativos totais foram determinados pelo método de extração sequencial (álcool-tolueno, álcool e água) no equipamento Soxhlet. Extratos aquosos e etílicos também foram obtidos para teste de tingimento de tecidos 100% algodão. Os resultados revelaram teores elevados de extrativos (acima de 9%), com destaque para a cupiúba. Os extratos apresentaram diferentes colorações, que foram refletidas no tingimento dos tecidos. Tanto os extratos aquosos e alcoólicos apresentaram coloração perceptível e uniforme, reforçando a importância da caracterização química de espécies para subsidiar o aproveitamento tecnológico e sustentável dessas madeiras.

Palavras-chave: Resíduos madeireiros; Composição química; Indústria verde.

Determination of Total Extractives in the Wood of Three Amazonian Species and Their Potential Application as Natural Dyes

Abstract: Understanding the extractive content of native wood species enables the exploration of new industrial applications. This study aimed to determine the total extractive content of the wood of three Amazonian species—cupiúba (Goupia glabra Aubl.), coração-de-negro (Poecilanthe parviflora), and jarana (Lecythis lurida)—and to evaluate the potential use of these extractives for cotton fabric dyeing. Wood samples were obtained through donations from sawmills located in Paragominas, Pará, Brazil. Total extractives were determined by the sequential extraction method (alcohol–toluene, alcohol, and water) using a Soxhlet apparatus. Aqueous and ethanol extracts were also prepared and applied in dyeing tests on 100% cotton fabrics. The results revealed high extractive contents (above 9%), with cupiúba presenting the highest values. The extracts exhibited distinct colors, which were reflected in the dyed fabrics. Both aqueous and ethanol extracts produced noticeable and uniform coloration, highlighting the importance of the chemical characterization of Amazonian wood species to support the technological and sustainable utilization of these forest resources.

Keywords: Wood residues; Chemical composition; Green industry.

1. Introdução

A floresta Amazônica é reconhecida por abrigar a maior reserva de biodiversidade do planeta, fornecendo múltiplos produtos e sendo uma fonte global vital de madeira tropical evidente (Nicaretta et al.,2023). No entanto, a exploração e o processamento primário e secundário de toras na Amazônia geram volumes significativos de resíduos lenhosos. A falta de um uso racional ou econômico desses resíduos tem levado a problemas ambientais, como incêndios e a acumulação de chorume (Santana, 2007). Diante deste cenário, o reaproveitamento dos resíduos de madeira de espécies nativas emerge como uma estratégia tecnológica inovadora e sustentável, alinhada com as abordagens da bioeconomia circular, visando agregar valor aos bioprodutos da sociobiodiversidade amazônica (Nicaretta et al., 2023).

A madeira, um dos recursos naturais mais utilizados globalmente, é um material orgânico e heterogêneo, cuja composição é fundamental para determinar suas aplicações tecnológicas (Pedrazzi et al., 2025). Quimicamente, a madeira é constituída principalmente por componentes estruturais de elevada massa molar, representados pela celulose, hemiceluloses e lignina, que formam a matriz lignocelulósica. Além desses componentes, a madeira também apresenta substâncias de baixa massa molar, denominadas cinzas, referente aos constituintes inorgânicos, e extrativos, que compreendem a fração orgânica. Os extrativos compreendem uma ampla variedade de compostos orgânicos, como ácidos graxos, ceras, terpenos, terpenoides, compostos fenólicos e outros metabólitos secundários, cuja composição e concentração variam entre espécies e podem conferir propriedades particulares e distintivas ao lenho (Santos, 2008).

Os extrativos totais incluem compostos como terpenos, óleos essenciais, resinas, graxas, ceras, e principalmente compostos fenólicos (taninos, flavonoides e quinonas) (Pedrazzi et al., 2025). Embora representem uma porção pequena da massa da madeira, geralmente variando de 1% a 5% em folhosas (Almeida, 2015), os extrativos são indispensáveis na definição das características do material (Pedrazzi et al., 2025). Eles são responsáveis pela cor, odor e, pela durabilidade natural da madeira, conferindo resistência ao ataque de agentes deterioradores e de organismos xilófagos (Santos, 2008).

A determinação precisa do teor de extrativos é crucial para o conhecimento do comportamento tecnológico da madeira e para a seleção do seu melhor uso (Almeida, 2015). O teor de extrativos é comumente associado às características como porcentagem de cerne, permeabilidade e durabilidade natural. No entanto, os tipos de compostos presentes nos

extrativos (como flavonoides, taninos e quinonas) podem apresentam potencial para outros usos, como a produção de fármacos, biocosméticos e corantes naturais (Nicaretta et al., 2023).

A cor de madeiras nativas é fortemente associada à presença de grupos cromóforos presentes nesses compostos, que podem conferir coloração característica aos extratos obtidos da madeira, tornando-os potenciais fontes de pigmentos e corantes naturais para aplicações têxteis e outros produtos. Assim, a composição e as propriedades químicas dos extrativos, mais do que o seu teor total isoladamente, são determinantes para definir seu potencial de utilização e agregação de valor à madeira.

Neste contexto, o presente trabalho teve como objetivo determinar o teor de extrativos totais na madeira de três espécies amazônicas de relevante interesse econômico e tecnológico: cupiuba (*Goupia glabra* Aublet), coração de negro (*Poecilanthe parviflora*) e jarana (*Lecythis lurida* (Miers) S.A.Mori), e avaliar o potencial desses extrativos como corantes naturais para aplicação em tecidos.

2. Material e métodos

2.1 Obtenção e preparo de amostras

O material de estudo, amostras de madeira, foi obtido por doação de serrarias localizadas no município de Paragominas, no estado do Pará. A seleção inicial das espécies considerou suas propriedades organolépticas, com destaque para a coloração. Foram utilizadas as espécies cupiúba (*Goupia glabra* Aubl.), coração de negro (*Poecilanthe parviflora*), jarana (*Lecythis lurida*). As amostras foram identificadas e armazenadas em bandejas em local arejado para aclimatação, até atingirem o teor de umidade de equilíbrio. Posteriormente, as amostras foram moídas e peneiradas, sendo utilizada a fração retida entre as peneiras de 40 e 60 mesh para as análises.

2.2 Quantificação de extrativos totais das madeira

O teor de umidade foi determinado pelo método gravimétrico. As amostras foram pesadas na condição inicial de umidade, e posteriormente, foram submetidas à secagem completa em estufa a 103 ± 2 ºC de temperatura, até a massa constante, obtendo-se a massa seca. O teor de umidade da amostra foi calculado utilizando como base a variação de massa das amostras antes e após a secagem, utilizando a equação (1):

$$\%TU = \frac{MU - MS}{MU} * 100 \quad (1)$$

MU: massa úmida de serragem (g)
MS: massa seca de serragem (g)
%TU: teor de umidade (%)

Para obtenção dos extrativos, 2 g amostras foram submetidas à extração no soxhlet com álcool-tolueno (1:2) por 5 horas, álcool etílico por 4 horas, conforme o método TAPPI 204 cm-97 (TAPPI, 1997). Posteriormente, as amostras seguiram a extração em água em contato direto pelo método de banho-maria por 1 hora, à temperatura controlada de 100ºC. Após a extração, os extratos foram concentrados, e o teor de extrativos totais foi calculado com base na massa seca das amostras, conforme equação (2).

$$\%EXT = \frac{(MU - MS)}{MU} * 100$$

Em que: MU: massa úmida de serragem (g)
MS: massa seca de serragem (g)
%EXT: teor de extrativos (%)

2.3 Extração de pigmentos para uso como corantes

Para extração dos pigmentos, dois métodos de extração foram empregados separadamente. O primeiro foi a extração com álcool etílico em Soxhlet, utilizando 2 g de amostra e duração de 4 horas. No segundo método, foi avaliada uma extração aquosa utilizando a técnica de banho-maria, na qual as amostras ficaram em contato direto com o solvente (água destilada) por 1 hora, à temperatura controlada de 100ºC. O objetivo foi comparar as extrações e identificar o solvente mais eficiente em obter pigmentos. Após as extrações, os extratos foram concentrados e utilizados para preparo da solução corante.

2.4 Tingimento dos tecidos

Para o preparo das soluções corantes a partir dos extrativos obtidos em água, o extrato de cada espécie foi transferido para um balão volumétrico de 500 mL, cujo volume foi posteriormente completado com água destilada. Em razão da maior concentração dos extrativos

obtidos em álcool, estes foram previamente solubilizados em 25 mL de álcool e, em seguida, transferidos para balões volumétricos de 500 mL, completando-se o volume com água destilada.

Para o tingimento dos tecidos, foi utilizada a metodologia adaptada de Alcantara (2023). Foram utilizados tecidos compostos por 100% algodão, com aproximadamente 0,7 g de massa, os testes foram realizados em triplicata. Os tecidos na dimensão de 5 x 10 cm foram previamente lavados em solução mordente (Alúmen de potássio), na proporção de 15% do peso do tecido. As amostras de tecido foram mergulhadas na solução à 60 ºC durante 1 hora. Após o período, os tecidos foram levemente enxaguados em água fria para remover o excesso de mordente e, posteriormente, submetidos ao processo de tingimento.

Para o tingimento, foram transferidos 150 mL do extrato para cada béquer, no qual foi imersa a amostra de tecido. Os béqueres foram submetidos a banho-maria, inicialmente a 40 °C por 20 minutos, com agitação a cada 10 minutos. Em seguida, a temperatura foi elevada para 80 °C, mantendo-se nesta condição por 1 hora. Finalizada essa etapa, os tecidos foram levados à estufa a 50 °C por 24 horas. Após o período de secagem, foram lavados em água corrente para remoção do excesso de corante.

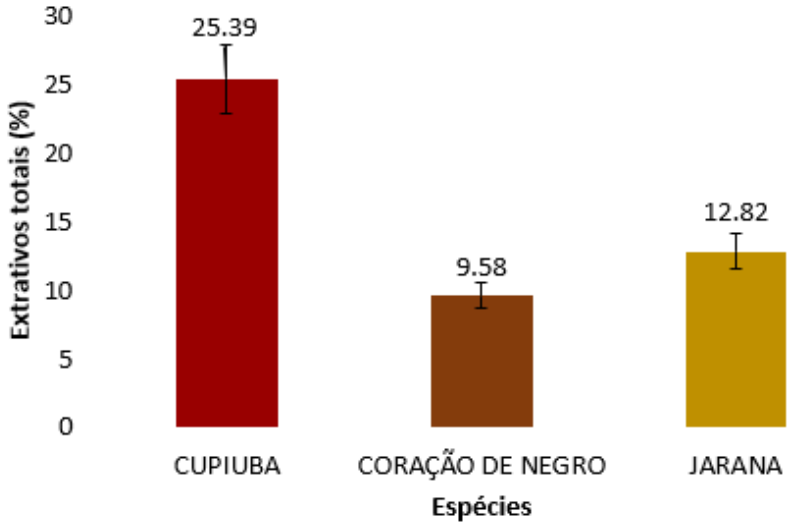
Os dados obtidos foram submetidos à análise estatística descritiva, considerando-se os valores médio e o, desvio padrão.

3. Resultados e discussão

3.1 Quantificação de extrativos da madeira

As porcentagens médias de extrativos totais referentes as madeiras estudadas são apresentadas na Figura 1. As espécies apresentaram elevado teor de extrativos, o que é esperado para espécies nativas. A espécie Cupiúba apresentou o maior teor de extrativos de 25%. Os resultados da quantificação dos componentes químicos da madeira são corroborados com os dados obtidos por SOUZA (2020) em seu estudo sobre as propriedades químicas de madeiras nativas comerciais, no qual observou médias de 11,20% para o teor de extrativos médio das espécies, obtidos em álcool/tolueno, apesar de serem espécies diferentes, como angelim-pedra, castanha-jarana, cedrinho, faveira-dura, ipê, itaúba, tauari, ucuubarana. Esses valores indicam um potencial uso das espécies em diferentes setores tecnológicos, inclusive a obtenção de extrativos para corantes naturais.

Figura 1. Porcentagem de extrativos totais obtidos pela extração sequencial em soxhlet das espécies: Amostra 1 – Cupiúba, Amostra 2 – Coração de negro, Amostra 3 – Jarana.



As extrações resultaram em amostras de extrativos com diferentes tons de pigmentos (Figura 2). A amostra de extrato de Jarana permaneceu incolor, enquanto as amostras de Coração de negro e Cupiúba, se destacaram por apresentarem respectivamente uma coloração marrom e castanho avermelhado. Essas diferenças de pigmentos são reflexo direto da presença de diferentes grupos cromóforos que estão associadas aos diferentes compostos presentes na madeira, conferindo cor ao extrato obtido, por essa razão observou-se variações expressivas de coloração entre as espécies da pesquisa (Almeida et al., 2015; Nicaretta et al., 2023; Pedrazzi et al., 2025**)**.

A diferença de cor do incolor para o marrom e castanho avermelhado é a evidência química da separação de classes de compostos: primeiro, as moléculas apolares e incolores; e, em seguida, a extração progressiva de polifenois altamente coloridos (flavonoides e taninos). O elevado teor e a forte coloração dos extratos obtidos com as espécies Cupiúba e Coração de negro sugerem uma alta concentração desses compostos, suportando a proposta de uso como corante (Nicaretta et al., 2023).

Figura 2. Diferenças de coloração entre os extratos obtidos pela extração sequencial em soxhlet nas espécies: Amostra 1 – Cupiúba, Amostra 2 – Coração de negro, Amostra 3 – Jarana.



3.2 Aplicação como corante natural no tingimento de tecidos

A Figura 3 apresenta os resultados do tingimento de tecidos 100% algodão utilizando extratos obtidos a partir de resíduos de serragem multiespécie de madeira, extraídos com solventes aquoso e alcoólico. Observa-se que ambos os métodos de extração proporcionam coloração perceptível aos tecidos, variando em tonalidade e intensidade com as espécies. De modo geral, os tecidos tingidos apresentaram coloração uniforme e semelhante, o que possibilita uma extração mais sustentável, barata e não tóxica utilizando as soluções com base aquosa. Esses resultados demonstram o potencial de reaproveitamento dos resíduos madeireiros como fonte de corantes naturais.

Figura 3. Tingimento de tecidos 100% com extratos obtidos por extração aquosa e alcoolica nas espécies: Amostra 1 – Cupiúba, Amostra 2 – Coração de negro, Amostra 3 – Jarana.



4. Conclusões

A análise dos extrativos totais das espécies amazônicas avaliadas demonstrou que esses materiais apresentam teores expressivos de compostos solúveis, característica comum em madeiras nativas. Entre as espécies estudadas, a cupiúba destacou-se pelos maiores valores obtidos, indicando potencial superior para aplicações que envolvem a extração e a produção de corantes naturais. Destaca-se a relevância da utilização desses extratos para aplicações regionais, contribuindo para o artesanato, moda sustentável e produtos ecológicos. Os resultados obtidos contribuem para ampliar o conhecimento sobre os recursos florestais da Amazônia, fortalecendo estratégias de valorização e uso sustentável desses materiais

5. Agradecimentos

Os autores agradecem às serrarias de Paragominas/PA pela concessão do material e à Fundação Amazônia de Amparo a Estudos e Pesquisas – FAPESPA pela bolsa de pesquisa PIBIC.

6. Referências bibliográficas

ALMEIDA, A. P. S.; RODRIGUES, D. A.; CASTELO, P. A. R. Determinação das propriedades químicas de madeiras da Amazônia Meridional. Scientific Electronic Archives, v. 8, n. 1, p. 1–4, 2015.

NICARETTA, B. C. et al. Biocosméticos faciais à base de corantes naturais de resíduos de madeira da Amazônia. Journal of Sustainable Forestry, v. 42, n. 9, p. 910–921, 2023.

PEDRAZZI, C.; VALCORTE, G.; ROUBUSTE, R. R.; FARIAS, D. T.; COLDEBELLA, R.; DICK, G. Química da madeira. 2. ed. Santa Maria, RS: Universidade Federal de Santa Maria, 2025.

SANTANA, M. A. E.; OKINO, E. Y. A. Chemical composition of 36 Brazilian Amazon forest wood species. Holzforschung, v. 61, n. 5, p. 469–477, 2007. DOI: 10.1515/HF.2007.084.

SANTOS, I. D. Influência dos teores de lignina, holocelulose e extrativos na densidade básica, contração da madeira e nos rendimentos e densidade do carvão vegetal de cinco espécies lenhosas do cerrado. 2008. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2008.

SOUZA, E. S. C.; MENDOZA, Z. M. S. H.; BORGES, P. H. M.; FRANÇA, G. S. Propriedades químicas de madeiras nativas comerciais. Multitemas, Campo Grande, MS, v. 25, n. 59, p. 113–126, jan./abr. 2020.

TAPPI – Technical Association of the Pulp and Paper Industry. T 204 cm-97: Solvent extractives of wood and pulp. 1997a. 12 p.

Dispersão de água em filmes de nanofibrilas lignocelulósicas oriundas da casca de cambará (*Qualea paraensis* Ducke)

Resumo: A valorização de resíduos da indústria madeireira na Amazônia para a produção de nanomateriais promove a agregação de valor à biomassa residual e fortalece os princípios da bioeconomia e da economia circular na região. Nesse contexto, o objetivo deste trabalho foi avaliar filmes produzidos a partir de nanofibrilas lignocelulósicas (NFLC) de cascas do tronco de cambará (*Qualea paraensis* Ducke) obtidas em indústria madeireira em Rolim de Moura – RO e comparar com filmes produzidos a partir de nanofibrilas de eucalipto (NFC). Os filmes foram avaliados e caracterizados quanto ao ângulo de contato e molhabilidade. Os filmes de NFC de eucalipto e de NFLC de cambará apresentaram-se hidrofílicos, com diferenças associadas à matéria-prima, ao método de obtenção e à morfologia dos filmes. Diante dos resultados observados, as cascas residuais de espécies tropicais da Amazônia têm potencial para obter materiais avançados e de alto valor agregado, alinhando-se aos princípios da economia circular e bioeconomia.

Palavras-chave: Madeiras tropicais; Resíduos lignocelulósicos; Eucalipto.

Water dispersion in lignocellulosic nanofibril films derived from cambará bark (Qualea paraensis Ducke)

Abstract: The valorization of waste from the wood industry in the Amazon for the production of nanomaterials promotes added value to residual biomass and strengthens the principles of the bioeconomy and circular economy in the region. In this context, the aim of this study was to evaluate films produced from lignocellulosic nanofibrils (LCNF) obtained from cambará (*Qualea paraensis* Ducke) bark residues collected at a sawmill in Rolim de Moura – RO, and to compare them with films produced from eucalyptus nanofibrils (CNF). The films were evaluated and characterized in terms of contact angle and wettability. Both the eucalyptus CNF films and the cambará LCNF films exhibited hydrophilic behavior, with differences associated with the raw material, the production method, and the film morphology. Based on the observed results, residual bark from tropical Amazonian species shows potential for obtaining advanced, high-value materials, aligning with the principles of the circular economy and bioeconomy.

Keywords: Tropical wood; Lignocellulosic wastes; *Eucalyptus*.

Introdução

Filmes produzidos a partir de nanofibrilas lignocelulósicas têm recebido crescente atenção devido ao potencial de aplicação em embalagens biodegradáveis, revestimentos e outros biomateriais. As propriedades desses materiais dependem da composição química das nanofibrilas, da estrutura formada durante a produção dos filmes e das interações entre seus constituintes, fatores que influenciam diretamente seu desempenho em diferentes aplicações (Du et al., 2025).

A maior parte dos estudos utiliza nanofibrilas de celulose (NFC) obtidas de polpas branqueadas, principalmente de eucalipto, em razão da elevada pureza da celulose e da facilidade de desfibrilação dessa matéria-prima (Mulin et al., 2023). Entretanto, resíduos lignocelulósicos provenientes da indústria madeireira também representam uma fonte potencial para obtenção de nanofibrilas lignocelulósicas (NFLC). Diferentemente das NFC, essas nanofibrilas preservam parte da lignina e dos extrativos presentes na biomassa, componentes que podem modificar as propriedades superficiais dos filmes produzidos (Du et al., 2025).

Entre as propriedades utilizadas para caracterizar esses materiais, destacam-se o ângulo de contato e a molhabilidade, por estarem diretamente relacionados à interação entre a superfície do filme e a água (Rbihi et al., 2020). Essas características influenciam aplicações como embalagens, revestimentos e materiais de barreira, além de fornecerem informações importantes sobre o efeito da composição química e da estrutura superficial dos filmes (Asim et al., 2022). Apesar do crescente número de estudos sobre materiais nanoestruturados, poucos estudos tratam da produção de filmes a base de resíduos de espécies tropicais como materia-prima ((Rbihi et al., 2020; (Asim et al., 2022), sendo essas especies dominantes no setor madeireiro (Andrade et al., 2022).

O processamento primário da madeira gera grandes volumes de resíduos lignocelulósicos, como serragem, costaneiras e cascas, em decorrência do baixo rendimento industrial, que pode converter entre 40 e 60% do volume das toras em biomassa residual (Fernández et al., 2025). Entre esses resíduos, as cascas apresentam reduzido aproveitamento industrial, sendo destinadas principalmente à geração de energia ou ao descarte, apesar do potencial para obtenção de materiais de maior valor agregado (Neiva et al., 2024; Supriyadi et al., 2025). Entre as espécies exploradas comercialmente na Amazônia, destaca-se o cambará (*Qualea paraensis* Ducke), amplamente utilizado pela indústria madeireira em Rondônia (Pinto et al., 2023), cujo processamento gera quantidades expressivas de cascas ainda pouco exploradas para produção de nanomateriais.

Considerando esse contexto, parte-se da hipótese de que filmes produzidos com nanofibrilas lignocelulósicas obtidas da casca de cambará apresentem comportamento superficial distinto daquele observado para filmes produzidos com nanofibrilas de celulose de eucalipto, em razão da presença residual de lignina e extrativos na estrutura das nanofibrilas. Diante do exposto, este trabalho teve como objetivo comparar o comportamento superficial de filmes produzidos com nanofibrilas lignocelulósicas obtidas da casca de cambará (*Qualea*

paraensis Ducke) e de filmes produzidos com nanofibrilas de celulose de eucalipto (*Eucalyptus* sp.), por meio da avaliação do ângulo de contato e da molhabilidade.

Material e métodos

Coleta e pré-processamento das cascas de cambará

Foram coletadas amostras de casca de árvores de cambará em indústrias madeireiras no município de Rolim de Moura – RO. Em laboratório, as cascas foram higienizadas e secas em estufa a 65 ºC por aproximadamente 72 h. Após a secagem, as cascas foram seccionadas em filetes e trituradas em moinho de facas tipo Willey. P. O material moído foi classificado entre peneiras de 40 e 60 mesh, conforme a ABNT NBR 14660 (ABNT, 2003). O material retido na peneira de 40 mesh foi submetido ao pré-tratamento químico com solução de hidróxido de sódio (NaOH) a 5% (m/m) e cozimento em banho-maria a uma temperatura de aproximadamente 80 ºC por 2 h. Após isso, as fibras lignocelulósicas resultantes foram lavadas com água corrente até atingirem pH neutro (próximo de 7).

Obtenção das Nanofibrilas de lignocelulose (NFLC) e produção de filmes

As fibras foram dispersas em água deionizada na proporção de 1 g para 50 mL e submetidas à fibrilação em ultra refinador Super Mass Colloider Masuko Sangyo MKCA6-2, com 20 passagens consecutivas até obtenção de suspensões de nanofibrilas lignocelulósicas (NFLC) das cascas de cambará, de acordo com metodologia descrita por Mascarenhas et al. (2022a). Como material de referência, utilizaram-se placas de polpa celulósica comercial com concentração de 2,5% (m/m) em água deionizada que demandaram 6 passagens consecutivas no ultra refinador para obtenção das Nanofibrilas de Celulose (NFC).

Assim, foram produzidos dois tipos de filmes: (i) filmes constituídos exclusivamente por nanofibrilas de celulose de eucalipto (100% NFC), utilizados como material de referência, e (ii) filmes à base de nanofibrilas lignocelulósicas obtidas da casca de cambará contendo 20% de NFC de eucalipto adicionada para aumentar a capacidade filmogênica da suspensão. Os filmes foram produzidos pelo método *casting*, no qual tanto as suspensões de NFLC das cascas de cambará quanto as NFC de eucalipto foram diluídas em água deionizada a uma concentração de 1% (m/m). As suspensões foram homogeneizadas sob agitação mecânica por 10 minutos e em seguida distribuídas 60 g de cada uma em placas de Petri acrílicas com diâmetro de 15 cm. Os filmes foram secos em sala climatizada com temperatura controlada de 25ºC por cerca de 48h.

Considerando a norma ISO/TS 20477:2017, o material obtido a partir da fibrilação mecânica das fibras de casca de cambará podem ser considerados em nanoescala, pois mais de 65% das estruturas apresentaram diâmetro abaixo de 100 nm. Em relação ao material obtido a partir da polpa de Eucalipto, Mascarenhas et al. (2022) mediram e classificaram como nanomaterial, pois mais de 70% das estruturas possuíam diâmetro abaixo de 100 nm. A morfologia das fibras foram feitas por meio da microscopia eletrônica de varredura de ultra-alta resolução e as medições dos diâmetros foram obtidas por meio do *software* ImageJ.

Ângulo de contato e molhabilidade

O ângulo de contato foi determinado pelo método da gota séssil foram realizadas utilizando-se goniômetro Krüss DSA30. Foram avaliados 3 corpos de prova (filmes com dimensões 1 cm x 5 cm) por tratamento, realizando-se medições em 5 gotas de água por corpo de prova seguindo a metodologia descrita pela norma TAPPI T 458 cm-14 (TAPPI, 2014). Os ângulos de contato foram registrados aos 1, 4 e 55 segundos após o contato da gota de água a superfície do filme.

Resultados e discussão

Os filmes produzidos com NFLC da casca de cambará apresentaram maior ângulo de contato em comparação aos filmes produzidos com NFC de eucalipto, indicando menor afinidade inicial da superfície pela água. Apesar dessa diferença, ambos os materiais apresentaram comportamento hidrofílico, uma vez que os ângulos de contato permaneceram inferiores a 90° (Figura 1).

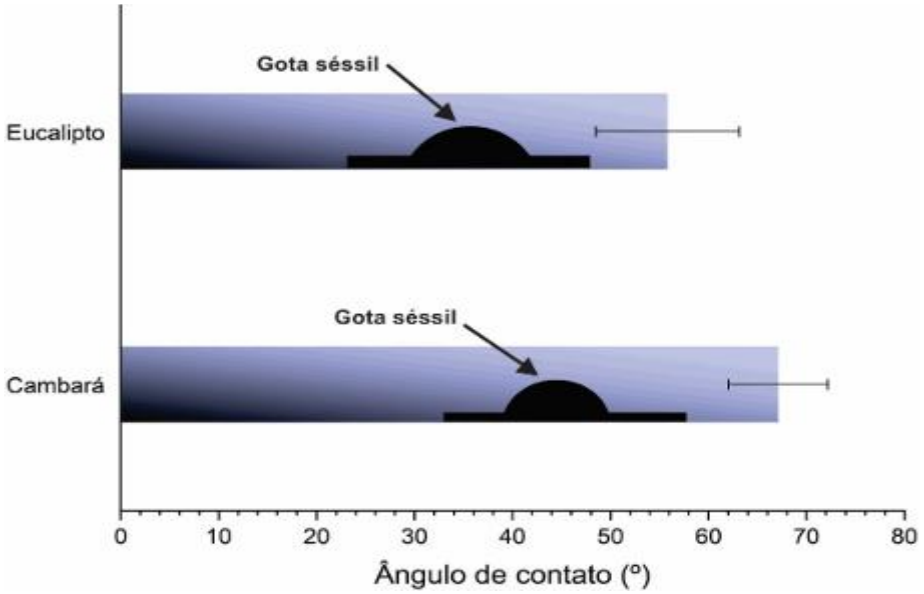


Figura 1. Ângulo de contato das gotas de água dos filmes de NFC de eucalipto e filmes de NFLC produzidos a base de casca de cambará.

O maior ângulo de contato observado para os filmes produzidos com NFLC pode estar relacionado à presença residual de lignina e extrativos, diferentemente dos filmes produzidos com NFC de eucalipto, obtida a partir da polpa celulósica branqueada. Durante o processo de branqueamento, os extrativos e a lignina são extraídas, aumentando a exposição dos grupos hidroxila da celulose na superfície do material. Como consequência, os filmes produzidos exclusivamente com NFC apresentam maior afinidade inicial com a água, enquanto a presença residual de lignina e extrativos nas NFLC tende a reduzir essa interação, refletindo em maiores valores de ângulo de contato. Esse comportamento está associado à presença residual de lignina e extrativos, que reduzem a afinidade inicial da superfície do filme pela água em comparação aos filmes produzidos exclusivamente com NFC, ricos em grupos hidroxila expostos após o branqueamento.

Em função disso, a dispersão de líquidos polares na superfície dos filmes tende a ser menos pronunciada, ou seja, a depender da intensidade de exposição ao molhamento, o filme de cambará em comparação ao eucalipto, tende a apresentar menor intumescimento. Além disso, os filmes de cambará apresentaram menor variação nos valores de ângulo de contato, o que pode indicar maior uniformidade superficial em comparação aos filmes de eucalipto. Para filmes de NFC de eucalipto, valores de ângulo de contato se entre 39,9° e 95,2° são relatados na literatura (Ramos et al., 2025; Silva et al., 2023; Souza et al., 2023; Surya et al., 2022), evidenciando que os ângulos podem apresentar variação em função das características do material e das condições de processamento e secagem.

Além da composição química, o ângulo de contato é influenciado pela organização estrutural das nanofibrilas, sendo que filmes mais compactos e menos porosos dificultam a penetração da água (Silva et al., 2023). Além disso, diferenças no pré-tratamento das fibras e no método casting podem modificar a estrutura superficial e as propriedades de barreira dos filmes (Rodrigues et al., 2025; Mascarenhas et al., 2022b), contribuindo para o comportamento observado neste estudo. Embora os filmes de cambará tenham apresentado ângulo de contato aproximadamente 20% superior ao dos filmes de eucalipto, ambos exibiram molhabilidade semelhante (Figura 2). Esse comportamento sugere que a presença residual de lignina e extrativos influenciou principalmente a interação inicial entre a superfície do filme e a água, sem alterar significativamente o processo de molhamento. Assim, pequenas diferenças nas propriedades superficiais podem ampliar as possibilidades de aplicação desses materiais.

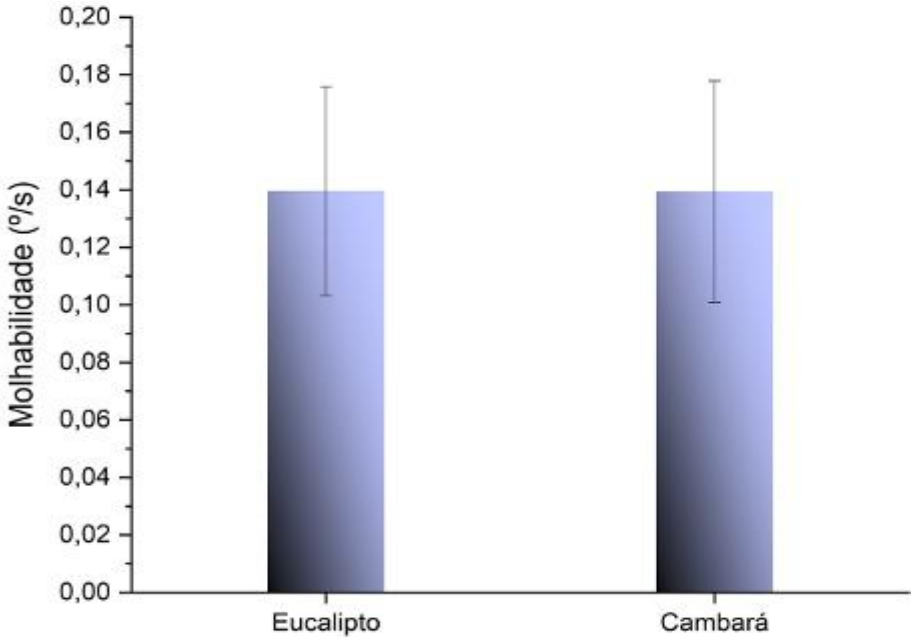


Figura 2. Molhabilidade dos filmes de NFC de eucalipto e filmes de NFLC produzidos a base de casca de cambará.

Os filmes de NFC de eucalipto apresentam potencial para aplicações que exigem maior afinidade com meios aquosos, como revestimentos biodegradáveis, embalagens ativas e superfícies destinadas à impressão e aplicação de tintas (Mascarenhas et al., 2022b; Du et al., 2025). Por sua vez, os filmes produzidos a partir das cascas de cambará podem ser mais adequados para embalagens biodegradáveis, como revestimentos com proteção térmica e contra radiação UV, ou como embalagem de materiais que demandem atividade antioxidante e menor

afinidade com a água em função da presença de lignina residual (Guo et al., 2019; Priyadarshi et al., 2024; Du et al., 2025).

Os resultados demonstram que a utilização de NFLC obtidas da casca de cambará permite a produção de filmes com comportamento superficial semelhante ao observado para filmes produzidos com NFC de eucalipto, apesar das diferenças no ângulo de contato inicial. Esses resultados reforçam o potencial de utilização de resíduos lignocelulósicos de espécies tropicais na produção de biomateriais, contribuindo para agregação de valor à biomassa residual e ampliando as possibilidades de aproveitamento desses recursos na Amazônia, alinhando-se aos princípios da economia circular e fortalecimento da bioeconomia local.

Conclusões

Os filmes produzidos com nanofibrilas lignocelulósicas obtidas da casca de cambará e com nanofibrilas de celulose de eucalipto apresentaram comportamento hidrofílico, embora os filmes de cambará tenham apresentado maior ângulo de contato inicial. Apesar dessa diferença, ambos os materiais exibiram molhabilidade semelhante, indicando que a utilização de NFLC provenientes da casca de cambará não compromete o comportamento superficial dos filmes. Esses resultados demonstram o potencial desse resíduo como matéria-prima para produção de biomateriais, contribuindo para a valorização de resíduos lignocelulósicos de espécies tropicais. Recomenda-se a realização de estudos adicionais para avaliação das propriedades de barreira e demais características dos filmes, bem como a produção e análise de materiais obtidos a partir das cascas de outras espécies tropicais, ampliando ainda mais as possibilidades de valorização de resíduos florestais.

Agradecimentos

À Fundação de Amparo à Pesquisas de Rondônia (FAPERO), à Universidade Federal de Lavras, ao CNPq por meio do INCT – Madeiras da Amazônia III e à CAPES pelo financiamento da pesquisa, à Embrapa instrumentação.

Referências bibliográficas

ABNT - Associação brasileira de normas técnicas (2003). NBR 14660: Madeira Amostragem e preparação para análise. Rio de Janeiro: ABNT.

Andrade, M., Santos, H., Nunes, F., Costa, J. N., & Lentini, M. W. (2022). Produção de madeira e diversidade de espécies arbóreas exploradas na Amazônia brasileira: Situação atual e

recomendações para o setor florestal. IMAFLORA. https://oeco.org.br/wp-content/uploads/2022/08/Boletim_Timberflow_oito-2022-1.pdf

ASIM, Nilofar; BADIEI, Marzieh; MOHAMMAD, Masita. Recent advances in cellulose-based hydrophobic food packaging. **Emergent Materials**, v. 5, n. 3, p. 703-718, 2022. https://doi.org/10.1007/s42247-021-00314-2

Du, H., Liu, K., Xu, T., Xu, C., Lin, M., Fang, Z., ... & Pan, X. (2025). Lignocellulosic Films: Preparation, Properties, and Applications. Chemical Reviews, 125(24), 11666-11814. https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.5c00267

Fernández, M. P., Alzamora, R. M., Chateau, F., Elissetche, J. P., & Pérez, E. (2025). Discarded Small-Logs Recovery from Natural Forests: Improving the Value Chain. Forests, 16(9), 1456. https://www.mdpi.com/1999-4907/16/9/1456#

Guo, Y., Tian, D., Shen, F., Yang, G., Long, L., He, J., Song, C., Zhang, J., Zhu, Y., Huang, C., & Deng, S. (2019). Filmes Compostos Transparentes de Celulose/Lignina Técnica para Embalagens Avançadas. Polímeros, 11 (9), 1455. https://doi.org/10.3390/polym11091455

International Organization for Standardization. (2017). ISO/TS 20477:2017 – Nanotechnologies: Standard terms and their definition for cellulose nanomaterial. https://cdn.standards.iteh.ai/samples/68153/673ae06f301c449895ca798ccef80d10/ISO-TS-20477-2017.pdf

Mascarenhas, A. R. P., Scatolino, M. V., Dias, M. C., Martins, M. A., Mendonça, M. C., de Melo, R. R., ... & Tonoli, G. H. D. (2022a). Production of cellulose micro/nanofibrils with sodium silicate: impact on energy consumption, microstructure, crystallinity and stability of suspensions: Impact of Na2SiO3 on the properties of cellulose micro/nanofibrils. Nordic Pulp & Paper Research Journal, 37(4), 686-701. https://doi.org/10.1515/npprj-2022-0052

Mascarenhas, A. R. P., Scatolino, M. V., Santos, A. D. A. D., Norcino, L. B., Duarte, P. J., Melo, R. R. D., ... & Tonoli, G. H. D. (2022b). Hydroxypropyl methylcellulose films reinforced with cellulose micro/nanofibrils: study of physical, optical, surface, barrier and mechanical properties: Valorization cellulosic materials for films production. Nordic Pulp & Paper Research Journal, 37(2), 366-384. https://doi/10.1515/npprj-2022-0006

Mulin, L. B., Martins, C. C. N., Dias, M. C., dos Santos, A. D. A., Mascarenhas, A. R. P., Profeti, D., ... & Moulin, J. C. (2023). Effect of phosphorylation on the production of cellulose nanofibrils from Eucalyptus sp. Industrial Crops and Products, 193, 116173. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2022.116173

Neiva, D. M., Ek, M., Sels, B. F., & Samec, J. S. (2024). Toward sustainable upgrading of bark. Chem Catalysis, 4(9). https://doi.org/10.1016/j.checat.2024.101022

Pinto RC, Lentini MW, Andrade MBT, Nunes F, Santos H, Costa JN (2023). Evolução da indústria de base florestal de Rondônia e oportunidades para o planejamento setorial e para a conservação das florestas de produção. IMAFLORA. Boletim Timberflow – junho 2023.

Priyadarshi, R., Ghosh, T., Purohit, S. D., Prasannavenkadesan, V., & Rhim, J. W. (2024). Lignin as a sustainable and functional material for active food packaging applications: A review. Journal of Cleaner Production, 469, 143151. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.143151

Ramos, A., Rodilla, J. M., Ferreira, R., & Luís, Â. (2025). Enhancing hydrophobicity of nanocellulose-based films by coating with natural wax from Halimium viscosum. Applied Sciences, 15(13), 7576. https://doi.org/10.3390/app15137576

Ramos, W. F., Ruivo, M. D. L. P., Jardim, M. A. G., & Sousa, L. M. D. (2018). Geração de resíduos madeireiros do setor de base florestal na região metropolitana de Belém, Pará. Ciência Florestal, 28(4), 1823-1830. https://doi.org/10.5902/1980509835341

Rbihi, S., Aboulouard, A., Laallam, L., & Jouaiti, A. (2020). Medidas de ângulo de contato de compósitos de filme fino à base de celulose: molhabilidade, energia livre de superfície e dureza de superfície. *Surfaces and Interfaces* , *21* , 100708. https://doi.org/10.1016/j.surfin.2020.100708

Rodrigues, D. d. S., Schmitt, P. O., Cordeiro, L. A., Rodrigues, M. B. B., Ribeiro, A. C. R., Bosenbecker, M. W., Silva, S. K. S., Carreno, N. L., Gatto, D. A., Silva, S. H. F. d., Cholant, C. M., & Missio, A. L. (2025). Sustainable Films Derived from Eucalyptus spp. Bark: Improving Properties Through Chemical and Physical Pretreatments. Polymers, 17(1), 105. https://doi.org/10.3390/polym17010105

Silva, D. W., Batista, F. G., Scatolino, M. V., Mascarenhas, A. R. P., De Medeiros, D. T., Tonoli, G. H. D., ... & Alves Junior, F. T. (2023). Developing a biodegradable film for packaging with lignocellulosic materials from the Amazonian biodiversity. Polymers, 15(17), 3646. https://doi.org/10.3390/polym15173646

Supriyadi, D., Damayanti, D., Veigel, S., Hansmann, C., & Gindl-Altmutter, W. (2025). Unlocking the potential of tree bark: review of approaches from extractives to materials for higher-added value products. Materials Today Sustainability, 29, 101074. https://doi.org/10.1016/j.mtsust.2025.101074

Souza, L. O., Santos, I. A., de Carvalho Tavares, I. M., Sampaio, I. C. F., Dias, M. C., Tonoli, G. H. D., ... & Franco, M. (2023). Procurement and characterization of biodegradable films made from blends of eucalyptus, pine and cocoa bean shell nanocelluloses. Waste and Biomass Valorization, 14(10), 3169-3181. https://doi.org/10.1007/s12649-022-01762-5

Soteli, R. P., de Oliveira Rodrigues, L. D., Pereira, B. L. C., de Paula Protásio, T., de Cássia Oliveira Carneiro, A., & Oliveira, A. C. (2024). Management and classification of waste from the primary processing of Brazilian Amazon tropical wood for energy-generation purposes: RP Soteli et al. Environment, Development and Sustainability, 26(6), 14065-14094. https://doi.org/10.1007/s10668-023-03179-z

Soteli, R. P., Mascarenhas, A. R. P., de Paula Protásio, T., Carvalho, A. M. M. L., da Rocha, K. J., Pereira, B. L. C., & Oliveira, A. C. (2025). Valorization and grouping of wood waste from sawmills in Amazonia for bioenergy. Environmental Science and Pollution Research, 32(31), 18745-18762. https://doi.org/10.1007/s11356-025-36781-x

Surya, I., Hazwan, CM, Abdul Khalil, HPS, Yahya, EB, Suriani, AB, Danish, M., & Mohamed, A. (2022). Hidrofobicidade e biodegradabilidade da nanocelulose tratada com silano em biopolímero para aplicações de embalagens de alta qualidade. Polymers , 14 (19), 4147. https://doi.org/10.3390/polym14194147

Efeito da Biomassa e Temperatura de Pirólise no Potencial de Armazenamento de CO_2eq pelo Biochar

Juliana Dias de Melo[1]; Angélica de Cássia Oliveira Carneiro[1]; Dandara Paula da Silva Guimarães[1]; Evanderson Luis Capelete Evangelista[1]; Letícia Costa Peres[1]; Amanda Ladeira Carvalho[1]; Fernanda de Jesus Jorge[1]; Isabella Santana Sampaio[1]

[1] Universidade Federal de Viçosa

Resumo: O biochar, obtido pela pirólise de biomassa residual, surge como uma alternativa promissora para o sequestro e estoque de carbono e a geração de créditos de carbono, uma vez que sua estabilidade química permite o armazenamento de CO_2 equivalente no solo por longos períodos. Este trabalho teve como objetivo avaliar o efeito do tipo de biomassa (resíduos de eucalipto, casca de café, coco verde e folha de macaúba) e da temperatura final de pirólise (450, 550 e 650°C) sobre o estoque de CO_2eq de biochars. Os biochars foram produzidos e fornecidos pelo Laboratório de Painéis e Energia da Madeira (DEF/UFV) e determinou-se sua composição química elementar e imediata. As estimativas de estoque bruto, perdas de armazenamento e estoque líquido de CO_2eq seguiram a metodologia *Puro Standard*, considerando a temperatura média do solo da Zona da Mata mineira de 22,21°C. O aumento da temperatura de pirólise elevou o teor de carbono fixo e o carbono elementar, e reduziu, de modo geral, a razão molar H/Corg das biomassas avaliadas, aumentando a estabilidade química e o estoque líquido de CO_2eq. O biochar de eucalipto produzido a 650°C apresentou o maior estoque bruto (3,32 tCO2eq) e líquido (2,62 tCO_2eq) entre todas as combinações avaliadas, evidenciando o potencial dessa biomassa e dessa condição de pirólise para maximizar a mitigação climática via biochar.
Palavras-chave: Estabilidade do Carbono; Créditos de Carbono, Sustentabilidade.

Effect of Biomass Type and Pyrolysis Temperature on Soil CO_2eq Stock

Abstract: Biochar, obtained through the pyrolysis of residual biomass, emerges as a promising alternative for carbon sequestration and storage and for the generation of carbon credits, since its chemical stability allows CO_2 equivalent to be stored in the soil for long periods. This study aimed to evaluate the effect of biomass type (eucalyptus residues, coffee husk, green coconut, and macaúba palm leaf) and final pyrolysis temperature (450, 550, and 650°C) on the CO_2eq stock of biochars, based on the database of the Wood Panels and Energy Laboratory (DEF/UFV). Estimates of gross stock, storage losses, and net CO_2eq stock followed the Puro Standard methodology, considering the average soil temperature of the Zona da Mata region of Minas Gerais of 22.21°C. Increasing the pyrolysis temperature raised the fixed carbon and elemental carbon content, and generally reduced the H/Corg molar ratio of the biomasses evaluated, increasing chemical stability and net CO_2eq stock. Eucalyptus biochar produced at 650°C showed the highest gross (3.32 tCO2e) and net (2.62 tCO_2e) stock among all combinations evaluated, highlighting the potential of this biomass and pyrolysis condition to maximize the climate mitigation potential of biochar.
Keywords: Carbon Stability; Carbon Credits; Sustainability.

410. Introdução

As mudanças climáticas representam um dos maiores desafios da atualidade, agravadas pelo aumento constante das emissões de gases de efeito estufa (GEE) resultantes das ações humanas. Em 2023, os sistemas agroalimentares foram responsáveis por 32% das emissões antropogênicas globais de GEE, totalizando 16,5 bilhões de toneladas de CO_2 equivalente, um aumento de 21% em relação a 2001 (FAO, 2025). Esse cenário reforça a necessidade de práticas que aliem produção agrícola, florestal, gestão de resíduos e mitigação ambiental, ampliando a adoção de estratégias de sequestro e remoção de carbono. A conversão desses resíduos em biochar surge como alternativa para agregar valor a essa biomassa e mitigar as emissões associadas à sua decomposição (Ghosh et al., 2025).

O biochar é um material sólido, rico em carbono, obtido pela pirólise da biomassa em condições de baixa ou nenhuma disponibilidade de oxigênio (IBI, 2015). Sua elevada estabilidade química permite o armazenamento de carbono por longos períodos, conferindo-lhe aplicações como condicionador de solos e ferramenta de mitigação de gases de efeito estufa (Lehmann et al., 2015). Essa conversão pode ainda ser expressa em toneladas de CO_2 equivalente estocadas no solo, o que possibilita sua inserção em mecanismos de compensação e comercialização de créditos de carbono (Puro.earth, 2022), agregando valor ambiental e econômico à cadeia produtiva.

Porém, as propriedades do biochar variam conforme a biomassa de origem e os parâmetros de produção, como temperatura de pirólise e taxa de aquecimento (Zhao et al., 2018), o que impacta diretamente o rendimento, a estabilidade do carbono e, consequentemente, o potencial de remoção de CO_2eq.

Esse desempenho é essencial para viabilizar projetos de crédito de carbono, dados os preços praticados na venda e compra de biochar e de créditos de carbono (CORS). Além disso, a temperatura do solo onde o biochar será aplicado também afeta seu estoque de CO_2eq, reforçando a necessidade de estudar cenários para as diferentes condições edafoclimáticas do Brasil.

Neste contexto, o biochar se estabelece como uma alternativa sustentável capaz de aliar mitigação das mudanças climáticas à melhoria da qualidade do solo e à criação de novas oportunidades econômicas.

O presente trabalho tem como objetivo avaliar a influência de diferentes biomassas e das condições operacionais de pirólise no potencial de estoque de CO_2 equivalente em solos, visando ampliar o conhecimento sobre a estabilidade do carbono incorporado pelo biochar e seu potencial como estratégia de mitigação das emissões de gases de efeito estufa.

411. Material e métodos

Para realizar a estimativa do estoque de carbono equivalente no solo, utilizou-se dados das propriedades químicas de biochars produzidos a partir de biomassas de resíduos de folha de macaúba, resíduos florestais de eucalipto, resíduos de casca de café e resíduos de coco verde, produzidos em forno mufla, nas temperaturas finais de 450°C, 550°C e 650°C, com o tempo de residência definido em 45 minutos, provenientes do banco de dados do Laboratórios de Painéis e Energia da Madeira, pertencente a Universidade Federal de Viçosa.

A composição química imediata foi realizada para a obtenção dos teores de carbono fixo, materiais voláteis e cinzas, conforme a norma ASTM D1762-84 (ASTM, 2021).

A composição química elementar (CHNS) foi determinada em analisador elementar TruSpec Micro da LECO. Os teores de carbono, hidrogênio e nitrogênio foi obtido conforme a norma EN 16948 (DIN - Deutsches Institut Fur Normung, 2015). Já o teor de enxofre (S) foi obtido conforme a norma EN 16994 (DIN - Deutsches Institut Fur Normung, 2016b) utilizando o módulo TruSpec S. O teor de oxigênio foi obtido pela soma dos teores de carbono, nitrogênio, hidrogênio, enxofre e cinzas, subtraído de 100, conforme EN 16993 (DIN - Deutsches Institut Fur Normung, 2016).

A relação molar do biochar foi calculada dividindo o teor de hidrogênio (mH, %) pelo teor de carbono orgânico (mC, %) do biochar e multiplicando pela razão entre as massas molares do carbono (MC = 12 g·mol^{-1}) e do hidrogênio (MH = 1,0 g·mol^{-1}), sendo H/Corg um indicador do grau de aromaticidade e estabilidade do biochar.

Para biochars produzidos a partir de biomassa lenhosa, foi adotado o valor padrão de 0,5% de carbono inorgânico (C_{inorg}), conforme recomendado pela Puro.earth. O teor de carbono orgânico (C_{org}) foi calculado pela diferença entre o carbono total (C_{tot}) e o carbono inorgânico (C_{inorg}).

Para as demais biomassas, o carbono orgânico foi estimado a partir do carbono total, descontando a fração mineral representada pelo teor de cinzas.

2.1 Estimativa do estoque de CO_2eq e perdas de armazenamento

As estimativas de estoque bruto de CO_2eq (C_{stored}), perdas de armazenamento do carbono (C_{loss}) e estoque líquido de CO_{2eq} foram realizadas conforme a metodologia da Puro Standard: Biochar Methodology – Version 2 (Puro.earth, 2025) e descritas abaixo.

O estoque bruto de carbono (C_{stored}) foi calculado pela equação 1, multiplicando a quantidade de biochar produzido ($Q_{biochar}$) pelo teor de carbono orgânico (C_{org}) e pela razão entre as massas molares do dióxido de carbono e do carbono (44/12).

$$C_{stored} = Q_{biochar} \times \left(\frac{C_{org}}{100}\right) \times \frac{44}{12} \quad (1)$$

As perdas de carbono (C_{loss}) foram calculadas pela equação 2, multiplicando o CO_2 estocado (C_{stored}) pelo fator de permanência do carbono (PF), que depende dos coeficientes de regressão M e α e da razão molar H/Corg.

$$C_{loss} = C_{stored} \times \left(\frac{(100 - PF)}{100}\right) \quad (2)$$

O fator de permancencia do carbono orgânico de biochar ao longo de vários séculos em um determinado solo à temperatura TS (%) foi calculado pela equação 3.

$$PF = M - \alpha \times \frac{H}{C_{org}} \quad (3)$$

Nesta pesquisa, os estoques de CO_2eq foram estimados considerando a temperatura média do solo da Zona da Mata Mineira (22,21 °C), obtida por Muñoz-Sabater et al. (2021), para a camada de 0–28 cm. Como a Puro.earth (2025) não apresenta coeficientes para essa temperatura, os valores de M (89,33) e α (37,24) foram estimados por regressão a partir dos dados da Tabela 6.1 da metodologia da puro.earth, para um horizonte temporal (TH) de 200 anos.

Os estoques de CO_2eq líquidos foram calculados pela equação 4, sendo a diferença entre o estoque de CO_2eq bruto e a perda de armazenamento de carbono (C_{loss}).

$$CO_{2líquido} = C_{stored} \, x \, C_{loss} \quad (4)$$

2.2 Análise de dados

O experimento foi instalado segundo um delineamento inteiramente casualizado (DIC), em esquema fatorial 4 x 3, com quatro biomassas (resíduos de eucalipto, casca de café, coco verde e folha de macaúba), três temperaturas finais de pirólise (450, 550 e 650°C), e três repetições por tratamento, totalizando 36 unidades amostrais.

Inicialmente, foi realizada uma análise de distribuição e homogeneidade dos dados para verificar às pressuposições dos testes paramétricos estabelecidos.

Os dados experimentais foram submetidos aos testes de normalidade dos resíduos (teste de Shapiro-Wilk) e homogeneidade das variâncias (teste de Bartlett). Atendidos os requisitos, procedeu-se a análise de variância (ANOVA) e, quando constatado efeito significativo dos fatores, as médias foram comparadas pelo teste de Tukey ao nível 5% de significância. As análises estatísticas foram realizadas utilizando o pacote ExpDes.pt no software R Core Team, enquanto o Microsoft Excel® foi empregado para organização e tabulação dos dados.

3. Resultados e discussão

a. Composição química imediata dos biochars

Na Figura 1 são apresentados os valores médios da composição química imediata,dos biochars em função do tipo de biomassa e da temperatura de pirólise.

Figura 1 – Teor de materiais voláteis (a), teor de cinzas (b) e carbono fixo (c) dos biochars em função da biomassa e da temperatura de pirólise

O aumento da temperatura de pirólise promoveu aumento do carbono fixo, redução dos materiais voláteis e incremento no teor de cinzas, independentemente da biomassa de origem. O biochar de resíduo de eucalipto teve o maior decréscimo de materiais voláteis (de 31,90% a 9,48%) e o maior incremento de carbono fixo (de 67,13% a 88,98%), enquanto o biochar de resíduo de casca de café manteve os maiores teores de materiais voláteis (16,23% a 650°C) e de cinzas (18,87% a 650°C) entre todas as biomassas, refletindo sua composição química de origem distinta das demais, rica em compostos inorgânicos característicos de resíduos agroindustriais (Setter et al., 2020).

Esse comportamento é explicado pelo processo de devolatilização térmica que ocorre durante a pirólise, sendo que a medida que a temperatura aumenta, compostos orgânicos voláteis oriundos da degradação das hemiceluloses, da celulose e das frações mais lábeis da lignina são aos poucos liberados na forma de gases e vapores condensáveis, reduzindo a fração volátil do material sólido resultante (Tomczyk et al., 2020).

Esse padrão de devolatilização progressiva é relatado na literatura por Fernandes et al. (2020) e Nogueira et al. (2025) que observaram redução de materiais voláteis e aumento de carbono fixo em biochar de eucalipto em faixa comparável de temperaturas; por Setter et al. (2020) em estudos de biochar de casca de café, e por Dissanayaka et al. (2023) que observaram as mesmas tendências para biochar de coco, associando o aumento do carbono fixo à maior aromaticidade da estrutura carbonizada em temperaturas mais elevadas.

b. **Relação molar H/C_{org}**

Na Figura 2 são apresentados os valores médios da relação H/Corg dos biochars em função da biomassa e temperatura de pirólise.

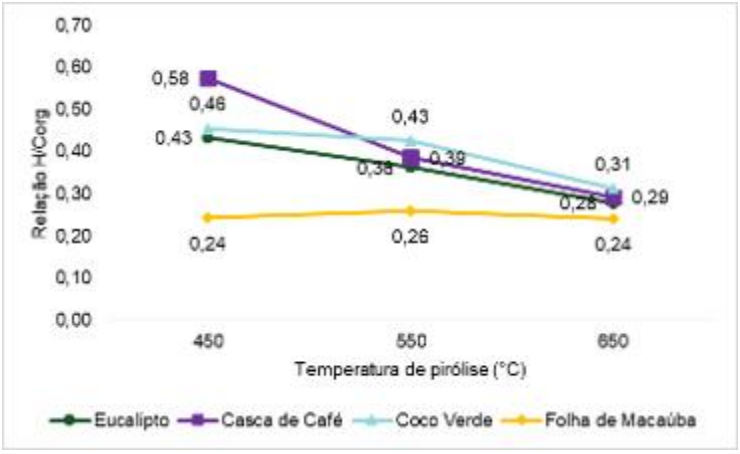


Figura 2 – Relação H/C_{org} dos biochars em função da biomassa e da temperatura de pirólise

A razão molar H/Corg diminuiu com o aumento da temperatura de pirólise para todas as biomassas, exceto para a folha de macaúba, que já apresentou os menores valores desde 450°C, temperatura em que o biochar de casca de café teve a maior relação H/Corg (0,58). A partir de 650°C, observou-se redução acentuada da relação H/Corg para as demais biomassas, aproximando os valores entre si (Figura 2).

De acordo com os critérios estabelecidos pelo Manual da *European Biochar Certificate* (EBC, 2023) e a metodologia da *Puro Standard*: Biochar Methodology – Version 2 (Puro.earth, 2025), para que um biochar seja considerado apto ao uso como agente de sequestro de carbono no solo, sua razão molar hidrogênio/carbono orgânico (H/Corg) deve ser inferior a 0,7, limite associado a um maior grau de aromatização da estrutura carbônica. Neste estudo, as quatro biomassas avaliadas já atenderam a esse critério na temperatura mais baixa, 450°C, o que indica que o processo de pirólise foi suficiente para promover a carbonização necessária à formação de biochars estáveis (Figura 2).

Esses resultados são consistentes com os relatados por Fernandes et al. (2020) e Nogueira et al. (2025) para biochar de eucalipto, por Setter et al. (2020) para biochar de casca de café e por Dissanayaka et al. (2023) para biochar de coco, que também observaram redução da razão H/Corg com o aumento da temperatura de pirólise, atribuída à intensificação da degradação térmica dos carboidratos e parcialmente da lignina, levando a perda progressiva de grupos funcionais alifáticos. Já o comportamento diferenciado da folha de macaúba, mantendo razão H/Corg baixa mesmo em temperaturas mais brandas, sugere que essa biomassa já se encontra

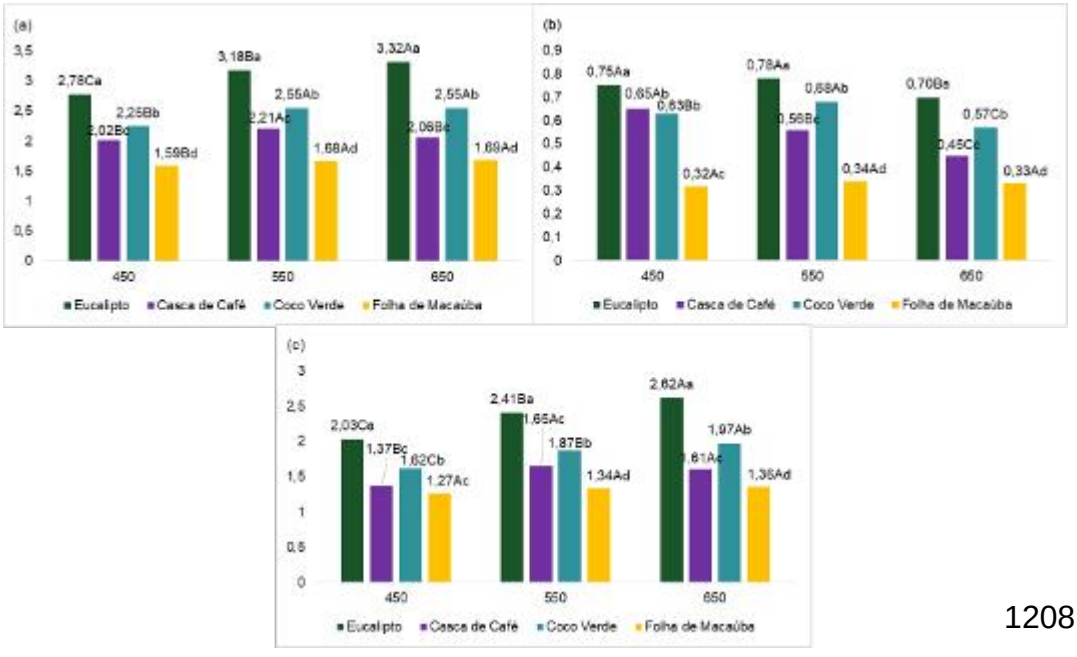
fortemente carbonizada desde os estágios iniciais de pirólise, provavelmente em razão de sua composição lignocelulósica com menor teor de compostos alifáticos voláteis (Guilhen, 2018).

3.2 Estoque de CO_{2eq}, perdas de armazenamento e estoque líquido

Na Figura 3 são apresentados os valores médios do estoque bruto de CO_2eq (a), das perdas de armazenamento de carbono (C_{loss}, b) e do estoque líquido de CO_2eq (c) dos biochars, em função do tipo de biomassa e da temperatura final de pirólise.

Figura 3 – Estoque bruto de CO_2eq (a), perdas de armazenamento de carbono (b) e estoque líquido de CO_2eq (c) dos biochars em função da biomassa e da temperatura de pirólise. Médias seguidas pela mesma letra, maiúscula para cada biochar, minúscula para cada temperatura, não diferem entre si. Teste de Tukey (5%)

Houve interação significativa da biomassa e temperatura de pirólise no estoque bruto de CO_2eq (a), perdas de armazenamento de carbono (b) e estoque líquido de CO_2eq (c). De modo geral, o estoque de CO_{2eq} bruto (Figura 3a) aumentou com o incremento da temperatura, independente da biomassa, tendo o biochar de resíduo de eucalipto significativamente o maior estoque a 650°C (3,32 tCO_2eq). Para o biochar de casca de café, o maior estoque ocorreu a 550°C (2,21 tCO_2eq), sem diferença entre 450°C e 650°C e para coco verde e folha de macaúba, os estoques de CO_{2eq} bruto dos biochars produzidos nas temperaturas de 550°C e 650°C não diferiram entre si, mas foram superiores ao observado a 450°C. Esse comportamento está diretamente relacionado ao maior teor de carbono e à menor razão H/C_{org} observados para o eucalipto em temperaturas mais elevadas, uma vez que o estoque bruto de CO_2eq é calculado em função da quantidade de carbono orgânico estável presente no biochar.



Já as perdas de armazenamento (C_{loss}), (Figura 3b), foram maiores para o eucalipto (0,70 a 0,78 tCO_2eq) e coco verde (0,57 a 0,68 tCO_2eq) em relação as demais, o que reduziu o ganho relativo no estoque de CO_{2eq} líquido dessas biomassas em relação ao estoque de CO_{2eq} bruto. Como consequência desse balanço, o estoque de CO_{2eq} líquido (Figura 3c) seguiu tendência semelhante à do estoque bruto, com o biochar de resíduo de eucalipto apresentando os maiores valores (2,03 a 2,62 tCO_2eq) e a folha de macaúba os menores (1,27 a 1,36 tCO_2eq).

Os valores de estoque CO_{2eq} líquido obtidos para biochar de eucalipto neste estudo (2,03 a 2,62 tCO_2e) são menores aos relatados por Nogueira et al. (2025), que obtiveram 1,67 tCO_2eq por tonelada de biochar de cavacos de eucalipto produzido a 430°C, possivelmente em razão de diferenças na taxa de aquecimento, no tempo de residência e no fator de decaimento (α) adotado para as condições edafoclimáticas locais.

Woolf et al. (2021) e Lehmann e Joseph (2015) destacam que o aumento do teor de carbono orgânico e consequentemente o grau de aromaticidade do biochar são os principais fatores que determinam seu potencial de estoque líquido de CO_2eq, corroborando com os achados deste presente estudo, os quais os maiores estoques foram observados para os biochars com os maiores teores de carbono, menores teores de hidrogênio e oxigênios e consequentemente menor relação $H/C_{org.}$

413. Conclusões

Os resultados obtidos evidenciam que tanto o tipo de biomassa quanto a temperatura final de pirólise exercem influência sobre o estoque de CO_2eq dos biochars avaliados. O aumento da temperatura de pirólise, de 450°C para 650°C, elevou o teor de carbono e, de modo geral, reduziu a razão molar H/C_{org} das biomassas avaliadas, resultando em maior estabilidade química e maior estoque líquido de CO_2eq. Os resíduos de eucalipto se destacaram por apresentar o maior estoque bruto e líquido de CO_2eq entre as biomassas avaliadas, enquanto os resíduos de folha de macaúba, apesar do menor estoque absoluto, apresentaram a maior estabilidade relativa do carbono, evidenciada pela menor razão H/C_{org} e pelas menores perdas de armazenamento. Esses resultados reforçam a viabilidade do uso de resíduos agroindustriais e florestais brasileiros na produção de biochars destinados à mitigação das mudanças climáticas e à contribuição para projetos de remoção de carbono, sendo a escolha da biomassa e das condições de pirólise etapas estratégicas para maximizar esse potencial.

414. Agradecimentos

Este trabalho foi viabilizado, em parte, pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) - Processo APQ-05311-24; APQ-04599-25 e pelo Conselho

Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) - Processo n° 444395/2024-5.

415. Referências bibliográficas

ASTM – American Society for Testing and Materials. ASTM D1762 – 84: Standard Test Method for Chemical Analysis of Wood Charcoal. West Conshohocken, USA, 2021.

Deutsches Institut für Normung (DIN). (2015). DIN EN ISO 16948: Solid bio-fuels - Determination of total content of carbon, hydrogen and nitrogen. Beuth Ver-lag. https://www.dinmedia.de/en/standard/din-en-iso-16948/222780653

Deutsches Institut für Normung (DIN). (2016a). DIN EN ISO 16993: Solid bio-fuels - Conversion of analytical results from one basis to another. Beuth Verlag. https://www.en-standard.eu/din-en-iso-16993-solid-biofuels-conversion-of-analytical-results-from-one-basis-to-another-iso-16993-2016/

Deutsches Institut für Normung (DIN). (2016b). DIN EN ISO 16994: Solid bio-fuels - Determination of total content of sulfur and chlorine. Beuth Verlag. https://www.en-standard.eu/din-en-iso-16994-solid-biofuels-determination-of-total-content-of-sulfur-and-chlorine-iso-16994-2016/

Dissanayaka, D. M. N. S., Udumann, S. S., Nuwarapaksha, T. D., & Atapattu, A. J. (2023). Effects of pyrolysis temperature on chemical composition of coconut-husk biochar for agricultural applications: A characterization study. Technology in Agron-omy, 3, Article 13. https://doi.org/10.48130/TIA-2023-0013

FAO. (2025). Greenhouse gas emissions from agrifood systems: Global, re-gional and country trends, 2001–2023 (FAOSTAT Analytical Brief No. 65). FAO. https://openknowledge.fao.org/handle/20.500.14283/cd1602en

Fernandes, B. C., Mendes, K. F., Dias Júnior, A. F., Caldeira, V. P. S., Teófilo, T. M. S., Silva, T. S., Mendonça, V., Souza, M. F., & Silva, D. V. (2020). Impact of pyrolysis temperature on the properties of eucalyptus wood-derived biochar. Materi-als, 13(24), Article 5841. https://doi.org/10.3390/ma13245841

Ghosh, D., Page-Dumroese, D. S., Han, H. S., & Anderson, N. (2025). Role of biochar made from low-value woody forest residues in ecological sustainability and carbon neutrality. Soil Science Society of America Journal, 89(1), e20793. https://doi.org/10.1002/saj2.20793

Guilhen, S. N. (2018). Síntese e caracterização de biocarvão obtido a partir do resíduo de coco de macaúba para remoção de urânio de soluções aquosas (Tese de dou-torado, Universidade de São Paulo). https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/85/85134/tde-13092018-144036/pt-br.php

International Biochar Initiative (IBI). (2015). Standardized product definition and product testing guidelines for biochar that is used in soil (Version 2.1). https://biochar-international.org/wp-content/uploads/2018/04/IBI_Biochar_Standards_V2.1_Final.pdf

Lefebvre, D., Williams, A., Meersmans, J., Kirk, G. J. D., Sohi, S., Goglio, P., & Smith, P. (2020). Modelling the potential for soil carbon sequestration using biochar from sugarcane

residues in Brazil. Scientific Reports, 10, Article 19479. https://doi.org/10.1038/s41598-020-76470-y

Lehmann, J., & Joseph, S. (Eds.). (2015). Biochar for environmental manage-ment: Science, technology and implementation (2nd ed.). Routledge.

Muñoz-Sabater, J., Dutra, E., Agustí-Panareda, A., Albergel, C., Arduini, G., Balsamo, G., Boussetta, S., Choulga, M., Harrigan, S., Hersbach, H., Martens, B., Mi-ralles, D. G., Piles, M., Rodríguez-Fernández, N. J., Zsoter, E., Buontempo, C., & Thépaut, J.-N. (2021). ERA5-Land: A state-of-the-art global reanalysis dataset for land applications. Earth System Science Data, 13(9), 4349–4383. https://doi.org/10.5194/essd-13-4349-2021

Nogueira, C. O. S., Pereira, V. A., Latorre, F. L., Paula, R. J., Dutra Junior, A. T., Almeida, I. A., Ferreira, O. E., Lima, E. N., Bezerra, A. C. S., & Machado, A. R. T. (2025). Pilot-scale production of biochar from eucalyptus wood chips for carbon se-questration. Carbon Neutral Systems, 1, Article 15. https://doi.org/10.1007/s44438-025-00015-x

Setter, C., Silva, F. T. M., Assis, M. R., Ataíde, C. H., Trugilho, P. F., & Oliveira, T. J. P. (2020). Slow pyrolysis of coffee husk briquettes: Characterization of the solid and liquid fractions. Fuel, 261, Article 116420. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.116420

Woolf, D., Lehmann, J., Ogle, S., Kishimoto-Mo, A. W., McConkey, B., & Baldock, J. (2021). Greenhouse gas inventory model for biochar additions to soil. En-vironmental Science & Technology, 55(21), 14795–14805. https://doi.org/10.1021/acs.est.1c02425

Zhao, B., O'Connor, D., Zhang, J., Peng, T., Shen, Z., Tsang, D. C. W., & Hou, D. (2018). Effect of pyrolysis temperature, heating rate, and residence time on rape-seed stem derived biochar. Journal of Cleaner Production, 174, 977–987. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.11.013

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Efeito da concentração de NaOH na polpação soda de fibras de jerivá

Ricardo Gabriel de Almeida Mesquita[1,3]; Paulo Roberto Santos Josino[2]; Adeilson Carvalho[3]; Antônio Claret de Matos[3]; Lina Bufalino[2]; Lourival Marin Mendes[3]; Elisângela Elena Nunes Carvalho[3]; José Benedito Guimarães Júnior[3]

[1] Universidade Federal do Sul da Bahia
[2] Universidade Federal Rural da Amazônia
[3] Universidade Federal de Lavras

Resumo: As fibras do fruto de jerivá (*Syagrus romanzoffiana*) apresentam potencial para produção de papel, mas a influência da concentração de NaOH durante a polpação ainda é pouco conhecida. Este estudo avaliou o efeito de duas concentrações de NaOH (18 e 22%) na polpação soda e nas propriedades de folhas laboratoriais produzidas com essas fibras. Foram determinados o rendimento da polpa, o teor de rejeitos, as propriedades físicas e mecânicas das folhas e a absorção de água (Cobb60). O aumento da concentração de NaOH reduziu o rendimento bruto de 25,60 para 18,50%, mas diminuiu os rejeitos de 11,36 para 1,10%. As folhas produzidas com 22% de NaOH apresentaram maior densidade aparente, menor permeância ao ar, mantiveram a integridade durante o ensaio Cobb60 e apresentaram desempenho mecânico superior. Os resultados indicam que a utilização de 22% de NaOH favoreceu a produção de folhas laboratoriais com melhores propriedades físicas e mecânicas a partir das fibras de jerivá.

Palavras-chave: Biomassa lignocelulósica; Folhas laboratoriais; Fibras não madeireiras.

Effect of NaOH concentration on the soda pulping of jerivá fibers

Abstract: Jerivá (*Syagrus romanzoffiana*) fruit fibers are a promising raw material for papermaking, although the influence of NaOH concentration during soda pulping remains poorly understood. This study evaluated the effect of 18 and 22% NaOH on pulp yield and on the physical and mechanical properties of laboratory handsheets. Pulp yield, rejects content, physical and mechanical properties, and Cobb60 water absorption were determined. Increasing the NaOH concentration reduced the gross pulp yield from 25.60 to 18.50% and decreased rejects from 11.36 to 1.10%. Handsheets produced with 22% NaOH showed higher apparent density, lower air permeance, maintained their integrity during the Cobb60 test, and exhibited superior mechanical performance. These results indicate that 22% NaOH is the most suitable condition among those evaluated for producing laboratory handsheets with improved physical and mechanical properties from jerivá fibers.

Keywords: Laboratory handsheets; Lignocellulosic biomass; Non-wood fibers.

1. Introdução

A indústria de celulose e papel depende predominantemente da madeira como fonte de fibras, o que tem estimulado a busca por matérias-primas lignocelulósicas alternativas capazes de complementar os recursos florestais convencionais. Resíduos agrícolas e agroflorestais

apresentam ampla disponibilidade e podem contribuir para o aproveitamento integral da biomassa, agregação de valor a subprodutos e desenvolvimento de materiais de base renovável (Abd El-Sayed et al., 2020; Haile et al., 2023; Li et al., 2023; Worku et al., 2023).

Diversos materiais lignocelulósicos têm sido investigados para produção de celulose e papel, incluindo palha de arroz, bambu, fibras de palmeiras, resíduos de fique e fibras de açaí (Bonfatti Júnior et al., 2019; Hawanis et al., 2025; Jaramillo et al., 2025; Oliveira et al., 2024; Rodríguez et al., 2010). Entre essas alternativas, as fibras de jerivá (*Syagrus romanzoffiana*) permanecem pouco exploradas para aplicações em papel. Os estudos disponíveis concentram-se principalmente na caracterização química dos frutos, na obtenção de nanocelulose e no desenvolvimento de biocompósitos (Coimbra & Jorge, 2011; Ferfari et al., 2025; Martins et al., 2015; Meddour et al., 2025; Mendes et al., 2025).

Na polpação soda, o hidróxido de sódio promove a solubilização parcial da lignina e de outros constituintes da parede celular, favorecendo a individualização das fibras e a formação da polpa celulósica. A intensidade desse processo depende das condições de polpação, especialmente da carga alcalina empregada, que influencia simultaneamente o rendimento da polpa, a formação de rejeitos e as propriedades das folhas produzidas (Li et al., 2023; Oliveira et al., 2026; Rodríguez et al., 2010; Sharma et al., 2020).

Apesar do potencial das fibras de jerivá como matéria-prima lignocelulósica, ainda são escassos estudos que avaliem o efeito da concentração de NaOH na produção de polpa e no desempenho físico e mecânico de folhas laboratoriais obtidas desse material. Assim, este trabalho teve como objetivo avaliar a influência de duas concentrações de hidróxido de sódio na polpação soda de fibras de jerivá e seus efeitos sobre o rendimento da polpa, a formação de rejeitos e as propriedades físicas e mecânicas do papel produzido.

2. Material e métodos

2.1 Matéria-prima e polpação soda

Frutos de jerivá (*Syagrus romanzoffiana* (Cham.) Glassman) foram coletados na Universidade Federal de Lavras (Lavras, MG, Brasil). Após a secagem até aproximadamente 7,4% de umidade, os frutos foram processados em moinho de martelos para separação da fração fibrosa, sendo as fibras utilizadas como matéria-prima para a polpação.

A polpação soda foi realizada em digestor rotativo laboratorial (Regmed®, Brasil), utilizando 1 kg de fibras em base seca. Foram avaliadas duas concentrações de hidróxido de sódio, correspondentes a 18% (J18) e 22% (J22), calculadas com base na massa seca das fibras.

A relação licor:fibra foi de 8:1. Os cozimentos foram conduzidos a 165 °C durante 60 min, contabilizados após a temperatura máxima ser atingida. Cada condição de polpação foi realizada em duplicata.

Após o cozimento, as polpas foram lavadas até pH neutro e depuradas em depurador Somerville equipado com peneira de 0,20 mm durante 20 min. Em seguida, as polpas foram desagregadas em desintegrador laboratorial e homogeneizadas para produção das folhas.

2.2 Produção das folhas laboratoriais

As folhas laboratoriais foram produzidas com gramatura nominal de 60 g m^{-2} utilizando formador de folhas (Regmed®, Brasil), conforme a norma TAPPI T205. Para cada tratamento foram confeccionadas 25 folhas. Após a formação, as folhas foram prensadas por 2 min, fixadas em molduras metálicas e secas em condições ambientais.

2.3 Caracterização das polpas e das folhas

O rendimento bruto da polpa, o teor de rejeitos e o rendimento depurado foram determinados após a polpação.

As folhas produzidas foram avaliadas quanto à gramatura, espessura, densidade aparente, permeância ao ar, absorção de água (Cobb60) e propriedades mecânicas sob tração. Os ensaios físicos foram realizados de acordo com as normas TAPPI T410, T411, T441 e T460, enquanto as propriedades mecânicas foram determinadas conforme a ISO 1924-2:2008.

2.4 Análise estatística

Os dados foram submetidos aos testes de Shapiro–Wilk e Levene para verificação da normalidade e homogeneidade das variâncias. As variáveis que atenderam aos pressupostos foram comparadas pelo teste *t* de Student, enquanto aquelas que não atenderam foram analisadas pelo teste de Mann–Whitney, ambos ao nível de 5% de significância. Os resultados das propriedades físicas e mecânicas foram apresentados como média ± intervalo de confiança de 95%. Os rejeitos foram apresentados como média ± desvio-padrão de três determinações. O ChatGPT (OpenAI) foi utilizado exclusivamente para revisão gramatical, melhoria da redação e verificação da formatação do manuscrito.

3. Resultados e discussão

O aumento da concentração de NaOH influenciou diretamente a eficiência da polpação das fibras de jerivá (Tabela 1). O rendimento bruto diminuiu de 25,6% para 18,5% quando a concentração alcalina foi elevada de 18 para 22%, enquanto o rendimento depurado reduziu de 22,69% para 18,30%. Em contrapartida, o teor de rejeitos apresentou redução expressiva, passando de 11,36% para 1,10%. Esses resultados indicam que a maior carga alcalina favoreceu a separação das fibras e reduziu a quantidade de material insuficientemente processado retido durante a depuração.

Tabela 1 - Rendimento bruto, rendimento depurado e teor de rejeitos das polpas obtidas por polpação soda de fibras de jerivá

Tratamento	Rendimento bruto (%)	Rendimento depurado (%)	Rejeitos (%)
J18	25,6	22,69	11,36 ± 1,76
J22	18,5	18,3	1,10 ± 0,21

Nota: Valores de rejeitos apresentados como média ± desvio-padrão (n = 3).

Resultados semelhantes foram observados por Oliveira et al. (2026), que verificaram redução do rendimento acompanhada por melhora da individualização das fibras durante a polpação soda de resíduos de açaí. Rodríguez et al. (2010) também destacaram que o aumento da severidade da polpação reduz a formação de rejeitos e melhora a qualidade da polpa produzida.

As diferenças observadas durante a polpação refletiram diretamente na estrutura das folhas laboratoriais (Tabela 2). A gramatura não diferiu entre os tratamentos, indicando deposição semelhante de fibras durante a formação das folhas. A espessura foi menor para J22, enquanto a densidade aparente aumentou e a permeância ao ar foi reduzida. Esses resultados evidenciam uma estrutura mais consolidada e menos porosa quando foi utilizada a maior concentração de NaOH.

Tabela 2 - Propriedades físicas das folhas laboratoriais

Propriedade	J18	J22
Gramatura (g m^{-2})	60,73 ± 2,82 a	60,55 ± 2,96 a
Espessura (mm)	0,17 ± 0,01 a	0,12 ± 0,01 b
Densidade aparente (kg m^{-3})	365,47 ± 32,93 b	503,94 ± 45,62 a
Permeância ao ar (µm Pa^{-1} s^{-1})	187,64 ± 26,79 a	30,94 ± 5,98 b

Cobb60 (g m^{-2})	Desintegrou durante o ensaio	182,02 ± 7,73

Nota: Valores apresentados como média ± intervalo de confiança de 95%. Médias seguidas pela mesma letra na linha não diferem entre si ($p \geq 0,05$).

Durante o ensaio Cobb60 foi observada a maior diferença entre os tratamentos (Figura 1). Todas as folhas produzidas com J18 perderam sua integridade estrutural durante o contato com a água, impossibilitando a determinação da absorção. Em contraste, as folhas produzidas com J22 permaneceram intactas durante o ensaio e apresentaram valor médio de Cobb60 de 182,02 ± 7,73 g m^{-2}. Esse comportamento, associado à menor quantidade de rejeitos, à maior densidade aparente e à menor permeância ao ar, indica melhor consolidação das folhas produzidas com J22.



Figura 1 - Aspecto das folhas laboratoriais durante o ensaio Cobb60: (A) tratamento J18, com desintegração da folha após a exposição à água; (B) tratamento J22, mantendo a integridade estrutural após o ensaio.

As propriedades mecânicas acompanharam a tendência observada para as propriedades físicas (Tabela 3). O tratamento J22 apresentou maiores valores de força máxima, módulo de elasticidade, resistência à tração, índice de tração, absorção de energia até a ruptura (TEA) e índice de absorção de energia. Os resultados demonstram que a redução do rendimento da polpa foi acompanhada por ganhos expressivos no desempenho mecânico das folhas produzidas com J22.

Tabela 3 - Propriedades mecânicas das folhas laboratoriais

Propriedade	J18	J22
Força máxima (N)	8,39 ± 0,80 b	20,60 ± 1,14 a
Módulo de elasticidade (MPa)	486,27 ± 32,83 b	1117,42 ± 56,70 a
Alongamento (%)	1,02 ± 0,19 b	2,31 ± 0,22 a
Resistência à tração (kN m^{-1})	0,56 ± 0,05 b	1,37 ± 0,08 a
Índice de tração (kN m kg^{-1})	10,57 ± 1,01 b	22,66 ± 1,25 a
TEA (J m^{-2})	3,36 ± 0,78 b	21,91 ± 3,38 a
Índice TEA (J kg^{-1})	63,44 ± 14,66 b	361,52 ± 55,74 a

Nota: Valores apresentados como média ± intervalo de confiança de 95%. Médias seguidas pela mesma letra na linha não diferem estatisticamente entre si ($p \geq 0,05$). Para variáveis que atenderam aos pressupostos de normalidade e homogeneidade, utilizou-se o teste *t* de Student; para as demais, foi aplicado o teste de Mann–Whitney ($p < 0,05$).

A melhoria do desempenho mecânico está associada à maior eficiência da polpação promovida pelo tratamento J22. A menor quantidade de rejeitos, a maior densidade aparente e a menor permeância ao ar indicam que a concentração de 22% de NaOH favoreceu a individualização das fibras e a formação de uma estrutura mais uniforme, refletindo em folhas com maior resistência mecânica. Resultados semelhantes foram relatados para outros resíduos lignocelulósicos submetidos à polpação soda (Abd El-Sayed et al., 2020; Jaramillo et al., 2025; Oliveira et al., 2026).

Os resultados obtidos demonstram que as fibras de jerivá apresentam potencial para produção de folhas laboratoriais. Embora a maior concentração de NaOH tenha reduzido o rendimento da polpa, essa condição proporcionou redução dos rejeitos e melhorias consistentes nas propriedades físicas e mecânicas das folhas.

4. Conclusões

A concentração de NaOH influenciou a eficiência da polpação das fibras de jerivá e o desempenho das folhas laboratoriais. A utilização de 22% de NaOH reduziu o rendimento da polpa, mas promoveu expressiva redução do teor de rejeitos e favoreceu a separação das fibras durante o processamento. Essa condição resultou em folhas com maior densidade aparente, menor permeância ao ar, manutenção da integridade durante o ensaio Cobb60 e melhores propriedades mecânicas em comparação ao tratamento com 18% de NaOH. Entre as condições avaliadas, a concentração de 22% de NaOH foi a mais adequada para a produção de folhas laboratoriais com fibras de jerivá.

5. Agradecimentos

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG), ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Biomateriais da Universidade Federal de Lavras (UFLA), à AmazonCel – Universidade Federal Rural da Amazônia (UFRA) e ao Laboratório Central de Tecnologias de Produtos Florestais da Universidade Federal do Sul da Bahia (LCTPF/UFSB) pelo apoio científico e infraestrutura disponibilizada para a realização desta pesquisa. O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

6. Referências bibliográficas

Abd El-Sayed, E. S., El-Sakhawy, M., & El-Sakhawy, M. A.-M. (2020). Non-wood fibers as raw material for pulp and paper industry. *Nordic Pulp & Paper Research Journal*, *35*(2), 215–230. https://doi.org/10.1515/npprj-2019-0064

Bonfatti Júnior, E. A., Lengowski, E. C., Andrade, A. S., Venson, I., Klock, U., Silva Júnior, F. G., Gonçalez, J. C., & Bolzon de Muñiz, G. I. (2019). Bamboo kraft pulping. *Advances in Forestry Science*, *6*(4), 791–796. https://doi.org/10.34062/afs.v6i4.8361

Coimbra, M. C., & Jorge, N. (2011). Proximate composition of guariroba (*Syagrus oleracea*), jerivá (*Syagrus romanzoffiana*) and macaúba (*Acrocomia aculeata*) palm fruits. *Food Research International*, *44*(7), 2139–2142. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2011.03.032

Ferfari, O., Belaadi, A., Chai, B. X., & Ghernaout, D. (2025). Enhancing bio-epoxy composites with *Syagrus romanzoffiana* palm fibers: Impact of fiber loading on

thermomechanical and water absorption properties. *Industrial Crops and Products*, *238*, 122384. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2025.122384

Haile, A., Gebino, G., Tesfaye, T., Mengie, W., Ayele, M., Abuhay, A., & Yilie, D. (2023). Utilization of non-wood biomass for pulp manufacturing in paper industry: Case of Ethiopia. *Biomass Conversion and Biorefinery*, *13*, 7441–7459. https://doi.org/10.1007/s13399-021-01424-x

Hawanis, H. S. N., Shamimimraphay, S. H. R., Ilyas, R. A., Jalil, R., Ibrahim, R., Zuhri, M. Y. M., Azriena, H. A. A., Majid, R. A., & Fatriasari, W. (2025). Hybrid alkaline pulping enhances physiochemical, morphological, thermal, and mechanical properties of sugar palm fiber for papermaking. *Industrial Crops and Products*, *224*, 120307. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2024.120307

International Organization for Standardization. (2008). *ISO 1924-2:2008. Paper and board — Determination of tensile properties — Part 2: Constant rate of elongation method (20 mm/min).* ISO.

Jaramillo, N., Osorio, M. A., Castro, C. I., Restrepo, M. C., Betancur, M., Ríos, A., & Quintana, G. C. (2025). Valorization of fique lignocellulosic residues for sustainable craft paper production. *Sustainability*, *17*, 8032. https://doi.org/10.3390/su17178032

Li, P., Xu, Y., Yin, L., Liang, X., Wang, R., & Liu, K. (2023). Development of raw materials and technology for pulping—A brief review. *Polymers*, *15*, 4465. https://doi.org/10.3390/polym15224465

Martins, V. C., Braga, E. C. O., Mazza, K. E. L., Rocha, J. F., Cunha, C. P., Pacheco, S., Nascimento, L. S. M., Santiago, M. C. P. A., Borguini, R. G., & Godoy, R. L. O. (2015). Caracterização química da polpa do fruto jerivá (*Syagrus romanzoffiana* Cham.). *Revista Virtual de Química*, *7*(6), 2422–2437. https://doi.org/10.5935/1984-6835.20150144

Meddour, A., Belaadi, A., Boumaza, M., Bourchak, M., & Ghanem, D. (2025). Enhancing *Syagrus romanzoffiana* lignocellulosic fibers' properties by ecological treatment with sodium bicarbonate for applications in sustainable lightweight biocomposites. *International Journal of Biological Macromolecules*, *295*, 140062. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2025.140062

Mendes, J. F., Silva, M. J., Evangelista, N. C., Lopes, L. P., Martins, M. A., Mendes, R. F., & Mattoso, L. H. C. (2025). Jerivá (*Syagrus romanzoffiana*) fruit fibers valorization as cellulose and lignocellulose nanofibers source for nanopaper production. *International Journal of Biological Macromolecules*, *311*, 143905. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2025.143905

Oliveira, D. N. P. S., Matos, L. C., Souza, T. M., Araújo, E. S., Silva, M. G., Cabral, C. P. T., Mendes, L. M., Rocha, Q. S., & Bufalino, L. (2024). Methods for separating the lignocellulosic fibers from the açaí pulping waste: Quality for kraft pulping. *CERNE, 30*, e-103376. https://doi.org/10.1590/01047760202430013376

Oliveira, D. N. P. S., Matos, L. C., Araújo, E. S., Silva, I. A. M., Pereira, V. J., Cabral, C. P. T., Souza, T. M., Mendes, L. M., Tonoli, G. H. D., Lima, M. D. R., Protasio, T. P., Rocha, Q. S., Delucis, R. A., & Bufalino, L. (2026). Converting açaí waste fibers into paper-grade cellulose by soda pulping: Temperature and time effects on efficiency, cost, and sustainability. *Polymers from Renewable Resources*. https://doi.org/10.1177/20412479261457732

Rodríguez, A., Sánchez, R., Requejo, A., & Ferrer, A. (2010). Feasibility of rice straw as a raw material for the production of soda cellulose pulp. *Journal of Cleaner Production, 18*(11), 1084–1091. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2010.03.011

Sharma, N., Bhawana, Godiyal, R. D., & Thapliyal, B. P. (2020). A review on pulping, bleaching and papermaking processes. *Journal of Graphic Era University, 8*(2), 95–112.

Technical Association of the Pulp and Paper Industry. (2002). *TAPPI T205 sp-02: Forming handsheets for physical tests of pulp*. TAPPI.

Technical Association of the Pulp and Paper Industry. (2008). *TAPPI T410 om-08: Grammage of paper and paperboard*. TAPPI.

Technical Association of the Pulp and Paper Industry. (2009). *TAPPI T441 om-09: Water absorptiveness of sized (non-bibulous) paper and paperboard (Cobb test)*. TAPPI.

Technical Association of the Pulp and Paper Industry. (2010). *TAPPI T411 om-10: Thickness (caliper) of paper, paperboard, and combined board*. TAPPI.

Technical Association of the Pulp and Paper Industry. (2011). *TAPPI T460 om-11: Air resistance of paper (Gurley method)*. TAPPI.

Worku, L. A., Bachheti, A., Bachheti, R. K., Rodrigues Reis, C. E., & Chandel, A. K. (2023). Agricultural residues as raw materials for pulp and paper production: Overview and applications on membrane fabrication. *Membranes, 13*, 228. https://doi.org/10.3390/membranes13020228

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Efeito da intensidade de tosta interna de dornas sobre a composição química de aguardente de cana-de-açúcar

Natalia Durigon Melo[1]; Thâmara dos Santos Osaki[1]; José Fellip Catique Marinho[1]; Rodrigo Schmitz[1]; Alexsandro Bayestorff da Cunha[1]; Cecilia Roratto Köhn[2]; Alessandro de Oliveira Rios[2]; Polliana D'Angelo Rios[1]

[1] Universidade do Estado de Santa Catarina – Centro de Ciências Agroveterinárias
[2] Universidade Federal do Rio Grande do Sul – Instituto de Ciência e Tecnologia em Alimentos

Resumo: O presente estudo teve por objetivo avaliar as propriedades físico-químicas e os compostos fenólicos de aguardente de cana-de-açúcar armazenada em dornas de *Amburana cearensis* expostas a diferentes intensidades de tratamento térmico interno, sendo eles: sem tosta, tosta leve e tosta moderada. O período de armazenamento foi de 180 dias em sala climatizada. A determinação dos compostos fenólicos foi por HPLC-DAD e os parâmetros físico-químicos de acordo com a IN nº 13/2005 do MAPA. Todos os compostos fenólicos apresentaram diferenças significativas entre os tratamentos, sendo que o ácido protocatecuico reduziu drasticamente sua concentração diante do tratamento térmico, o ácido cafeico aumentou sua concentração na tosta moderada, já os compostos, ácido ferúlico, elágico e kaempferol reduziram gradualmente sua concentração. Considerando os parâmetros físico-químicos, o extrato seco total e o teor de cobre reduziram, enquanto a quantidade de furfural, aldeído acético e acidez volátil aumentaram com a intensidade de tosta. Todas as amostras atenderam aos limites da legislação vigente. Portanto, a intensificação da tosta em dornas de madeira proporcionou o aumento na concentração de produtos oriundos da pirólise, reduzindo aqueles que são extraídos da madeira sem o tratamento térmico.
Palavras-chave: compostos fenólicos; bebidas alcoólicas; HPLC-DAD; tratamento térmico; madeira nativa.

Effect of internal toasting intensity of casks on the chemical composition of sugarcane spirit

Abstract: This study aimed to evaluate the physicochemical properties and phenolic compounds of sugarcane spirit stored in *Amburana cearensis* casks exposed to different intensities of internal thermal treatment: no toast, light toast, and moderate toast. The storage period was 180 days in a climate-controlled room. Phenolic compounds were determined by HPLC-DAD and the physicochemical parameters according to Normative Instruction No. 24/2005 of MAPA. All phenolic compounds showed significant differences among treatments, in which protocatechuic acid drastically reduced its concentration under thermal treatment, caffeic acid increased its concentration in the moderate toast, whereas the compounds ferulic acid, ellagic acid, and kaempferol gradually reduced their concentration. Regarding the physicochemical parameters, total dry extract and copper decreased, while furfural, acetaldehyde, and volatile acidity increased with toasting intensity. All samples complied with the limits of the current legislation. Therefore, intensifying the toasting level in wooden casks provides an increase in the concentration of products derived from pyrolysis, reducing those extracted from wood without thermal treatment.
Keywords: phenolic compounds; alcoholic beverages; HPLC-DAD; thermal treatment; native wood.

Introdução

A aguardente de cana-de-açúcar representa uma das bebidas destiladas de maior relevância econômica, histórica e cultural do Brasil. Produzida a partir da destilação do mosto fermentado do caldo de cana-de-açúcar, possui identidade própria, regulamentação específica e elevado potencial de agregação de valor por meio de diferentes tecnologias de produção e envelhecimento (Brasil, 2005; Bortoletto; Alcarde, 2015). Segundo os critérios estabelecidos pela legislação vigente, a aguardente é classificada como envelhecida quando, no mínimo, 50% do seu volume permanece armazenado por período igual ou superior a um ano em recipiente de madeira com capacidade máxima de 700 L; quando esses critérios de tempo e volume não são atendidos, o produto é classificado como armazenado (Brasil, 2022).

É justamente ao longo dessa etapa de armazenamento que a qualidade química e sensorial da bebida se define, tornando-se um dos principais fatores determinantes de sua aceitação pelo consumidor e de sua competitividade no mercado. Durante o envelhecimento, a aguardente passa por sucessivas transformações físico-químicas que alteram sua composição, promovendo modificações na coloração, no aroma, no sabor, na estabilidade oxidativa e no perfil químico do destilado (Wang; Chen; Xu, 2023). Tais alterações decorrem da extração de compostos da madeira, da degradação térmica dos componentes estruturais do lenho e de reações contínuas de oxidação, esterificação, hidrólise e condensação que se estabelecem ao longo do período de contato entre a bebida e o recipiente (Canas, 2017).

A intensidade dessas transformações, por sua vez, não é uniforme: depende de fatores como a espécie de madeira utilizada, o tempo de envelhecimento, o volume do recipiente e, sobretudo, o grau de tosta aplicado à sua superfície interna. A tosta consiste em um tratamento térmico controlado que promove alterações estruturais na madeira por meio da degradação parcial da hemicelulose, da celulose e, principalmente, da lignina, favorecendo a formação e a liberação de compostos responsáveis pelas características químicas e sensoriais da bebida envelhecida (Ratkovich et al., 2023).

Esse processo, no entanto, ainda não é padronizado, dependendo diretamente do tanoeiro responsável pela confecção do recipiente ainda que se busquem atualmente métodos de padronização, uma vez que o modo de aplicação do fogo, a temperatura e o tempo de exposição influenciam diretamente as propriedades transferidas à bebida (Castro, 2015). Nesse processo, compostos como o elagitanino surgem e têm sua concentração aumentada proporcionalmente

ao grau de tosta aplicado, sendo também influenciados pelo tempo de armazenamento da bebida (Navarro et al., 2016).

Paralelamente às transformações químicas promovidas pela madeira, diversas propriedades físico-químicas da aguardente sofrem alterações ao longo do armazenamento. Parâmetros como teor alcoólico, acidez volátil, acidez fixa, pH, extrato seco, densidade, cor, turbidez e sólidos solúveis podem ser modificados em decorrência da evaporação seletiva de compostos, da concentração provocada pela perda de água e etanol, da extração de substâncias da madeira e das reações de oxidação e esterificação já mencionadas (Bortoletto; Alcarde, 2013).

Apesar desse conjunto de transformações já bem documentado na literatura, ainda são escassos os estudos que avaliam, de forma integrada, as propriedades físico-químicas e os compostos fenólicos de aguardentes armazenadas em madeiras nativas brasileiras submetidas a diferentes intensidades de tosta, especialmente em dornas de menor volume. Entre essas espécies, destaca-se a *Amburana cearensis*, amplamente utilizada no armazenamento de aguardentes de cana-de-açúcar e de outras bebidas alcoólicas por conferir elevada aceitabilidade sensorial aos produtos envelhecidos (Cipriano, 2024), o que reforça a relevância de investigá-la sob diferentes condições de tosta.

Diante do exposto, o presente trabalho tem como objetivo avaliar as propriedades físico-químicas e os compostos fenólicos de aguardente de cana-de-açúcar armazenada em dornas confeccionadas com madeira de *Amburana cearensis*, submetidas a diferentes intensidades de tosta interna.

Material e métodos

Obtenção da bebida e das dornas de madeira e armazenamento

A aguardente de cana-de-açúcar empregada neste estudo foi cedida por uma empresa de Luiz Alves, Santa Catarina, registrada no Ministério da Agricultura e Pecuária (MAPA). O mosto utilizado foi fermentado por leveduras selvagens e destilado em alambique de cobre.

As dornas foram confeccionadas em madeira de *Amburana cearensis*, totalizando nove unidades de aproximadamente 5,5 L cada. A tosta interna foi aplicada com maçarico a 500 °C, variando o tempo, 15 segundos para a tosta leve e 60 segundos para a tosta moderada. Três dornas permaneceram sem tratamento térmico.

Período de armazenamento iniciou em agosto de 2024 e foi finalizado em fevereiro de 2025, totalizando 180 dias. Esse processo foi realizado em sala climatizada a 20 ± 5 °C, umidade relativa de 60 ± 5% e luminosidade reduzida.

Determinação dos compostos fenólicos

As condições cromatográficas utilizadas para a separação dos compostos fenólicos seguiram a metodologia descrita por Mallmann *et al*. (2020), com algumas modificações. A separação foi realizada em uma coluna Atlantis C18 (250 mm × 4,6 mm, 4 µm). Os solventes foram classificados como A (água acidificada com 0,1% de ácido fórmico) e B (acetonitrila acidificada com 0,1% de ácido fórmico). As amostras foram eluídas de acordo com um gradiente binário, iniciando com 5% de B como condição inicial e alcançando 50,2% de B aos 46 minutos. A vazão foi ajustada para 0,5 mL min^{-1} e o volume de injeção foi de 20 µL. Um sistema HPLC da Waters, acoplado em série com um Detector de Arranjo de Diodos (DAD), foi utilizado para a identificação e quantificação dos compostos fenólicos. Todas as amostras foram filtradas em acetato de celulose (0,22 µm) antes da análise de cromatografia líquida de alta eficiência (HPLC). As amostras foram obtidas em triplicata (n = 3).

Os espectros foram obtidos entre 200 e 600 nm e os cromatogramas foram processados em 280 nm. Os compostos foram quantificados por HPLC-DAD utilizando curva padrão de ácido pirogálico (tempo de retenção 15,5 minutos) (Tabela 1).

Tabela 1. Intervalo de confiabilidade, Coeficiente de determinação (r^2), Limite de quantificação (LOQ), Limite de detecção (LOD) de compostos fenólicos.

Padrão	IC (mg/L)	r^2	LOD (mg/L)	LOQ (mg/L)
Ácido Pirogálico	14,00 – 140,00	0,9986	5,59	16,95

Fonte: os autores (2026).

Análises físico-químicas

As análises foram realizadas conforme os parâmetros estabelecidos pela Instrução Normativa nº 13, de 29 de junho de 2005, do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (Brasil, 2005), com modificações.

O extrato seco foi determinado por gravimetria, com evaporação em banho-maria e secagem em estufa a 100 °C, e os resultados expressos em g L^{-1}.

A acidez volátil foi determinada por titulação de neutralização após a extração dos ácidos voláteis por arraste a vapor, empregando-se solução de hidróxido de sódio (NaOH) 0,1 mol L^{-1} como titulante e fenolftaleína a 1% como indicador. Os resultados foram expressos em mg de ácido acético por 100 mL de álcool anidro.

Os aldeídos foram quantificados por titulação iodométrica e expressos em mg de aldeído acético por 100 mL de álcool anidro.

O furfural e o cobre foram determinados por espectrofotometria na região do visível, a 520 nm e 546 nm respectivamente, ambos por comparação com curvas analíticas construídas com soluções padrão.

Análise estatística

O trabalho foi desenvolvido em delineamento inteiramente casualizado, no qual a única fonte de variação foi a intensidade de tosta aplicada internamente nas dornas, produzidas em triplicata.

A verificação da aderência dos dados à distribuição normal foi realizada pelo teste de Shapiro-Wilk e a homogeneidade das variâncias avaliada pelo teste de Levene, ambos a 5% de significância. Validados os pressupostos da estatística paramétrica, realizou-se a análise de variância (ANOVA) a 5% de significância para os dados de compostos fenólicos. Comprovada diferença entre os tratamentos, aplicou-se o teste de Tukey a 5% de significância.

Os parâmetros físico-químicos foram tratados por estatística descritiva, que engloba cálculos como média, desvio padrão e coeficiente de variação, sem análise inferencial. Todos esses testes foram realizados utilizando planilhas do aplicativo Microsoft Office Excel 2016® para organização dos dados e o software RStudio® (v. 4.6.0) para as análises estatísticas, com auxílio dos pacotes *car*, *agricolae* e *corrplot*.

Resultados e discussão

Compostos fenólicos

Todos os compostos apresentaram diferença significativa entre as intensidades de tosta, conforme apresentado na Tabela 2 e na Figura 1.

Tabela 2. Concentração média (mg L^{-1} ± desvio padrão) dos compostos fenólicos em aguardentes armazenadas em dornas de *A. cearensis* sob diferentes intensidades de tosta.

Composto	Sem tosta	Tosta leve	Tosta moderada	F	p
Ác. protocatecuico	813,25 ± 3,44 a	108,10 ± 1,89 b	114,79 ± 3,84 b	48938,35	<0,0001
Ác. cafeico	485,52 ± 7,62 b	378,86 ± 11,59 c	682,32 ± 22,13 a	312,70	<0,0001
Ác. elágico	6643,05 ± 111,81 a	6757,95 ± 248,15 a	5141,88 ± 180,79 b	68,54	0,0001
Ác. ferúlico	24426,91 ± 425,10 a	22926,91 ± 726,20 b	8852,13 ± 275,68 c	847,35	<0,0001
Kaempferol	3820,02 ± 149,17 a	3240,07 ± 111,45 b	1221,63 ± 29,65 c	470,97	<0,0001

Médias seguidas por letras distintas na linha diferem entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). Fonte: os autores (2026).

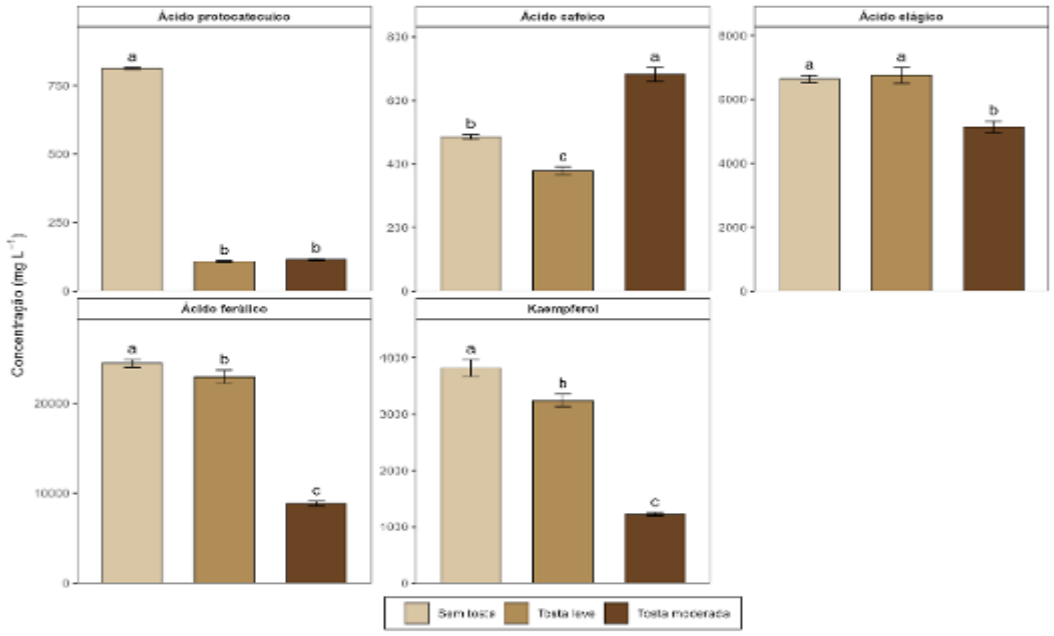


Figura 1. Concentração dos compostos fenólicos em função da intensidade de tosta. Barras representam a média e as hastes o desvio padrão. Fonte: os autores (2026).

Conforme observado, a aplicação de diferentes intensidades de tosta não determina um padrão único de comportamento entre os compostos fenólicos avaliados neste estudo.

O ácido protocatecuico demonstrou-se o mais sensível ao aquecimento, uma vez que apresentou uma redução drástica na sua concentração (86,7%) na tosta leve, não apresentando diferenças significativas quando comparado a tosta moderada ($p = 0,092$). Esse comportamento indica a suscetibilidade à degradação térmica do composto, corroborado por Cheng *et al.* (2014) que ressaltam que o grupo carboxila dos ácidos fenólicos facilita a descarboxilação térmica e possuem sua degradação acelerada em temperaturas superiores a 200 °C, faixa inferior à temperatura aplicada na tosta das dornas do presente estudo (500 °C).

Já o ácido cafeico apresentou uma redução em sua concentração na tosta leve, seguida de um aumento em tosta moderada, sugerindo que, o processo térmico mais intenso favorece a liberação desse composto para bebida.

O ácido ferúlico, o ácido elágico e o kaempferol apresentaram redução progressiva: quanto maior a intensidade da tosta, menor a disponibilidade desses compostos. O ácido ferúlico reduziu consideravelmente na tosta moderada, comportamento também observado para o kaempferol. O ácido elágico manteve-se estável entre os tratamentos sem tosta e tosta leve, com redução apenas na tosta moderada.

Esses comportamentos podem ser explicados pela degradação diferencial dos polímeros estruturais da madeira. A decomposição térmica ocorre em etapas, nas quais as hemiceluloses são as primeiras a se degradar, por volta de 200 °C, seguidas da celulose e da lignina, sendo esta última a mais termorresistente (Coelho et al., 2020; Kačíková et al., 2025). Como as dornas foram submetidas a 500 °C, a superfície interna atingiu regime de pirólise, no qual os compostos associados à fração hemicelulósica são liberados ou degradados rapidamente, enquanto os ligados à lignina respondem de forma mais gradual conforme o tempo de exposição aumenta.

Ressaltam-se as altas concentrações observadas para *A. cearensis*, com o ácido ferúlico apresentando valores próximos de 24 g L^{-1} (sem tosta). Trata-se de um perfil consistente com madeiras de extração intensa, que apresentam características sensoriais marcantes e que, por vezes, demandam a sua utilização associadas a madeiras mais inertes (Santiago et al., 2017; Cipriano, 2024).

Parâmetros físico-químicos

Os resultados dos parâmetros físico-químicos selecionados estão apresentados na Tabela 3 e na Figura 2. Todas as amostras atenderam aos limites estabelecidos pela Instrução Normativa nº 13/2005 do MAPA.

Tabela 3. Parâmetros físico-químicos das aguardentes em função da intensidade de tosta.

Parâmetro	Controle	Sem tosta	Tosta leve	Tosta moderada	Variação*
Extrato seco total (g L^{-1})	2,848	6,016	5,812	4,784	−20,5%
Cobre (mg L^{-1})	0,15	0,69	0,68	0,51	−26,1%
Acidez volátil (mg 100 mL^{-1} AA)	94,30	112,81	113,57	118,39	+4,9%
Aldeído acético (mg 100 mL^{-1} AA)	8,86	8,42	8,75	10,90	+29,5%
Furfural (mg 100 mL^{-1} AA)	2,25	2,39	2,41	3,46	+44,8%

*Variação percentual entre os tratamentos sem tosta e tosta moderada. AA: álcool anidro. Fonte: os autores (2026).

Diante dos resultados encontrados, delimitam-se duas tendências opostas: i) a primeira é a queda nos indicadores de extração. O extrato seco total, que reflete os sólidos incorporados da madeira, caiu 20,5% do tratamento sem tosta para a tosta moderada. Santiago et al. (2017) encontraram correlação muito forte entre fenólicos totais, extrato seco e intensidade de cor em cachaças armazenadas em amburana (r entre 0,997 e 1,000). O cobre seguiu o mesmo caminho, com redução de 26,1%; ii) a segunda é o aumento dos produtos de degradação térmica. O furfural apresentou maior efeito, com um aumento de 44,8%, comportamento que está relacionado à sua origem, uma vez que a tosta quebra os carboidratos da madeira e forma compostos furânicos (Coelho et al., 2020). O aldeído acético subiu 29,5% e a acidez volátil 4,9%, no mesmo sentido.

Tjeerdsma e Militz (2005) em seu estudo, mostram que essa liberação é proporcional à intensidade do tratamento térmico. Em temperatura baixa a desacetilação é apenas parcial, enquanto em temperatura alta a maior parte dos grupos acetil é fragmentada.

A comparação com a amostra controle confirma a incorporação de compostos do material lenhoso à bebida em todos os tratamentos: o contato com a madeira aumentou o extrato seco e o teor de cobre quando comparados à aguardente não armazenada.

Isso reforça que o aumento da intensidade de tosta reduz a concentração dos indicadores de extração da madeira. Em contrapartida, há o aumento na concentração dos compostos originados da degradação térmica dos constituintes da parede celular. Deste modo, observa-se que a tosta interna não faz a madeira transmitir mais ou menos compostos à bebida, e sim compostos de origens distintas, menos extrativos encontrados na madeira e mais produtos da pirólise do material lenhoso.

Conclusões

A intensidade de tosta aplicada às dornas de *A. cearensis* modificou significativamente o perfil de compostos fenólicos da aguardente armazenada, com comportamentos distintos em cada composto: diminuição do ácido protocatecuico já na tosta leve, aumento do ácido cafeico na tosta moderada e uma redução gradual dos ácidos ferúlico e elágico e do kaempferol.

Os parâmetros físico-químicos apresentaram o mesmo comportamento. Extrato seco total e cobre reduziram, enquanto furfural, aldeído acético e acidez volátil aumentaram, indicando que a tosta moderada reduz a transferência de extrativos da madeira e favorece a formação de produtos de pirólise.

Esses resultados mostram que intensificar a tosta em *A. cearensis* não aumenta a concentração dos compostos fenólicos na bebida. A escolha do nível de tosta deve considerar o

perfil sensorial pretendido, não o aumento dos compostos transferidos à bebida. Todas as amostras atenderam aos limites da legislação vigente.

Agradecimentos

Agradecemos à Universidade do Estado de Santa Catarina por fornecer a estrutura e possibilitar a execução do presente estudo. À Universidade Federal do Rio Grande do Sul pelo suporte e auxílio prestado e à Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação do Estado de Santa Catarina (FAPESC) pela concessão de bolsa durante a realização do estudo.

Referências bibliográficas

Bortoletto, A. M., & Alcarde, A. R. (2013). Congeners in sugar cane spirits aged in casks of different woods. Food Chemistry, 139(1-4), 695-701.

Bortoletto, A. M., & Alcarde, A. R. (2015). Assessment of chemical quality of Brazilian sugar cane spirits and cachaças. Food Control, 54, 1-6.

Brasil. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. (2005). Instrução Normativa n° 13, de 29 de junho de 2005. Aprova o Regulamento Técnico para Fixação dos Padrões de Identidade e Qualidade para Aguardente de Cana e para Cachaça. Diário Oficial da União.

Brasil. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. (2022). Instrução Normativa n° 539, de 26 de dezembro de 2022. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 27 dez. 2022. https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/instrucao-normativa-n-539-de-26-de-dezembro-de-2022-454255872

Cadahía, E., Muñoz, L., Fernández de Simón, B., & García-Vallejo, M. C. (2001). Changes in low molecular weight phenolic compounds in Spanish, French, and American oak woods during natural seasoning and toasting. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 49(4), 1790-1798.

Canas, S. (2017). Phenolic composition and related properties of aged wine spirits: Influence of barrel characteristics. A review. Beverages, 3(4), 55.

Castro, J. P. et al. (2015). Uso de espécies amazônicas para envelhecimento de bebidas destiladas: análises física e química da madeira. Cerne, 21(2), 319-326. https://doi.org/10.1590/01047760201521021567

Chatonnet, P., Cutzach, I., & Dubourdieu, D. (1999). Monitoring toasting intensity of barrels by chromatographic analysis of volatile compounds from toasted oak wood. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 47(10), 4310-4318. https://doi.org/10.1021/jf981234t

Cheng, Y., Xu, Q., Liu, J., Zhao, C., Xue, F., & Zhao, Y. (2014). Decomposition of five phenolic compounds in high temperature water. Journal of the Brazilian Chemical Society, 25(11), 2102-2107.

Cipriano, D. S. (2024). Propriedades químicas, físicas, anatômicas e tecnológicas de Amburana cearensis (Allemão) A.C. Smith visando a produção de recipientes para envelhecimento de cachaça [Tese de doutorado, Universidade de São Paulo]. Biblioteca Digital de Teses e Dissertações da USP. https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/11/11141/tde-05042024-114023/fr.php

Cipriano, R. R. (2024). Madeiras nativas brasileiras no envelhecimento de aguardente de cana-de-açúcar. Editora Universitária.

Coelho, E., Domingues, L., Teixeira, J. A., & Oliveira, J. M. (2020). Wine aging technology: fundamental role of wood barrels. Foods, 9(9), 1160.

Kačíková, D., Kubovský, I., Eštoková, A., & Kačík, F. (2025). Volatile organic compounds arising from wood polymers on thermal loading of spruce wood. Polymers, 17(7), 892.

Mallmann, L. P., Tischer, B., Vizzotto, M., Rodrigues, E., & Manfroi, V. (2020). Comprehensive identification and quantification of unexploited phenolic compounds from red and yellow araçá (Psidium cattleianum Sabine) by LC-DAD-ESI-MS/MS. Food Research International, 131, 108978. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2020.108978

Navarro, M. et al. (2016). Influence of the botanical origin and toasting level on the ellagitannin content of wines aged in new and used oak barrels. Food Research International, 87, 199-207. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2016.07.016

Ratkovich, N., Esser, C., de Resende Machado, A. M., Mendes, B. D. A., & Cardoso, M. D. G. (2023). The spirit of cachaça production: A comprehensive review of processes, flavor, contaminants, and quality improvement. Foods, 12(17), 3325.

Santiago, W. D., Cardoso, M. G., & Nelson, D. L. (2017). Cachaça stored in casks newly constructed of oak, amburana, jatobá, balsam and peroba: alcohol content, phenol composition, colour intensity and dry extract. Journal of the Institute of Brewing, 123(2), 232-241.

Tjeerdsma, B. F., & Militz, H. (2005). Chemical changes in hydrothermal treated wood: FTIR analysis of combined hydrothermal and dry heat-treated wood. Holz als Roh- und Werkstoff, 63(2), 102-111.

Wang, L., Chen, S., & Xu, Y. (2023). Distilled beverage aging: A review on aroma characteristics, maturation mechanisms, and artificial aging techniques. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 22(1), 502-534.

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Efeito da pirólise no rendimento e composição química de biochar de casca de cacau (*Theobroma cacao*)

Raquel Julia Cipriano dos Santos[1]; Angélica de Cássia Oliveira Carneiro[1]; Pedro Henrique Elias da Silva[1]; Danielle Moreira Gomes[1]; Bráulio da Silva de Oliveira[1]; Thaynara Silva Vieira[1]; Nicolle De Filippo Brumano[1]; Gabrielle Fialho Abranches[1]

[1] Universidade Federal de Viçosa (UFV)

Resumo: A casca de cacau é um resíduo agroindustrial com potencial para a produção de biochar, contribuindo para a valorização da biomassa e o armazenamento de carbono. Este trabalho avaliou o efeito da temperatura e do tempo de pirólise sobre o rendimento gravimétrico e a composição química imediata e elementar do biochar produzido a partir da casca do fruto do cacau. O aumento da temperatura reduziu o rendimento gravimétrico e os teores de materiais voláteis, enquanto elevou os teores de carbono fixo e carbono elementar e reduziu as razões atômicas H/C e O/C, indicando maior grau de aromatização. O tempo de residência apresentou menor influência sobre as propriedades do biochar. Conclui-se que o parâmetro de pirólise de 650 °C por 45 min proporcionou o melhor equilíbrio entre rendimento e qualidade do biochar, produzindo um material com razão H/C inferior a 0,4, indicativa de elevada estabilidade e potencial de armazenamento de carbono. A temperatura é o principal parâmetro na definição da qualidade do biochar, enquanto o menor tempo de residência favorece maior eficiência operacional.

Palavras-chave: Valorização de Resíduos; Economia Circular; Remoção de carbono.

Effect of pyrolysis on the yield and composition of cocoa pod husk biochar (*Theobroma cacao*)

Abstract: Cocoa pod husk is an agro-industrial residue with potential for biochar production, contributing to biomass valorization and carbon storage. This study evaluated the effects of pyrolysis temperature and residence time on the gravimetric yield and proximate and elemental composition of biochar produced from cocoa pod husk. Increasing the pyrolysis temperature reduced gravimetric yield and volatile matter content, while increasing fixed carbon and elemental carbon contents and decreasing the H/C and O/C atomic ratios, indicating a higher degree of carbonization. Residence time had a smaller influence on the biochar properties. The pyrolysis condition of 650 °C for 45 min provided the best balance between biochar yield and quality, producing a material with an H/C ratio below 0.4, indicative of high stability and carbon storage potential. Pyrolysis temperature was the main factor determining biochar quality, whereas the shorter residence time improved operational efficiency.

Keywords: Waste Valorization; Circular Economy; Carbon Removal.

1. Introdução

O cacau (*Theobroma cacao* L.) é uma cultura de grande relevância socioeconômica para as regiões tropicais. No Brasil, a produção foi estimada em 287,8 mil toneladas em 2024 (IBGE, 2024), posicionando o país como o sexto maior produtor mundial (ICCO, 2025). Entretanto, essa cadeia produtiva gera elevados volumes de resíduos, uma vez que até 80% da massa do fruto corresponde à biomassa residual (Meza-Sepúlveda *et al*., 2025). Para cada tonelada de amêndoas secas produzida, são geradas entre 8 e 10 toneladas de casca, cujo descarte inadequado favorece sua decomposição e a emissão de gases de efeito estufa, evidenciando a necessidade de alternativas sustentáveis para o aproveitamento desse resíduo.

No contexto das mudanças climáticas, a valorização de resíduos agroindustriais tem ganhado destaque por seu potencial de reduzir emissões e promover o sequestro de carbono. Nesse cenário, a Lei nº 15.042/2024, que instituiu o Sistema Brasileiro de Comércio de Emissões (SBCE), reforça o interesse por tecnologias de remoção de carbono. Entre essas alternativas, destaca-se a produção de biochar a partir de biomassas residuais, por agregar valor a um resíduo abundante e atuar como sumidouro de carbono de longa duração (Goldstein *et al*., 2020).

O biochar é um material carbonáceo obtido pela degradação térmica controlada de diferentes biomassas orgânicas, vegetais ou animais. Quando incorporado ao solo, melhora suas propriedades físico-químicas e biológicas, favorecendo a produtividade agrícola por meio da retenção de água e nutrientes, do aumento da capacidade de troca catiônica (CTC), do equilíbrio do pH e do estímulo à atividade microbiológica (Pandian *et al*., 2024). Suas características, entretanto, são influenciadas pelos parâmetros de pirólise, como temperatura e tempo de residência, bem como pela matéria-prima utilizada (Joseph *et al*., 2021) Entre os resíduos agroindustriais, a casca de cacau destaca-se pela elevada disponibilidade e composição lignocelulósica, promovendo a produção de biochars estruturalmente mais estáveis e com potencial para aplicações agrícolas e para o armazenamento de carbono (Anatachodwanit *et al*., 2025).

A conversão da casca de cacau em biochar representa uma alternativa promissora para o aproveitamento sustentável desse resíduo. Entretanto, características como o elevado teor de umidade e a rápida deterioração da casca após a colheita dificultam seu armazenamento, transporte e processamento (Ouattara *et al*., 2021). Assim, compreender a influência dos parâmetros de pirólise torna-se fundamental para otimizar a qualidade do biochar e ampliar seu potencial de aplicação. Diante desse contexto, este trabalho teve como objetivo avaliar o efeito da temperatura e do tempo de residência sobre o rendimento gravimétrico, a composição

química imediata e a composição química elementar do biochar produzido a partir da casca do fruto do cacau, visando otimizar os parâmetros de pirólise para a obtenção de um material de maior qualidade e com maior potencial de atuação como sumidouro de carbono.

2. Material e métodos

O experimento foi conduzido no Laboratório de Painéis e Energia da Madeira (LAPEM) do Departamento de Engenharia Florestal da Universidade Federal de Viçosa (DEF/UFV). Os resíduos de casca de cacau foram coletados no município de São Geraldo, Minas Gerais, e transportados ao laboratório. Inicialmente, o material passou por pré-secagem natural ao ar livre por três dias, seguida de secagem complementar em estufa a 50 °C até atingir teor de umidade em torno de 30% em base seca.

O resíduo de *Theobroma cacao* L. foi fragmentado (granulometria entre 50 e 8 mm) e seco em estufa a 103 ± 2 ºC até teor de umidade de 5% (base seca). As pirólises foram realizadas em triplicata, utilizando um reator elétrico de bancada do tipo mufla (GP Científica–2000). Para cada tratamento, cerca de 0,700 kg de biomassa seca foi inserida em um contêiner metálico de 0,011 m³, que posteriormente foi posicionado no interior da mufla. Foram avaliados nove parâmetros de pirólise, sendo três temperaturas finais (450, 550 e 650 °C) e três tempos de residência (45, 60 e 75 minutos), em três repetições. Durante o processo, os gases gerados foram direcionados a um condensador, para resfriamento, sendo coletados os gases condensáveis em um kitasato, enquanto os gases não condensáveis foram queimados externamente na saída do mesmo.

Após a pirólise, o biochar foi resfriado, pesado para determinação do rendimento gravimétrico (RG), calculado pela relação entre a massa seca de biochar obtida e a massa seca do resíduo utilizado, e posteriormente destinado às análises. O biochar obtido em cada tratamento foi caracterizado quanto à composição química imediata, por meio da determinação dos teores de materiais voláteis, cinzas e carbono fixo, conforme a norma ASTM D1762-84 (ASTM, 2021), sendo o teor de carbono fixo obtido por diferença. A composição química elementar foi determinada em analisador CHNS (Vario Micro Cube, Elementar®). Os teores de carbono, hidrogênio e nitrogênio foram determinados conforme a ISO 16948 (2015), enquanto o teor de enxofre foi determinado de acordo com a ISO 16994 (2016). Os teores de C, H, N e S foram corrigidos considerando e o teor de oxigênio foi obtido por diferença, considerando os teores de C, H, N, S e cinzas. As razões atômicas H/C e O/C foram calculadas a partir das

massas molares dos respectivos elementos, conforme as metodologias propostas pela Puro.earth (2025).

O experimento foi instalado segundo um delineamento inteiramente casualizado (DIC), em esquema fatorial 3 x 3, com três temperaturas de pirólise, três tempos de residência, em três repetições, totalizando 27 unidades amostrais. Os dados foram submetidos aos testes de Shapiro-Wilk (normalidade) e Bartlett (homogeneidade de variâncias). Atendidos os pressupostos, aplicou-se a análise de variância (ANOVA), e as médias foram comparadas pelo teste de Tukey a 5% de significância. Os dados foram processados e analisados nos softwares Microsoft Excel e R (RStudio).

3. Resultados e discussão

Na Figura 1 são apresentados os valores médios de rendimento gravimétrico dos biochar em função da temperatura de pirólise e do tempo de residência. A análise de variância indicou ausência de interação significativa entre os fatores, tendo apenas efeito isolado do tempo e da temperatura de pirólise.

Figura 1 - Rendimento gravimétrico do biochar de casca de cacau em função da temperatura de pirólise e do tempo de residência.
Médias seguidas pela mesma letra minúscula para temperatura e pela mesma letra maiúscula para tempo de residência não diferem entre si pelo teste de Tukey, a 5% de significância.

O incremento da temperatura de pirólise de 450 para 650 °C promoveu diminuição no rendimento gravimétrico de 41,33% para 36,53%. Segundo Loc e Phuong (2025), essa tendência decorre da maior degradação térmica da biomassa em temperaturas mais elevadas, reduzindo a fração sólida remanescente na forma de biochar. O prolongamento do tempo de residência também reduziu o rendimento, porém de maneira menos pronunciada, com diminuição de 39,38% aos 45 minutos para 38,18% aos 75 minutos. Esse comportamento pode estar associado à maior exposição da biomassa às condições de pirólise, favorecendo a continuidade das reações de decomposição e a liberação de compostos voláteis, com consequente redução da fração sólida remanescente. Do ponto de vista operacional, o tempo de residência de 45 minutos foi mais vantajoso por proporcionar maior rendimento gravimétrico e

reduzir o tempo de processamento. No entanto, a definição dos parâmetros de pirólise deve considerar também a qualidade do biochar, uma vez que temperaturas mais elevadas promovem alterações estruturais que influenciam suas propriedades físico-químicas e sua estabilidade (Joseph *et al.*, 2021).

Na Tabela 1 são apresentados os valores médios da composição química imediata dos biochars em função da temperatura de pirólise e do tempo de residência. A análise de variância indicou ausência de interação significativa entre os fatores, apenas efeito isolado. A temperatura influenciou significativamente os teores de materiais voláteis, cinzas e carbono fixo, enquanto o tempo de residência afetou apenas os materiais voláteis.

Tabela 1 – Valores médios da composição química imediata do biochar de casca de cacau em função da temperatura e do tempo de pirólise

Temperatura (°C)	**Tempo de Residência (minutos)**			
	45	**60**	**75**	**Média**
	Voláteis (%)			
450	28,8	27,6	27,53	27,98 a
550	24,57	24,22	23,66	24,15 b
650	22,26	22,07	21,73	22,02 c
Média	25,21 A	24,63 AB	24,31 B	
	Cinzas (%)			
450	22,29	23	23,54	22,94 c
550	23,64	23,96	23,93	23,84 b
650	24,53	24,95	24,66	24,71 a
Média	23,49	23,97	24,04	
	Carbono Fixo (%)			
450	48,9	49,41	48,94	49,08 c
550	51,79	51,83	52,41	52,01 b
650	53,21	52,98	53,62	53,27 a
Média	51,3	51,4	51,65	

Médias seguidas pela mesma letra minúscula entre as temperaturas e maiúscula entre os tempos de residência não diferem entre si a 5% de significância pelo teste de Tukey. Para carbono fixo e cinzas, não houve efeito significativo do tempo de residência pelo teste F.

A elevação da temperatura de pirólise promoveu redução do teor de materiais voláteis, de 27,98% para 22,02%, e aumento dos teores de carbono fixo, de 49,08% para 53,27%, e de cinzas, de 22,94% para 24,71%. Em relação ao tempo de residência, observou-se efeito apenas sobre os materiais voláteis, cujo teor diminuiu de 25,21% para 24,31%, sem alterações significativas nos teores de carbono fixo e cinzas. Dessa forma, a temperatura apresentou efeito

mais pronunciado sobre a composição química imediata do biochar, enquanto a influência do tempo de residência foi mais restrita.

A redução dos materiais voláteis com o aumento da temperatura de pirólise está associada à degradação dos componentes lignocelulósicos, principalmente hemiceluloses e celulose, favorecendo a conversão da matéria orgânica em gases condensáveis e não condensáveis e reduzindo a fração de compostos voláteis remanescentes no biochar, conforme descrito por Loc e Phuong (2025). Como consequência, ocorre o enriquecimento relativo da fração sólida, refletido no aumento do teor de carbono fixo, favorecido pela maior resistência térmica da lignina. Por ser degradada mais lentamente que as hemiceluloses e a celulose, a lignina permanece em maior proporção na fração sólida, e sua degradação envolve reações de condensação e reorganização estrutural que favorecem a formação de estruturas aromáticas mais condensadas, contribuindo para o aumento da estabilidade do biochar (Syguła *et al*., 2024; Joseph *et al*., 2021). Por outro lado, a concentração da fração mineral eleva o teor de cinzas que, por representar uma parcela da composição química imediata, restringe proporcionalmente a participação do carbono fixo.

O aumento do teor de cinzas decorre da concentração da fração mineral à medida que a matéria orgânica é decomposta durante a pirólise. Esse efeito é intensificado pelo elevado conteúdo mineral da casca de cacau, especialmente de potássio, cálcio, magnésio e fósforo (Ouattara *et al*., 2021). O aumento do teor de cinzas favorece a aplicação agrícola do biochar, uma vez que a fração mineral promove o aporte de nutrientes ao solo, contribuindo para a melhoria da fertilidade. Nesse contexto, Mwafulirwa *et al*. (2024) observaram que a aplicação de biochar de casca de cacau contribuiu para o aumento da disponibilidade de nutrientes e para melhorias nas propriedades químicas do solo, especialmente em solos ácidos. Além disso, essa fração contribui para a elevação do pH, o aumento da capacidade de troca catiônica e da disponibilidade de nutrientes no solo, ampliando o potencial agronômico do biochar (Pandian *et al*., 2024).

Na Tabela 2 são apresentados os valores médios da composição química elementar dos biochars da casca de cacau produzidos sob diferentes temperaturas de pirólise e tempos de residência. A análise de variância indicou interação significativa para os teores de carbono, enxofre e oxigênio, enquanto o hidrogênio apresentou apenas efeito da temperatura e o nitrogênio não foi influenciado pelos fatores avaliados.

Tabela 2 – Valores médios da composição elementar (C, H, N, S e O) dos biochars da casca do cacau produzidos sob diferentes parâmetros de pirólise

Parâmetros de pirólise		**Composição Química Elementar**				
Temperatura (°C)	**Tempo (min)**	**C (%)**	**H (%)**	**N (%)**	**S (%)**	**O (%)**
450	45	49,66 Aab	2,55 a	0,89	0,135 Ba	24,49 Ca
	60	47,71 Bc	2,33 a	0,88	0,105 Bb	25,98 Ba
	75	46,57 Cb	2,21 a	0,87	0,200 Aab	26,61 Aa
550	45	49,87 Aa	1,74 b	0,84	0,130 Aa	23,80 Cb
	60	48,06 Cb	1,76 b	0,79	0,150 Aa	25,28 Ab
	75	48,69 Ba	1,72 b	0,8	0,170 Ab	24,69 Bb
650	45	49,55 Ab	1,26 c	0,82	0,150 Ba	23,69 Ab
	60	49,16 Ba	1,27 c	0,79	0,135 Bab	23,70 Ac
	75	48,98 Ba	1,19 c	0,78	0,220 Aa	24,18 Ac

C = carbono; H = hidrogênio; N = nitrogênio; S = enxofre; O = oxigênio. Letras maiúsculas comparam os tempos de residência dentro de cada temperatura, e letras minúsculas comparam as temperaturas dentro de cada tempo de residência. Médias seguidas pelas mesmas letras não diferem entre si pelo teste de Tukey, a 5% de significância. Para H, apenas a temperatura apresentou efeito significativo. Para N, não houve efeito significativo pelo teste F.

A composição química elementar mostrou que a elevação da temperatura de pirólise promove modificações na estrutura do biochar, caracterizadas pelo aumento do teor de carbono e pela redução do teor de hidrogênio, enquanto os teores de nitrogênio, enxofre e oxigênio apresentaram menores variações entre os tratamentos. Esse comportamento indica um biochar mais carbonizado e com maior grau de aromatização, resultado da reorganização estrutural promovida pelas reações de pirólise (Loc & Phuong, 2025). Ainda que o teor de carbono tenha aumentado entre 450 e 550 °C, verificou-se a tendência de estabilização a 650 °C. Esse resultado pode ser atribuído ao aumento da fração mineral do biochar, associado ao aumento do teor de cinzas (Joseph *et al*., 2021).

Na Figura 2 é apresentado o diagrama de Van Krevelen, que ilustra a distribuição das razões atômicas H/C e O/C dos biochars da casca de cacau produzidos sob diferentes parâmetros de pirólise.

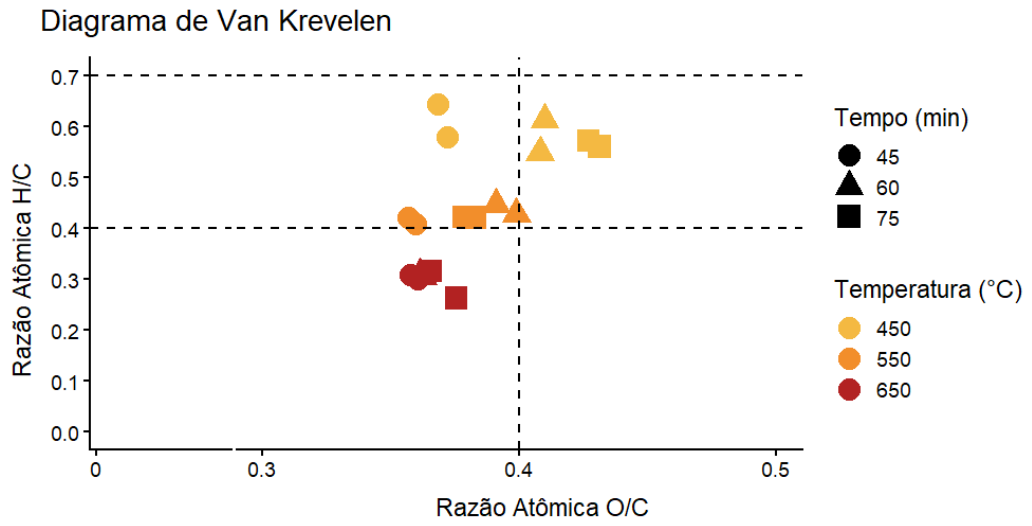


Figura 2 - Diagrama de Van Krevelen dos biochars de casca de cacau produzidos em diferentes parâmetros de pirólise, comparando as razões atômicas de H/C e O/C.

No diagrama de Van Krevelen observa-se a redução das razões atômicas H/C e O/C com o aumento da temperatura de pirólise. Esse comportamento confirma as alterações estruturais discutidas anteriormente, refletindo a eliminação de grupos funcionais oxigenados e hidrogenados e a formação de estruturas aromáticas mais condensadas (Loc & Phuong, 2025). Essas transformações resultam em biochars recalcitrantes, quimicamente estáveis e com maior potencial de permanência no ambiente, conforme discutido por Petersen e Sanei (2025).

Os biochars produzidos a 650 °C apresentaram as menores razões H/C e O/C, independentemente do tempo de residência, evidenciando maior grau de carbonização e estabilidade em relação aos obtidos a 450 e 550 °C. Embora o aumento do tempo de residência tenha promovido pequenas reduções nessas razões, seu efeito foi menos pronunciado que o da temperatura. Considerando os critérios de qualidade para biochars destinados ao sequestro de carbono, todos os tratamentos atenderam ao limite de H/C < 0,7 estabelecido pela Puro.earth (2025), enquanto a maioria apresentou razão O/C inferior a 0,4, conforme recomendado pelo *European Biochar Certificate* (EBC, 2022). Destaca-se o biochar produzido a 650 °C por 45 min, que conciliou elevada estabilidade, indicada pela razão H/C inferior a 0,4, e maior rendimento gravimétrico entre os tratamentos produzidos nessa temperatura. Essa combinação resulta em biochars com elevada fração de carbono aromático persistente (*Persistent Aromatic Carbon* – PAC), que se associa ao potencial de permanência e armazenamento do carbono no solo por milênios (Petersen & Sanei, 2025).

4. Conclusões

A temperatura de pirólise foi o principal fator responsável pelas alterações nas características do biochar de casca de cacau, reduzindo o rendimento gravimétrico, os teores de materiais voláteis e as razões H/C e O/C e elevando os teores de cinzas e carbono fixo, resultando em biochars com maior grau de carbonização e recalcitrância. O tempo de residência exerceu menor influência, afetando principalmente o rendimento gravimétrico e os materiais voláteis, sendo 45 min o tempo de residência mais vantajoso por proporcionar maior rendimento e menor tempo de processamento. Entre os parâmetros avaliados, a pirólise a 650 °C por 45 min proporcionou o melhor equilíbrio entre rendimento e qualidade do biochar, produzindo um material com estabilidade, razão H/C inferior a 0,4 e elevado potencial para atuar como sumidouro de carbono.

5. Agradecimentos

Ao Departamento de Engenharia Florestal (DEF), ao Laboratório de Painéis e Energia da Madeira (LAPEM) e à Universidade Federal de Viçosa (UFV) pela infraestrutura e pelo suporte concedidos. À SIF, à EMBRAPII Unidade Fibras Florestais, à CAPES, à FAPEMIG (Projetos APQ-05311-24 e APQ-04599-25) e ao CNPq (Processo nº 444395/2024-5) pelo apoio à realização desta pesquisa. À GRS Soluções Sustentáveis e ao Claudenir Simas Pereira pela idealização do projeto e pelo apoio à pesquisa.

6. Referências bibliográficas

Anatachodwanit, A., Sirisuk, A., & Wongsiri, S. (2025). Upcycled cocoa pod husk: A sustainable source of functional ingredients. Life, 15(7), 1126. https://doi.org/10.3390/life15071126

American Society for Testing and Materials. (2021). *ASTM D1762-84(2021): Standard test method for chemical analysis of wood charcoal*. ASTM International.

Carbon Standards International. (2024). European Biochar Certificate: Guidelines for a sustainable production of biochar (Version 10.4E). https://www.european-biochar.org

Goldstein, A., Turner, W. R., Spawn, S. A., Donofrio, S., Hole, D. G., & Gibbs, H. K. (2020). Protecting irrecoverable carbon in Earth's ecosystems. Nature Climate Change, 10(4), 287–295. https://doi.org/10.1038/s41558-020-0738-8

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. (2024). Levantamento sistemático da produção agrícola. https://www.ibge.gov.br

International Cocoa Organization. (2025). Quarterly bulletin of cocoa statistics (Vol. 51, No. 2). https://www.icco.org/wp-content/uploads/Production_QBCS-LI-No.-2.

International Organization for Standardization. (2015). ISO 16948:2015. Solid biofuels—Determination of total content of carbon, hydrogen and nitrogen. ISO.

International Organization for Standardization. (2016). ISO 16994:2016. Solid biofuels—Determination of total content of sulfur and chlorine. ISO.

Joseph, S., Cowie, A. L., Van Zwieten, L., Chia, C. H., Lehmann, J., Munroe, P., & Lin, Y. (2021). How biochar works, and when it doesn't: A review of mechanisms controlling soil and plant responses. GCB Bioenergy, 13(11), 1731–1764. https://doi.org/10.1111/gcbb.12885

Loc, N. X., & Phuong, D. T. M. (2025). Optimizing biochar production: A review of recent progress in lignocellulosic biomass pyrolysis. Frontiers of Agricultural Science and Engineering, 12(1), 148–172. https://doi.org/10.15302/J-FASE-2024597

Meza-Sepúlveda, D. C., Chaurán, J. A., Castro, J. I., Torregrosa, A., & Velásquez, J. A. (2025). Biocomposite film formulated with cellulose extracted from cocoa pod husk. Cellulose, 32, 7591–7602. https://doi.org/10.1007/s10570-025-06642-4

Mwafulirwa, L., Sizmur, T., Daymond, A., Atuah, L., Quaye, A. K., Coole, S., Robinson, S., Hammond, J., Awudzi, G., Awunyo-Vitor, D., Domfeh, O., & Hadley, P. (2024). Cocoa pod husk-derived organic soil amendments differentially affect soil fertility, nutrient leaching, and greenhouse gas emissions in cocoa soils. Journal of Cleaner Production, 479, 144065. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.144065

Oginni, O., & Singh, K. (2020). Influence of high carbonization temperatures on microstructural and physicochemical characteristics of herbaceous biomass derived biochars. Journal of Environmental Chemical Engineering, 8(5), 104169. https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.104169

Ouattara, L. Y., Kouassi, E. K., & Soro, D. (2021). Cocoa pod husks as potential sources of renewable high-value-added products: A review of current valorizations and future prospects. BioResources, 16(1), 1988–2020. https://doi.org/10.15376/biores.16.1.1988-2020

Pandian, K., Vijayakumar, S., Mustaffa, M. R. A. F., Subramanian, P., & Chitraputhirapillai, S. (2024). Biochar – a sustainable soil conditioner for improving soil health, crop production and environment under changing climate: A review. Frontiers in Soil Science, 4, 1376159. https://doi.org/10.3389/fsoil.2024.1376159

Petersen, H. I., & Sanei, H. (2025). The H/C molar ratio and its potential pitfalls for determining biochar's permanence. GCB Bioenergy, 17(6), e70049. https://doi.org/10.1111/gcbb.70049

Puro.earth. (2025). Puro Standard: Biochar methodology (Version 4.1). https://puro.earth/methodologies/biochar/

Syguła, E., Ciolkosz, D., & Białowiec, A. (2024). The significance of structural components of lignocellulosic biomass on volatile organic compounds presence on biochar: A review. Wood Science and Technology, 58, 859–886. https://doi.org/10.1007/s00226-024-01557-y

EFEITO DO PRÉ-TRATAMENTO COM SOLVENTE ORGÂNICO NA DESLIGNIFICAÇÃO DE RESÍDUOS LIGNOCELULÓSICOS PARA A PRODUÇÃO DE ETANOL 2G

Beatriz Do Carmo Corrêa Lima[1], Iara Assunção dos Santos Souza[2], Pedro Venâncio Wate[1], Fábio Akira Mori[1], João Moreira Neto[2]

[1] Departamento de Ciências Florestais (UFLA), Lavras, MG, Brasil
[2] Departamento de Engenharia Química e Materiais (UFLA), Lavras, MG, Brasil.

RESUMO: A produção de etanol de segunda geração destaca-se como uma alternativa promissora para a redução do uso de combustíveis fósseis e das emissões de gases de efeito estufa. Nesse contexto, este trabalho teve como objetivo desenvolver um método eficiente de desestruturação da biomassa lignocelulósica da casca de *Eucalyptus* visando sua aplicação na produção de bioetanol. A biomassa foi submetida ao pré-tratamento organossolv em reator batelada (300 mL), utilizando solução etanol/água (50% v/v) e razão sólido-líquido de 1:10 (m/v), sob diferentes condições de temperatura e tempo. Após o pré-tratamento, foram obtidas uma fração sólida rica em celulose e uma fração líquida (licor negro) contendo lignina e hemiceluloses. A biomassa, in natura e pré-tratada, foi caracterizada quanto ao teor de lignina total, lignina Klason, lignina solúvel e grau de deslignificação. Os resultados indicaram que a condição de 190 °C por 30 minutos foi a mais eficiente, evidenciando a temperatura como principal variável do processo.

Palavras-chave: biomassa lignocelulósica; pré-tratamento organosolv; deslignificação.

EFFECT OF ORGANIC SOLVENT PRETREATMENT ON THE DELIGNIFICATION OF LIGNOCELLULOSIC RESIDUES FOR 2G ETHANOL PRODUCTION

ABSTRACT: The production of second-generation ethanol stands out as a promising alternative for reducing the use of fossil fuels and greenhouse gas emissions. In this context, this study aimed to develop an efficient method for the deconstruction of *Eucalyptus* bark lignocellulosic biomass for application in bioethanol production. The biomass was subjected to

organosolv pretreatment in a batch reactor (300 mL), using an ethanol/water solution (50% v/v) and a solid-to-liquid ratio of 1:10 (w/v), under different temperature and time conditions. After pretreatment, a cellulose-rich solid fraction and a liquid fraction (black liquor) containing lignin and hemicelluloses were obtained. The biomass, both *in natura* and pretreated, was characterized regarding total lignin, Klason lignin, soluble lignin content, and degree of delignification. The results indicated that the condition of 190 °C for 30 minutes was the most efficient, highlighting temperature as the main process variable.

Keywords: lignocellulosic biomass; organosolv pretreatment; delignification;

1. INTRODUÇÃO

A crescente demanda por fontes energéticas sustentáveis tem impulsionado o desenvolvimento de rotas tecnológicas para a produção de biocombustíveis a partir de biomassa lignocelulósica. No Brasil, segundo dados da IEA (2024).36% da energia total do país é proveniente de Petróleo e derivados, e cerca de 33% de biocombustíveis e resíduos.

As preocupações relacionadas às transições energéticas nos âmbitos ambiental, social, político e de segurança energética têm impulsionado o interesse pela busca de novas fontes de energia alternativas, como o bioetanol, que se apresenta como uma alternativa promissora aos combustíveis fósseis (BRODA et al., 2022).

Segundo (BELUHAN *et al.*, 2023) a biomassa lignocelulósica apresenta um custo relativamente baixo, sendo uma matéria-prima adequada para a produção de bioetanol devido ao seu alto teor de carboidratos sua composição consiste principalmente em celulose (30–50%), hemiceluloses (20–40%) e lignina (20– 30%). Sua composição de carboidratos varia de acordo com a origem da biomassa. Entretanto devido a sua estrutura complexa e recalcitrante a biomassa necessita-se ser submetida a condições de pré-tratamento.

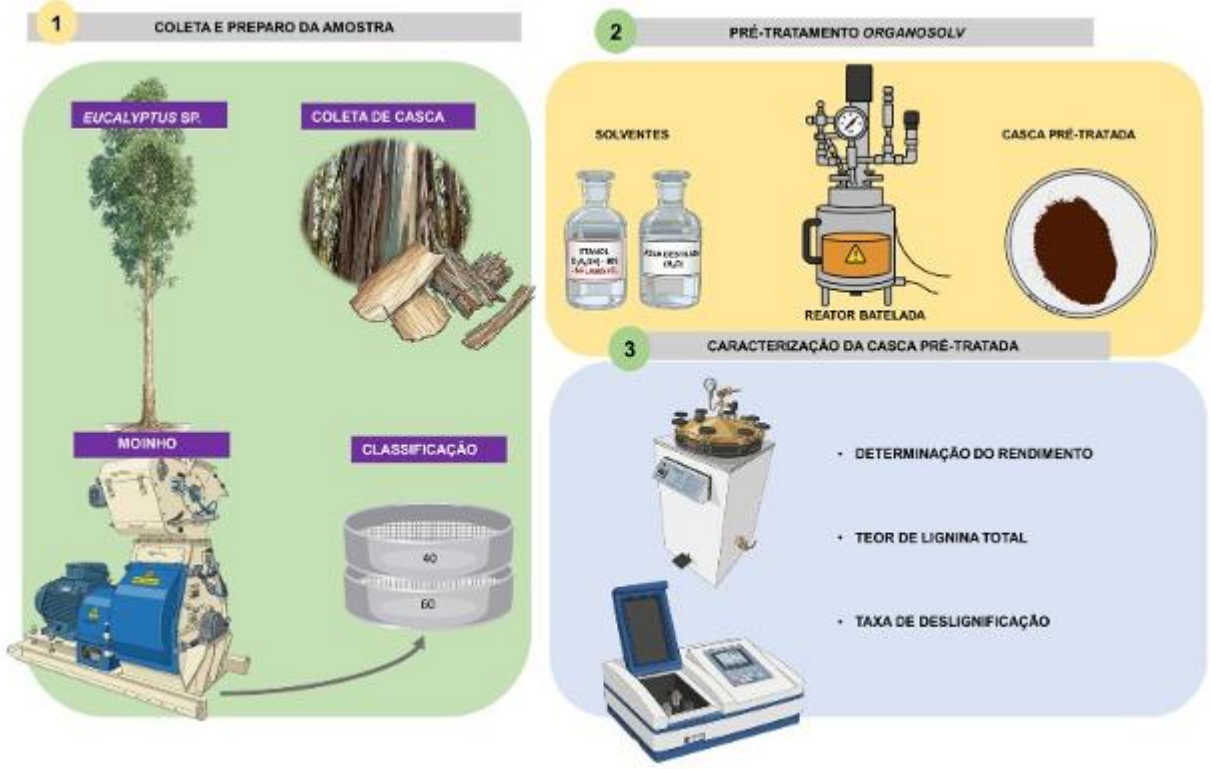
O pré-tratamento é uma das etapas mais críticas na conversão da biomassa lignocelulósica em bioprodutos, e a eficiência do pré-tratamento é crucial para a obtenção de um maior rendimento do produto. O pré-tratamento *organosolv* surge como uma alternativa bastante eficaz na remoção de lignina com alta eficiência, recuperando cerca de 90% dos açúcares da biomassa (BELUHAN *et al.*, 2023).

Diante disso, o objetivo deste trabalho busca avaliar as melhores condições de operação adequada para o pré tratamento *organosolv* visando a remoção do maior percentual de lignina para a produção de bioetanol, além de avaliar quais parâmetros influenciam no processo de deslignificação

2. METODOLOGIA

Para a execução da pesquisa, a metodologia foi dividida em três partes: coleta e preparo da amostra, pré-tratamento *organosolv* e caracterização da casca pré-tratada explicitado na Figura 1.

Figura 1. Fluxograma da metodologia empregada no estudo



Fonte: Autores (2026)

2.1. Coleta e preparação da biomassa

As cascas de *Eucalyptus* sp. foram coletadas em um plantio de experimental, com 20 anos de idade, localizado no campus da Universidade federal de Lavras, Minas Gerais. Foram feitas 20 coletas em árvores aleatórias com DAP de 28 a 32cm. A retirada das cascas foi feita com auxílio de um facão, ao longo do tronco, até altura de 1,70 cm. O material foi inicialmente seco ao ar livre, moído em moinho de martelo e peneiradas em granulometria de 40 ~ 60 mesh, e armazenadas em sacos plásticos.

2.2. Pré tratamento

Para o presente projeto, foi realizado um planejamento experimental fatorial do tipo 2^2, no qual foram avaliados dois fatores em dois níveis, com a inclusão de um ponto central.

O pré-tratamento *organosolv* foi realizado em reator batelada com volume de 300 mL, sob agitação e pressão. Foram utilizados 20 gramas de biomassa com granulometria entre 40- 60 mesh, preparada em uma solução composta por 50% (v/v) de etanol e água, totalizando 200,0 mL. As temperaturas de pré-tratamento avaliadas foram de 150 °C, 170 °C e 190 °C, com tempos de reação de 30, 60 e 90 minutos, sendo as condições 170°C e 60min o ponto central (Romani *et al., 2019;* Rabelo *et al., 2023).* Após o término do processo, o reator foi aberto e a fração sólida foi submetida à lavagem com solução de NaOH (1% p/p), sob agitação magnética por 1 hora, visando à remoção de resíduos do reagente.

2.3. Rendimento da Biomassa Pré-tratada

Após a lavagem da fase sólida, a casca seca foi posteriormente colocada em estufa circular e pesada. O rendimento da biomassa foi determinado através da Equação (1):

$$\%R = \left(\frac{Mf}{Mi}\right) * 100$$

Onde: Mf: Massa final seca da biomassa após o pré-tratamento(g); Mi: Massa inicial da biomassa seca(g); R: Rendimento

2.4. Teor de Lignina total e Deslignificação

A determinação do teor de lignina total foi feita seguindo as metodologias de análises de Teor de Lignina solúvel (TAPPI UM 250) e Teor de Lignina Klason(TAPPI T22 om-88), onde, a partir da soma dos teores, foi possível determinar a Lignina tota pela Equação (2):

$$Lignina\,Total\,(\%) = Lignina\,Klason\,(\%) + Lignina\,Solúvel\,(\%)$$

Após determinação das quantidades de lignina solúvel, insolúvel e o rendimento da biomassa, foi determinado a porcentagem de deslignificação da casca pré-tratada, calculada a partir da Equação (3):

$$Deslignificação\,(\%) = \left(\frac{LKb}{LKpt}\right) * 100$$

Onde: LKb= Lignina Klason Biomassa *in natura;* LKpt=Lignina Klason Biomassa pré-tratada

2.5. Severidade

A severidade é um parâmetro importante, pois descreve a solubilização de hemiceluloses e lignina de uma biomassa após pré-tratamento. Para analisar os fatores tempo e temperatura para cada condição, o cálculo da severidade foi feito seguindo a equação estabelecida por Overend e Chornet (1987).

2.6. Análise estatística

A análise de Variância (ANOVA) foi realizada com o auxílio do software Statistica 7, com o objetivo de avaliar os efeitos principais e as interações entre as variáveis do processo.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Tabela 1 – Condições experimentais e resultados do processo de pré-tratamento

Ensaios	Temperatur	Tempo	Severidade	Rendiment	Lignina	Deslignificação

	a (°C)	**(min)**		**o (%)**	**Total**	**(%)**
in natura	-	-	-	-	**5,59**	-
1	150	30	3,22	77	4,77	14,74
2	150	90	3,38	72,9	4,42	20,94
3	170	60	3,94	55,7	3,32	40,69
4	170	60	3,94	55,05	2,86	48,79
5	170	60	3,94	60,15	2,72	**51,43**
6	190	30	4,26	52,55	**2,84**	49,25
7	190	90	4,63	51,4	3,41	38,95

O experimento foi conduzido em duplicatas ao longo de todo o processo

Na tabela 1 observou-se que o rendimento da biomassa após o pré-tratamento *organosolv* reduziu-se conforme o aumento da temperatura e do tempo de reação. Enquanto para os pré-tratamentos mais severos como o ensaio 7, este valor foi reduzido para 10,63g de componentes/20 g de casca, demonstrando a eficácia do pré-tratamento para o processo. Foi possível observar também na Tabela 1 que para ensaios mais severos o teor de lignina total, foi reduzida de 5,59 g para cerca de 2,8 g. A Tabela 1 também demonstra a influência da severidade das condições do pré-tratamento *organosolv* na seletividade do processo. Demonstrou-se que o aumento da temperatura e do tempo resultou em maior porcentagem de deslignificação. A eficiência na remoção dos componentes da biomassa, ficou evidenciada pelo aumento da temperatura.

O maior rendimento de deslignificação obtido neste estudo foi de 51,43%, correspondente às condições do ensaio 5, sofrendo um aumento de 36,69% em relação ao ensaio mais brando (ensaio 1). Embora inferior ao valor de 63% reportado por YAÑEZ et al. (2014), essa diferença pode estar associada a variações nas condições operacionais, como temperatura e tempo de reação, além de possíveis diferenças na composição da biomassa. Ainda assim, o resultado indica que o pré-tratamento *organosolv* foi eficaz na remoção de lignina, demonstrando potencial para aplicação em processos de produção de etanol de segunda geração.

Além disso, o ensaio 6 se destaca como uma condição ótima no processo de deslignificação, apresentando um equilíbrio entre a remoção de hemiceluloses e a eficiência na deslignificação **(49,25%)**.

4. Erro! Vínculo não válido.CONCLUSÕES

A partir dos resultados obtidos, foi possível demonstrar a eficiência do pré-tratamento *organosolv* na atuação da solubilização dos compósitos indesejáveis. Sendo possível observar também como a temperatura e o tempo de reação influenciam na severidade do processo e na deslignificação da biomassa auxiliando na percepção de qual condição seria mais indicada para melhorar as características da biomassa, a fim de maximizar a produção do bioetanol.

Uma alternativa promissora para otimizar o pré-tratamento é a utilização de catalisadores, os quais podem reduzir a necessidade de condições mais severas e tempos prolongados de reação. Nesse contexto, o presente estudo evidencia o potencial da casca de *Eucalyptus* como uma biomassa promissora para a exploração de novas rotas tecnológicas voltadas à produção de bioetanol.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão da bolsa. A Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) pelo financiamento do projeto “APQ-00826-23”, conforme Termo de Outorga FAPEMIG/DAP n0 74138696/2023. Ao Programa de Ciência e Tecnologia da Madeira pela oportunidade de desenvolvimento da pesquisa. A Universidade Federal de Lavras (UFLA), pela concessão de espaço para o desenvolvimento da pesquisa.

REFERÊNCIAS

BELUHAN, Sunčica; MIHAJLOVSKI, Katarina; ŠANTEK, Božidar; IVANČIĆ ŠANTEK, Mirela. The production of bioethanol from lignocellulosic biomass: pretreatment methods, fermentation, and downstream processing. *Energies*, v. 16, n. 19, p. 7003, 2023.DOI: https://www.mdpi.com/1996-1073/16/19/7003

BRODA, Magdalena; YELLE, Daniel J.; SERWAŃSKA, Katarzyna. Produção de bioetanol a partir de biomassa lignocelulósica: desafios e soluções. *Molecules*, v. 27, n. 24, p. 8717, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/molecules27248717>

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. *Brazil: Energy mix*. Paris: IEA, [s.d.]. Disponível em: https://www.iea.org/countries/brazil/energy-mix.

MARTINS, Luiza Helena da Silva. *Avaliação de diferentes pré-tratamentos do bagaço de cana-de-açúcar considerando altas cargas de sólidos*. 2015. 228 f. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Química, Campinas, 2015.Disponível em: <https://doi.org/10.47749/T/UNICAMP.2015.952323>.

RABELO, S. C. et al. Organosolv pretreatment of lignocellulosic biomass for biorefineries: A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 177, art. 113– 122, 2023. DOI: 10.1016/j.rser.2023.113222.

ROMANÍ, A. et al. Valorization of Eucalyptus nitens bark by organosolv pretreatment for the production of advanced biofuels. Industrial Crops and Products, v. 132, p. 327-335, jun. 2019. DOI: 10.1016/j.indcrop.2019.02.040.

TAPPI – TECHNICAL ASSOCIATION OF THE PULP AND PAPER INDUSTRY. UM 250: Sampling and preparing wood for analysis. Atlanta: TAPPI Press, [s.d.].

TAPPI – TECHNICAL ASSOCIATION OF THE PULP AND PAPER INDUSTRY. T 222 om-88: Acid-insoluble lignin in wood and pulp. Atlanta: TAPPI Press, 1988.

YAÑEZ, M., MATSUHIRO, B., NUÑES, P., S. , HUBBELL, C. A., SANNIGRAHI, P. & RAGAUSKAS, A. J. Physicochemical Characterization of Ethanol Organosolv Lignin (Eol) from Eucalyptus Globulus: Effect of Extraction Conditions on the Molecular Structure. Polymer Degradation and Stability, v. 110, p. 184-194, 2014. https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2014.08.026

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Efeito do tempo de armazenamento nas propriedades floculantes do tanino de *Terminalia catappa*

Wilkally Críslian Laynne de Moura[1]; Elaine Cristina Alves da Silva [1]; José Ricardo Souza da Silva[1]; Kedma Carla Santana do Nascimento[1]; Denys Santos de Souza[1]; Kayo Lucas Batista de Paiva[1]; Paula Evanyn Pessoa do Nascimento[1]; Tatiane Kelly Barbosa de Azevêdo [1]

[1] Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN)

Resumo: Este estudo teve como objetivo avaliar o uso de taninos da casca da castanhola (*Terminalia catappa*) como coagulantes no tratamento de água, de acordo com seu tempo de armazenamento. Coletaram-se cascas em Macaíba-RN, que passaram por secagem, moagem e extração em água a 70 °C. O extrato seco foi modificado pela reação de Mannich e armazenado em recipiente escuro em temperatura ambiente. Os testes ocorreram em Jar Test (dose de 150 mg/L), avaliando turbidez e pH nos tempos de 0, 3, 6 e 9 meses. No início, o tanino reduziu a turbidez para 3,37 NTU, mostrando boa eficiência na limpeza e mantendo a alcalinidade da água. Porém, notou-se a perda da capacidade de coagulação com o passar dos meses. Os resultados indicam estabilidade e alta eficiência até o terceiro mês, seguidas por uma acentuada queda na capacidade de clarificação entre o sexto e o nono mês, embora o pH tenha se mantido estável. Conclui-se que os taninos de *T. catappa* são opções ecológicas eficientes para o tratamento de água, mas precisam de controle do tempo de prateleira para definir sua validade na indústria.

Palavras-chave: Tratamento de água; Tempo de prateleira; Clarificação.

Effect of storage time on the flocculating properties of *Terminalia catappa* tannin

Abstract: This study evaluated the use of tannins from the bark of the tropical almond (*Terminalia catappa*) as coagulants in water treatment, based on their storage time. Bark was collected in Macaíba-RN, followed by drying, grinding, and water extraction at 70 °C. The dry extract was modified by the Mannich reaction and stored in a dark container at room temperature. Tests were performed in a Jar Test (150 mg/L dose), evaluating turbidity and pH at 0, 3, 6, and 9 months. Initially, the tannin reduced turbidity to 3.37 NTU, showing good cleaning efficiency and maintaining water alkalinity. However, a loss of coagulation capacity was noted over the months. During the 9 months, the product changed its efficiency, with a drop in clearing capacity between the sixth and ninth month, but without altering the pH. It is concluded that *T. catappa* tannins are good ecological options, but need shelf life control to define their validity in industry.

Keywords: Water treatment; Shelf life; Clarification.

1. Introdução

A busca por novas alternativas para o tratamento de água tem crescido devido à necessidade de água potável e à pressão sobre os rios e lagos. Nesse cenário, as etapas de coagulação e floculação são muito importantes nas Estações de Tratamento de Água (ETAs), pois ajudam a juntar a sujeira, diminuir a água turva e retirar a matéria orgânica, processos básicos para deixar a água própria para o uso humano (Bratby, 2016).

Normalmente, essas etapas utilizam produtos minerais, como o cloreto férrico e o sulfato de alumínio, por causa do seu bom resultado na remoção de partículas. Mas o uso contínuo desses materiais inorgânicos produz muito lodo metálico, muda bastante o pH da água e pode trazer riscos à saúde pelo alumínio que sobra. Esses fatores motivam a busca por opções mais naturais (Choy et al., 2014; Yin, 2010). Entre as alternativas estudadas, destacam-se os coagulantes feitos de plantas ricas em taninos.

A planta *Terminalia catappa L.*, conhecida como castanhola, tem se mostrado útil pela presença de taninos em suas folhas e cascas, além de ser fácil de encontrar no Brasil. Isso faz dela um material interessante para criar produtos voltados à limpeza da água (Lin et al., 2001). Como demonstrado recentemente por Silva et al. (2025), o uso de taninos cationizados extraídos da casca dessa espécie, desenvolvidos no âmbito acadêmico regional, apresenta excelente desempenho inicial como coagulante natural no tratamento de águas.

Depois de ser extraído, sabe-se que o tanino pode perder o efeito com o passar do tempo. Vários fatores afetam o uso dos taninos, como o armazenamento por muitos meses. Entender isso é uma parte essencial para saber se o produto pode ser usado na prática e qual é a sua validade.

Este estudo teve como objetivo avaliar o comportamento e a estabilidade temporal do coagulante extraído da casca da castanhola (*Terminalia catappa*) ao longo do seu armazenamento.

2. Material e métodos

A pesquisa usou cascas tiradas do tronco de cinco castanholas (*Terminalia catappa*) na cidade de Macaíba-RN, através de técnicas de coleta que não prejudicaram a saúde das árvores.

O solo da região é o Latossolo Amarelo de textura arenosa (Beltrão et al., 1975), e o clima é tropical chuvoso, tipo As e BSw pela classificação de Köppen. O município tem temperatura média anual de 27,1 °C, umidade de 76% e chuvas entre 863,7 e 1.070,7 mm (IDEMA, 2013).

Após a coleta, as cascas foram secas em estufa, moídas e guardadas. Para obter o extrato, 30 g da casca moída foram colocadas em béqueres com 300 mL de água destilada, sendo aquecidas em banho-maria a 70 °C por 3 horas. Depois, a mistura foi passada em uma peneira fina (200 mesh). A parte sólida que sobrou passou por uma segunda extração igual. Os líquidos das duas partes foram misturados e secos para formar o tanino em pó.

Para preparar o coagulante, o extrato passou pela reação de Mannich, usando a base de Konrath e Fava (2006). Aqueceu-se 5,4 g de cloreto de amônio com 24,4 g de formaldeído a 80 °C em um balão de vidro por 2 horas, até a cor amarela ficar transparente. A esse líquido, adicionou-se 28,0 g de uma mistura de água e tanino a 50%, mexendo por 30 minutos a 60 °C. No final, colocou-se 0,2 g de monoetanolamina, deixando a reação por mais 3 horas a 50 °C.

Os testes de coagulação foram feitos no Laboratório de Produtos Florestais Não Madeireiros, usando amostras de água coletadas na Universidade Federal do Rio Grande do Norte, campus Escola Agrícola de Jundiaí. Para testar o produto ao longo do tempo, aplicou-se a dose de 150 mg/L do tanino, que foi guardado em diferentes tempos de prateleira (0, 3, 6 e 9 meses). As avaliações ocorreram em um aparelho Jar Test com cubas de 1 L de água, com agitação rápida de 130 rpm por 2 minutos, e depois agitação lenta de 35 rpm por 10 minutos. Depois de 1 hora de descanso, amostras do meio de cada cuba foram retiradas para medir a turbidez (NTU) e o pH.

Os dados foram submetidos a Análise de Variância (ANOVA) de dois fatores (tempo de prateleira x tempo de sedimentação), seguida pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade, para avaliar o efeito do tempo de prateleira e do tempo de sedimentação.

3. Resultados e discussão

Os taninos da casca da *Terminalia catappa* mostraram que podem ser usados para limpar a turbidez da água. De acordo com a Tabela 1, o produto novo (0 meses de armazenamento)

conseguiu baixar a turbidez inicial da água, que era de 150 NTU, para 3,37 NTU após 60 minutos de descanso.

Tabela 1 – Valores médios de turbidez (NTU) da água tratada com o coagulante orgânico de *T. catappa*, em função do tempo de armazenamento (prateleira) e do tempo de sedimentação

Tempo de Prateleira (Meses)	**Tempo (Min.)**						
	2	**10**	**20**	**30**	**40**	**50**	**60**
0	23,79 cA	13,48 bA	8,52 bA	6,59 cA	6,16 cA	4,24 cA	3,37 cA
3	82,22 bA	12,88 bB	9,23 bB	8,80 cB	8,74 cB	9,01 cB	8,32 cB
6	130,70 aA	61,60 aB	53,98 aB	43,91 bC	35,31 bC	34,10 bC	32,22 bC
9	114,60 aA	80,23 aB	73,75 aB	70,11 aB	68,38 aB	66,76 aB	66,47 aB

Nota: Médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si. Letras minúsculas indicam a comparação na coluna (efeito do tempo de prateleira), enquanto letras maiúsculas indicam a comparação na linha (efeito do tempo de sedimentação).

O resultado de limpeza do produto natural no começo (0 meses) confirma a sua capacidade de aglomerar as partículas de sedimentação devido à reação de Mannich. Essa reação coloca grupos amínicos no polímero, aumentando suas cargas positivas, o que ajuda a formar os flocos (Beltrán-Heredia & Sánchez-Martín, 2009; Tomasi et al., 2022).

Conforme observado na Tabela 2, um aspecto relevante do coagulante vegetal foi manter o equilíbrio natural da água. Todos os testes com o polímero natural, independente do tempo guardado, mantiveram a água com o pH próximo do neutro, variando entre 6,18 e 7,56. Esse resultado é uma vantagem para o meio ambiente, pois evita a formação de lodos extras que acontecem quando se tenta corrigir o pH da água no final do tratamento com produtos químicos (Leiviskä & Santos, 2023).

Tabela 2 – Valores médios de pH da água tratada com o coagulante orgânico de *T. catappa*, em função do tempo de armazenamento (prateleira) e do tempo de sedimentação

Tempo de prateleira	Tempo (Min.)						
	2	10	20	30	40	50	60
(Meses)							
0	7,19 bA	6,94 bC	7,02 bB	6,97 bC	6,84 bD	7,05 aB	7,06 bB
3	7,45 aC	7,55 aA	7,52 aA	7,50 aB	7,54 aA	6,82 bD	7,56 aA
6	6,85 cA	6,83 cA	6,76 cB	6,75 cB	6,77 cB	6,73 cB	6,64 cC
9	6,62 dA	6,39 dB	6,37 dB	6,30 dC	6,19 dD	6,19 dD	6,18 dD

Nota: Médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si. Letras minúsculas indicam a comparação na coluna (efeito do tempo de prateleira), enquanto letras maiúsculas indicam a comparação na linha (efeito do tempo de sedimentação).

O comportamento temporal da turbidez e do pH ao longo dos diferentes períodos de armazenamento pode ser visualizado na Figura 1.

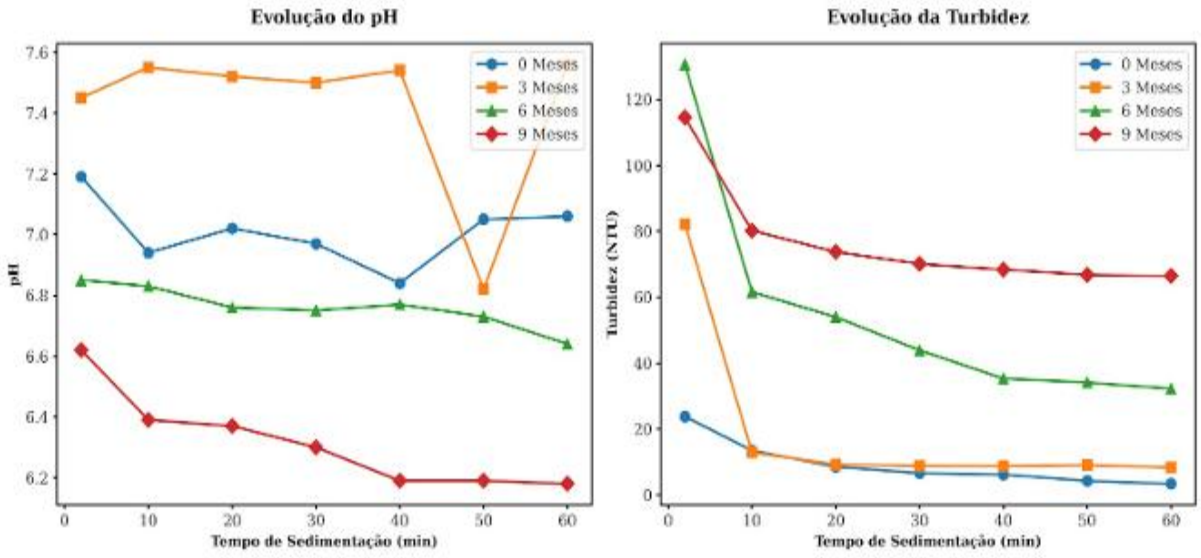


Figura 1 – Evolução do pH e da turbidez (NTU) da água tratada em função do tempo de sedimentação e de prateleira (armazenamento) do coagulante.

A análise dos perfis de turbidez evidencia que a eficiência do coagulante está diretamente relacionada à manutenção de sua densidade de carga catiônica. O processo de modificação via reação de Mannich insere grupamentos amínicos na estrutura polimérica do tanino, conferindo-lhe caráter catiônico essencial para a neutralização das cargas negativas dos colóides presentes na água (Beltrán-Heredia & Sánchez-Martín, 2009; Tomasi et al., 2022). Nos primeiros meses de armazenamento, essa alta densidade de cargas favorece tanto a desestabilização eletrostática quanto a formação de pontes interpartículas, resultando em flocos densos e de rápida decantação (Tomasi et al., 2022).

Em contrapartida, o declínio acentuado na capacidade de clarificação observado a partir do sexto mês reflete a degradação temporal dos sítios ativos do biopolímero. Como apontado por Katayon et al. (2006), compostos orgânicos extraídos de biomassa vegetal sofrem alterações estruturais progressivas quando mantidos sob condições ambientais padrão de estocagem, o que reduz gradativamente a sua reatividade físico-química e limita a vida útil comercial do insumo. Essa perda de estabilidade temporal reforça a necessidade de controle rigoroso do tempo de prateleira ou o emprego de tecnologias de preservação (como refrigeração e controle de umidade) para garantir a padronização do produto em larga escala (Badawi et al., 2023).

Ademais, a estabilidade do pH observada ao longo de todo o período experimental constitui uma das principais vantagens operacionais do coagulante orgânico frente aos sais metálicos convencionais (Leiviskä & Santos, 2023). Enquanto o uso de coagulantes inorgânicos consome alcalinidade e exige correções químicas frequentes no efluente, o tanino de *T. catappa* preservou o equilíbrio hidrogeniônico da água em uma faixa neutra (entre 6,18 e 7,56), consolidando sua vantagem ambiental na mitigação de resíduos secundários no tratamento de água (Yin, 2010).

Sobre a validade do produto com o passar do tempo (que é o foco principal deste estudo), as análises mostram que, aos 60 minutos de descanso, os testes de 0 e 3 meses de prateleira tiveram resultados parecidos na estatística. O valor alcançado até o terceiro mês atende ao Valor Máximo Permitido (VMP) de 5 NTU, ou fica próximo do ideal para a primeira etapa do tratamento (Ministério da Saúde, 2021). Isso mostra que o produto continua bom para limpar a água durante esse período.

No entanto, as avaliações do sexto e do nono mês mostraram uma queda clara na eficiência, ficando diferentes dos primeiros meses na estatística. Essa perda de qualidade com o armazenamento indica que os compostos do produto começam a se degradar com o tempo, o que diminui a sua capacidade de formar flocos de sujeira.

A literatura também aponta que a validade de produtos naturais é afetada pelo tempo guardado e pelo local de estocagem. Estudos indicam que guardar por muito tempo sem cuidar de fatores como luz e temperatura acelera a perda do efeito do produto (Katayon et al., 2006).

Em suma, os resultados confirmam o potencial da casca da *Terminalia catappa* como coagulante natural, mas evidenciam a necessidade de atenção quanto à sua estabilidade temporal. Com base nos dados, recomenda-se para os próximos testes diminuir o tempo guardado para no máximo três meses em temperatura ambiente, ou melhorar a forma de armazenamento para tentar fazer o produto durar mais.

4. Conclusões

Os taninos da casca da *Terminalia catappa* são uma opção viável e eficiente para o meio ambiente no tratamento inicial da água, trazendo a vantagem de manter o pH neutro e evitando o uso de outros produtos químicos no final do processo.

O estudo confirmou que o tempo de prateleira é o principal fator que limita a aplicação do produto, pois ele só consegue manter uma eficiência parecida até o terceiro mês armazenado. A partir do sexto mês, nota-se uma perda na capacidade de limpar a água, mesmo mantendo o pH equilibrado. Por isso, recomenda-se que novas pesquisas busquem melhores formas de embalar e guardar o produto (como refrigeração e bloqueio da luz), com o objetivo de aumentar o seu tempo de validade para o uso na indústria.

5. Agradecimentos

Os autores agradecem à Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN) e ao Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica (PIBIC/UFRN) pela concessão da bolsa de pesquisa. Agradecem também ao Laboratório de Produtos Florestais Não Madeireiros pelo suporte estrutural e apoio na realização deste trabalho, bem como às coordenadoras Tatiane Azevedo e Elaine Cristina.

6. Referências Bibliográficas

Badawi, A. K., Salama, R. S., & Mostafa, M. M. M. (2023). Natural-based coagulants/flocculants as sustainable market-valued products for industrial wastewater treatment: A review of recent developments. *RSC Advances*, *13*(28), 19335–19355. https://doi.org/10.1039/D3RA01999C

Beltrán-Heredia, J., & Sánchez-Martín, J. (2009). Removing heavy metals from polluted surface water with a tannin-based flocculant agent. *Journal of Hazardous Materials*, *165*(1–3), 1215–1218. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2008.09.104

Beltrão, V. A., Freire, L. C. M., & Santos, M. F. (1975). *Levantamento semidetalhado da área do Colégio Agrícola de Jundiaí – Macaíba/RN*. Superintendência do Desenvolvimento do Nordeste.

Bratby, J. (2016). *Coagulation and flocculation in water and wastewater treatment* (3rd ed.). IWA Publishing.

Choy, S. Y., Prasad, K. M. N., Wu, T. Y., Raghunandan, M. E., & Ramanan, R. N. (2014). Utilization of plant-based natural coagulants as future alternatives towards sustainable water clarification. *Journal of Environmental Management*, *145*, 125–140. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2014.07.024

Instituto de Desenvolvimento Sustentável e Meio Ambiente do Rio Grande do Norte. (2013). *Perfil do município de Macaíba*.

Katayon, S., Noor, M. J. M. M., Asma, M., Ghani, L. A. A., Thamer, A. M., Azni, I., Ahmad, J., Khor, B. C., & Suleyman, A. M. (2006). Effects of storage conditions of *Moringa oleifera* extracted solution on its performance in water purification. *Bioresource Technology*, *97*(13), 1455–1460. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2005.07.031

Konrath, R. A., & Fava, F. J. (2006). *Processo de preparação de um agente floculante à base de extrato vegetal* (Patente BR n. PI 0500471-3 A). Instituto Nacional da Propriedade Industrial.

Leiviskä, T., & Santos, S. C. R. (2023). Purifying water with plant-based sustainable solutions: Tannin coagulants and sorbents. *Groundwater for Sustainable Development*, *23*, Article 101004. https://doi.org/10.1016/j.gsd.2023.101004

Lin, T. C., Hsu, F. L., & Chou, C. J. (2001). Tannins and related compounds from *Terminalia catappa* and *Terminalia parviflora*. *Journal of the Chinese Chemical Society*, *48*(6), 1053–1058. https://doi.org/10.1002/jccs.200100153

Ministério da Saúde. (2021). *Portaria GM/MS nº 888, de 4 de maio de 2021*. Diário Oficial da União. https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/portaria-gm/ms-n-888-de-4-de-maio-de-2021-318461562

Silva, L. C., Azevêdo, T. K. B., Souza, D. S., Nascimento, P. E. P., Paiva, K. L. B., & Meza, J. (2025). Natural coagulant for water treatment based on cationized tannins from *Terminalia catappa* bark. *Ambiente & Água - An Interdisciplinary Journal of Applied Science*, *20*, Article e3060. https://doi.org/10.4136/ambiagua.3060

Tomasi, I. T., Machado, C. A., Boaventura, R. A. R., Botelho, C. M. S., & Santos, S. C. R. (2022). Tannin-based coagulants: Current development and prospects on synthesis and uses. *Science of the Total Environment*, *822*, Article 153454. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.153454

Yin, C. Y. (2010). Emerging usage of plant-based coagulants for water and wastewater treatment. *Process Biochemistry*, *45*(9), 1437–1444. https://doi.org/10.1016/j.procbio.2010.05.030

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Efeito do tratamento térmico na composição química de *Cedrela fissilis*: potencial aromático avaliado por FTIR

Kamilla Crysllayne Alves da Silva[1]; Rodolpho Stephan Santos Braga[2]; Gabriela Aguiar Amorim[1]; Iara Nobre Carmona[2]; Tayná Rebonato Oliveira[2]; Fabíola Martins Delatorre[1]; Glaucileide Ferreira[2]; Ananias Francisco Dias Júnior[2]

[1] Universidade de São Paulo, "Luiz de Queiroz" College of Agriculture (USP/ESALQ), Av. Pádua Dias, 11, Piracicaba, SP 13418-900, Brazil
[2] Universidade Federal do Espírito Santo, Agricultural Sciences and Engineering Center. Av. Governador Lindemberg, 316, Jerônimo Monteiro, ES, 29550-000, Brazil

Resumo: O tratamento térmico da madeira apresenta-se como rota tecnológica para a valorização de biomassas lignocelulósicas, uma vez que suas reações de degradação podem potencializar a formação de compostos com atividade aromática. Este trabalho avaliou, por espectroscopia de infravermelho (FTIR), as alterações estruturais promovidas pelo tratamento térmico em madeira de *Cedrela fissilis* Vell. nas temperaturas de 160, 200 e 240 °C, comparativamente à madeira in natura. Os resultados mostraram degradação progressiva e diferenciada conforme a temperatura. A banda em 1700 cm^{-1} (carbonila de hemicelulose) esteve presente até 160 °C, não sendo detectada a partir de 200 °C. As bandas em 2930, 1320, 1230 e 1025 cm^{-1} reduziram progressivamente de intensidade, enquanto a banda em 1980 cm^{-1} desapareceu a 200 °C. Esses resultados indicam que a faixa entre 160 e 200 °C favorece a formação de compostos com potencial aromático, enquanto 240 °C apresentou degradação mais intensa, reduzindo seu potencial, contribuindo para a valorização tecnológica dessa espécie nativa.

Palavras-chave: Modificação térmica; Compostos aromáticos; Potencial aromático

Effect of heat treatment on the chemical composition of *Cedrela fissilis*: aromatic potential evaluated by FTIR

Abstract: Thermal treatment of wood serves as a technological pathway for the valorization of lignocellulosic biomass, as the associated degradation reactions can enhance the formation of compounds with aromatic activity. This study used infrared spectroscopy (FTIR) to evaluate the structural changes induced by thermal treatment in *Cedrela fissilis* Vell. wood at temperatures of 160, 200, and 240 °C, compared to untreated wood. The results revealed progressive degradation that varied according to the temperature. The band at 1700 cm^{-1} (hemicellulose carbonyl) was present up to 160 °C but was not detected at 200 °C or above. The bands at 2930, 1320, 1230, and 1025 cm^{-1} showed a progressive decrease in intensity, while the band at 1980 cm^{-1} disappeared at 200 °C. These results indicate that the 160–200 °C range favors the formation of compounds with aromatic potential, whereas 240 °C resulted in more intense degradation, consistent with a reduction in this potential, thereby contributing to the technological valorization of this native species.

Keywords: Thermal modification; Aromatic compounds; Aromatic potential

1. Introdução

A produção de compostos aromáticos que esteve historicamente atrelada a rotas de síntese petroquímica, são obtidas a partir de matérias-primas de origem fóssil (Xia et al. 2025). Esse modelo, além de altos custos, tem sido cada vez mais questionado diante da atual emergência climática, com o aumento das emissões de gases de efeito estufa e pela crescente pressão por processos produtivos de menor impacto ambiental (Su et al. 2025). Nesse contexto, a busca por fontes renováveis e mais limpas de compostos aromáticos, sobretudo a partir de biomassas lignocelulósicas, apresenta-se como alternativa sustentável, alinhada às demandas ambientais e à valorização de recursos de origem florestal.

Compostos aromáticos de origem vegetal encontram aplicação em setores como o farmacêutico, o cosmético e o de perfumaria (Peng et al. 2025; Formica et al. 2026), mas é na indústria de alimentos e bebidas que sua demanda tem crescido de forma expressiva, impulsionada pela busca do consumidor por produtos de rotulagem limpa (*clean label*) e por alimentos mais saudáveis e naturais (Kienitz et al. 2026; Gomez-Urios et al. 2026). Compostos como furanos, fenóis voláteis, aldeídos e lactonas, gerados a partir da degradação térmica da biomassa, desempenham papel central no perfil sensorial de diversos produtos alimentícios (Coldea et al. 2020; Smailagić et al. 2025). Dessa forma, compreender as transformações químicas associadas ao tratamento térmico de biomassas lignocelulósicas constitui uma etapa importante para avaliar seu potencial como fonte renovável de compostos de interesse aromático.

Nesse cenário, o tratamento térmico da madeira apresenta-se como uma opção tecnológica para a valorização de biomassas lignocelulósicas, sendo conduzido em temperaturas entre 160 e 240 °C (Zelinka et al. 2022; Kobori et al. 2026). Nessa faixa, já se iniciam distintas reações de degradação térmica sobre as macromoléculas constituintes da madeira, ainda que a degradação completa de cada componente ocorra em intervalos de temperatura próprios: a hemicelulose degrada-se preferencialmente entre 220 e 315 °C, a celulose entre 315 e 400 °C, enquanto a lignina apresenta degradação mais gradual e distribuída ao longo de uma faixa muito mais ampla, entre 160 e 900 °C (Yang et al. 2007). É justamente esse conjunto de reações que potencializa a formação de compostos com atividade aromática (Coldea et al. 2020). Assim, o tratamento térmico pode modificar a composição química da biomassa e ampliar seu potencial de utilização para finalidades que ultrapassam o uso estrutural tradicional.

Entre as espécies nativas com potencial para essa finalidade, destaca-se *Cedrela fissilis*, conhecida como cedro-rosa e amplamente distribuída no território nacional (Muellner et al. 2009). Sua madeira é tradicionalmente empregada na construção civil e na fabricação de móveis, marcenaria, compensados e outros produtos (Neves et al. 2025), gerando subprodutos e resíduos que podem ser destinados a novas rotas de valorização. Somente na União Europeia, a geração de resíduos de madeira alcança 50–60 milhões de toneladas anuais (Eurostat, 2018). No Brasil, embora ainda sejam escassos dados nacionais consolidados sobre essa geração, os setores madeireiro e moveleiro são importantes fontes de subprodutos lignocelulósicos subaproveitados (Sessa, 2025). Nesse contexto, o aproveitamento de resíduos e frações de menor valor comercial de *Cedrela fissilis* pode contribuir para a agregação de valor e ampliar as possibilidades de uso da espécie.

Além do potencial associado à valorização de seus subprodutos, a madeira de *Cedrela fissilis* apresenta características sensoriais de interesse para aplicações em aromas. A espécie é utilizada no envelhecimento de bebidas destiladas, contribuindo para a presença de compostos aldeídos e terpênicos associados a notas “adocicadas”, “cítricas” e “amadeiradas” (Silva, 2025). Esse perfil sensorial (Griffin et al. 2024) reforça seu potencial para a obtenção de compostos aromáticos e justifica a investigação das modificações químicas promovidas pelo tratamento térmico, especialmente visando a potencialização na aromatização de bebidas e à agregação de valor a materiais de menor aproveitamento comercial.

Diante do exposto, este trabalho tem como objetivo avaliar, por espectroscopia de infravermelho com transformada de Fourier (FTIR), as alterações estruturais promovidas pelo tratamento térmico em madeira de *Cedrela fissilis* nas temperaturas de 160 °C, 200 °C e 240 °C, comparativamente à madeira não tratada. Parte-se da hipótese de que o tratamento térmico da madeira de *Cedrela fissilis* modifica sua composição química de maneira a favorecer a formação de compostos de interesse aromático, sendo possível identificar temperaturas do tratamento que maximizem esse potencial sem comprometer a integridade química da biomassa.

2. Material e métodos

2.1 Preparação e tratamento térmico

As madeiras de *Cedrela fissilis* foram coletadas na Floresta Nacional do Jamari nos municípios de Itapuã do Oeste e Cujubim, no Estado de Rondônia região do norte do Brasil. Os troncos das madeiras de *Cedrela fissilis* foram cortados em cunhas, retirando as cascas e

diminuindo seu tamanho para melhor padronização e facilitar para as demais etapas. As amostras foram inicialmente secas em estufa a 60 °C até atingirem massa constante para garantir a uniformidade no aquecimento. Após isso, as amostras foram tratadas termicamente em um sistema desenvolvido com aquecimento, circulação de ar, painel de controle, *data logger*, e termopares para a aferição da temperatura em tempo real que as amostras estão recebendo.

As amostras da espécie foram acondicionadas em gavetas com dimensões de 46 × 12 × 12 cm (comprimento, largura e altura), dotadas de aberturas para permitir a passagem dos gases, e posteriormente inseridas em um reator metálico equipado com porta de acesso e sistema de entrada e saída de gases, possibilitando a circulação dos gases através das gavetas e sua entrada e saída do reator. Foram inseridos no interior da caixa e do sistema um total de dois termopares para a aferição da temperatura em tempo real, conforme Figura 1.

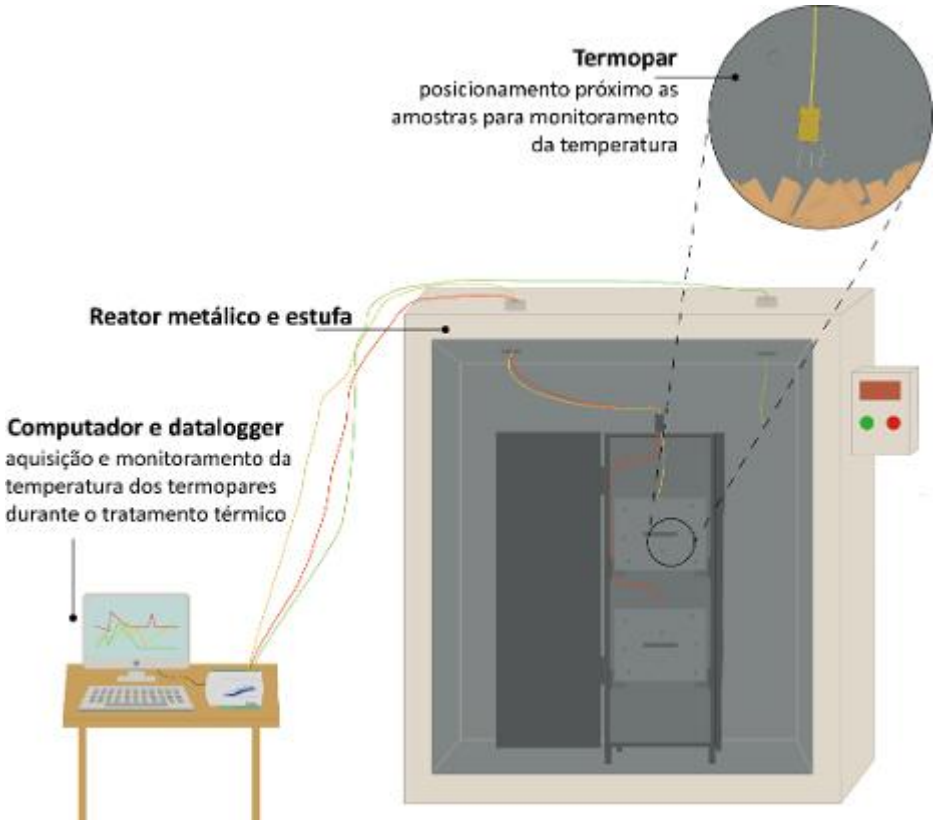


Figura 1. Sistema de tratamento térmico

Após testes preliminares, foram padronizadas a taxa de aquecimento, as temperaturas finais e o tempo de tratamento térmico para as espécies. Em todos os tratamentos, o material foi inicialmente aquecido para 100°C no qual permaneceu por 2h, seguido do aquecimento para a

temperatura final estabelecida, permanecendo por 2h30min. Os parâmetros definidos estão detalhados na Tabela 1.

Tabela 1 - Planejamento do tratamento térmico em estufa

Sigla	Temperatura (°C)	Taxa de aquecimento	Tempo de residência	Tempo total
TE1	160	0,5 °C.min^{-1}	2h30	7h38
TE2	200	0,5 °C.min^{-1}	2h30	8h58
TE3	240	0,5 °C.min^{-1}	2h30	10h18

Em que, TE = Tratamento Estufa.

2.2 Análise de espectroscopia com transformada de Fourier (FTIR)

Para avaliar as estruturas aromáticas, os grupos funcionais e ligações químicas, das amostras, foi realizado a análise de espectroscopia com transformada de Fourier (FTIR). Os espectros FTIR foram obtidos por reflectância total atenuada na faixa de 4000-400 cm^{-1}, onde cada espectro foi adquirido com 32 varreduras com resolução de 4 cm^{-1} com o auxílio de um espectrômetro Bruker ALPHA II. As amostras utilizadas com granulometria 270 *mesh*.

3. Resultados e discussão

Os espectros de FTIR da madeira de *Cedrela fissilis* in natura e após o tratamento térmico nas três faixas de temperaturas, sendo destacados os picos e comportamentos mais relevantes para o estudo estão apresentados na Figura 3.

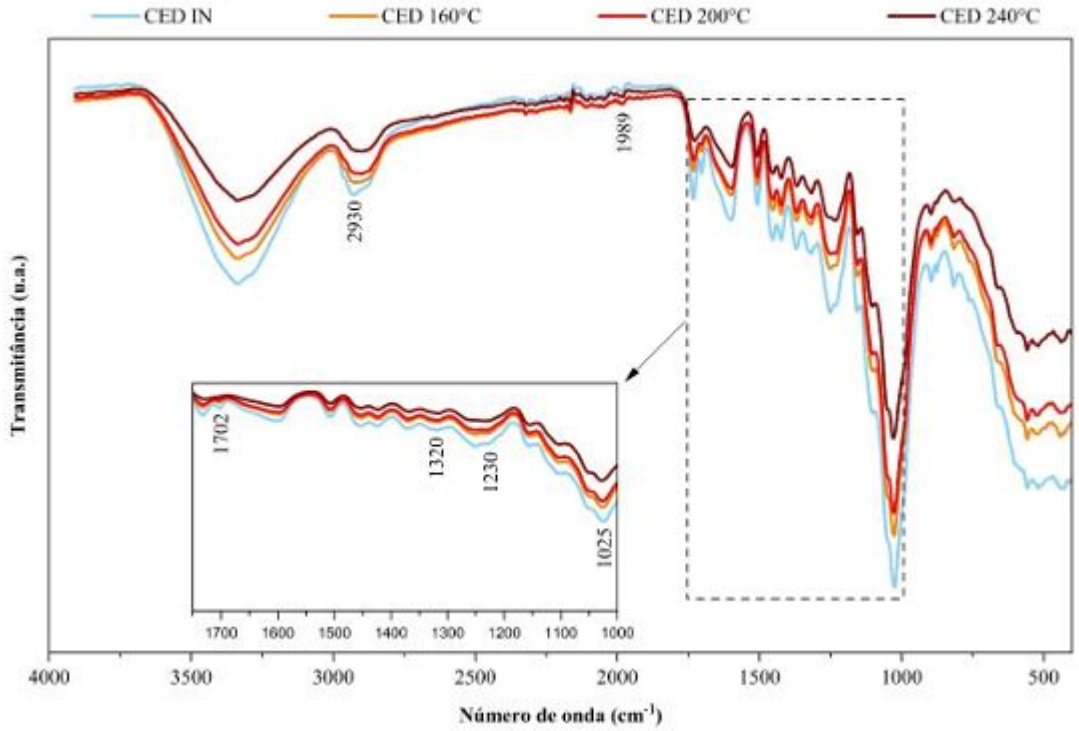


Figura 3 – Espectros de FTIR sob influência do tratamento térmico

As bandas de absorção identificadas nos espectros de FTIR da madeira de *Cedrela fissilis* in natura e submetida às temperaturas de 160, 200 e 240 °C, acompanhadas de suas respectivas atribuições químicas, estão apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2. Bandas infravermelhas das amostras e atribuições de ligações moleculares relacionadas.

Número de onda (cm-1)	Atribuição da banda	Referência
1025	Estiramento C – O em álcoois primários em celulose	(Toscano et al. 2022)
1230	– O núcleos de siringil em lignina e hemicelulose	(Boukir et al. 2019)
1321	Vibração de CH na celulose e nos derivados de siringil	(Chew et al. 2020)
1702	Estiramento C=O do esqueleto aromático da lignina	(Vaz et al. 2025)
2930	Estiramento C-H de alcanos em grupos metil	(Vaz et al.

e metileno de esqueleto aromático	2025)

As bandas em 2930, 1320, 1230 e 1025 cm^{-1}, atribuídas, respectivamente, a vibrações de estiramento C-H de grupos alifáticos (CH_2/CH_3), a componentes cristalinos da celulose associados a vibrações do anel siringil da lignina, a núcleos siringil da lignina e a grupos da hemicelulose, e a vibrações esqueléticas C-O de carboidratos (Boukir et al. 2019; Chew et al. 2020; Toscano et al. 2022; Vaz et al. 2025), permaneceram detectáveis em todos os tratamentos térmicos avaliados, mas com redução na intensidade dos picos à medida que a temperatura do tratamento térmico aumenta. A redução da intensidade em 1230 cm^{-1} é indicativa da degradação da xilana e da formação de uma estrutura de lignina mais condensada, enquanto a diminuição em 1320 cm^{-1} reflete, de forma semelhante, a degradação da hemicelulose, macromolécula termicamente menos estável e, por isso, a primeira a se degradar (Elrhayam and El Bachiri 2024).

Esse padrão é consistente com a hipótese de um processo de degradação térmica mais avançado, no qual reações sucessivas de desidratação, despolimerização e condensação promovem perda progressiva de grupos funcionais ao longo de toda a matriz lignocelulósica (Yu et al., 2026). Esse padrão corrobora, ainda, com o desaparecimento da banda em 1700 cm^{-1} a partir de 200 °C e a instabilidade da banda em 1980 cm^{-1}, que também deixa de ser detectada nessa mesma temperatura, reforçando a interpretação de que, entre 200 °C e 240 °C, a madeira de *Cedrela fissilis* passa por transformações estruturais mais intensas do que aquelas tipicamente descritas para tratamentos térmicos mais brandos.

Do ponto de vista do potencial de formação de compostos com atividade aromática, esses resultados indicam uma existência de uma janela térmica de interesse tecnológico: temperaturas intermediárias, aqui em torno de 160-200 °C, parecem favorecer a degradação seletiva de hemicelulose, etapa química associada à formação de compostos furânicos e são associados a notas aromáticas como “tostado”, “doces”, “amêndoas” e “caramelo” (Aylott and MacKenzie 2012). Enquanto a redução generalizada de intensidade observada em 240 °C, é compatível com um processo de degradação mais intensa. Nessas condições, os compostos de baixo peso molecular inicialmente formados podem ser volatilizados ou convertidos em estruturas carbonizadas de maior estabilidade térmica e menor reatividade química, com consequente redução do potencial aromático do material.

Como limitação deste estudo, destaca-se que a caracterização estrutural por FTIR não permite quantificação direta dos compostos voláteis formados, sendo recomendável, em etapas

futuras, a análise complementar por cromatografia gasosa acoplada à espectrometria de massas (CG-EM) para identificação e quantificação específica dos compostos de atividade aromática gerados em cada condição de tratamento.

4. Conclusões

Este estudo demonstrou que o tratamento térmico promove modificações estruturais progressivas na madeira de *Cedrela fissilis*, sendo a faixa de 160 a 200 °C a mais favorável à formação de compostos de baixo peso molecular associados ao potencial aromático, enquanto o tratamento a 240 °C promoveu alterações mais intensas na matriz lignocelulósica. Esses resultados corroboram a hipótese de que o tratamento térmico modifica a composição química da espécie de forma a favorecer seu potencial aromático, indicando que temperaturas intermediárias possibilitam essas transformações sem promover degradação excessiva da biomassa. Assim, a madeira de *Cedrela fissilis* apresenta potencial para rotas de valorização tecnológica por modificação térmica, especialmente visando à obtenção de compostos de interesse para aplicações aromáticas, contribuindo para a exploração de alternativas de maior valor agregado para uma espécie nativa ainda pouco investigada nesse contexto.

5. Agradecimentos

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio financeiro, à Fundação de Estudos Agrários Luiz de Queiroz (FEALQ), à Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" (ESALQ/USP), ao Programa de Pós-Graduação em Recursos Florestais (PPGRF/ESALQ) e ao Laboratório Multiusuário de Energia da Biomassa (LEB), da Universidade Federal do Espírito Santo (UFES), pelo apoio institucional e pela infraestrutura disponibilizada para a realização deste trabalho.

6. Referências bibliográficas

Aylott RI, MacKenzie WM (2012) Analytical Strategies to Confirm the Generic Authenticity of Scotch Whisky. Journal of the Institute of Brewing 116:215–229. https://doi.org/10.1002/J.2050-0416.2010.TB00424.X

Boukir A, Fellak S, Doumenq P (2019) Structural characterization of Argania spinosa Moroccan wooden artifacts during natural degradation progress using infrared spectroscopy (ATR-FTIR) and X-Ray diffraction (XRD). Heliyon 5:e02477. https://doi.org/10.1016/J.HELIYON.2019.E02477

Chew JJ, Soh M, Sunarso J, et al (2020) Gasification of torrefied oil palm biomass in a fixed-bed reactor: Effects of gasifying agents on product characteristics. Journal of the Energy Institute 93:711–722. https://doi.org/10.1016/J.JOEI.2019.05.010

Coldea TE, Socaciu C, Mudura E, et al (2020) Volatile and phenolic profiles of traditional Romanian apple brandy after rapid ageing with different wood chips. Food Chem 320:126643. https://doi.org/10.1016/J.FOODCHEM.2020.126643

Elrhayam Y, El Bachiri A (2024) Study of the effect of heat temperature on the chemical changes and hygroscopicity of eucalyptus wood by FT-IR and prediction of mechanical properties by the MLR regression method. Spectrochim Acta A Mol Biomol Spectrosc 321:124576. https://doi.org/10.1016/J.SAA.2024.124576

Eurostat. Geração de Resíduos por Categoria, Periculosidade e Atividade NACE Rev. 2. 2018. Disponível online: https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/data/external/generation-of-waste-by-waste. Acesso em: 18 ago. 2026.

Formica V, Romano D, Verdeguer M, et al (2026) Mild abiotic stresses improve essential oils yield and composition of Mediterranean medicinal and aromatic plants with minimal impact on plant growth: A systematic literature review. Italian Journal of Agronomy 21:100079. https://doi.org/10.1016/J.IJAGRO.2025.100079

Gomez-Urios C, Paños-Huertas M, Castillo-Esteve I, et al (2026) From green extraction to clean-label formulation: natural deep eutectic solvents as multifunctional extraction–formulation systems for agri-food valorization. Food Research International 240:119600. https://doi.org/10.1016/J.FOODRES.2026.119600

Kienitz S, Kollmannsberger H, Schreff A, et al (2026) Impact of different production methods on selected aroma compounds for non-alcoholic beers by developing an HS-SPME GC–MS method. Food Chem 504:147924. https://doi.org/10.1016/J.FOODCHEM.2026.147924

Kobori H, Salca EAM, Inagaki T, et al (2026) Colour Changes of Wood Veneer as a Function of Heat Treatment. J Renew Mater 14:. https://doi.org/10.32604/JRM.2025.02025-0152

Muellner AN, Pennington TD, Chase MW (2009) Molecular phylogenetics of Neotropical Cedreleae (mahogany family, Meliaceae) based on nuclear and plastid DNA sequences reveal multiple origins of “Cedrela odorata.” Mol Phylogenet Evol 52:461–469. https://doi.org/10.1016/J.YMPEV.2009.03.025

Neves PHL, Maffioletti FD, Stragliotto MC, et al (2025) Performance of amazonian species in the production of glued laminated timber. Int J Adhes Adhes 142:104100. https://doi.org/10.1016/J.IJADHADH.2025.104100

Peng Q, Zhou L, Xiong Q, et al (2025) Revealing the key aromatic compounds in Malus 'Lollipop' flowers by transcriptome and metabolome. Gene 951:149371. https://doi.org/10.1016/J.GENE.2025.149371

SESSA, Kikina. Selo para empresas do setor moveleiro que utilizam resíduos de madeira. ES Brasil, 11 set. 2025. Disponível em: https://esbrasil.com.br/selo-para-empresas-do-setor-moveleiro-que-utilizam-residuos-de-madeira/. Acesso em: 24 ago. 2026.

Silva RG (2025) Parâmetros microbiológicos, físico-químicos e de acondicionamento envolvidos no envelhecimento da cachaça: uma revisão

Smailagić A, Natić M, Veljović S, et al (2025) Review of wood materials used for the aging of alcoholic beverages: Chemical composition and the potential of reusing of the cooperage by-products. Journal of Food Composition and Analysis 147:108077. https://doi.org/10.1016/j.jfca.2025.108077

Su W, Tian S, Yang H, et al (2025) Refining lignin into aromatic nitrogen-heterocyclic compounds: Sustainable avenue toward value-added chemicals. Chinese Journal of Catalysis 78:25–46. https://doi.org/10.1016/S1872-2067(25)64798-X

Toscano G, Maceratesi V, Leoni E, et al (2022) FTIR spectroscopy for determination of the raw materials used in wood pellet production. Fuel 313:123017. https://doi.org/10.1016/J.FUEL.2021.123017

Vaz S, Barreto AE, Sampaio BL (2025) Catalytic degradation of kraft lignin to determine its antioxidant potential for industrial purposes. Heliyon 11:e42783. https://doi.org/10.1016/J.HELIYON.2025.E42783

Xia S, Ou J, Liang J, et al (2025) Synergistic catalysis strategy of Lewis and Brønsted acids for superior aromatic production in biomass pyrolysis. Ind Crops Prod 226:120710. https://doi.org/10.1016/J.INDCROP.2025.120710

Yang H, Yan R, Chen H, et al (2007) Characteristics of hemicellulose, cellulose and lignin pyrolysis. Fuel 86:1781–1788. https://doi.org/10.1016/J.FUEL.2006.12.013

Zelinka SL, Altgen M, Emmerich L, et al (2022) Review of Wood Modification and Wood Functionalization Technologies. Forests 2022, Vol 13, Page 1004 13:1004. https://doi.org/10.3390/F13071004

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Efeito do tratamento térmico nas propriedades químicas da lignina kraft de eucalipto

Alana de Oliveira Rosa[1]; Iara Fontes Demuner[1]; Jamille Carvalho Souza[1]; Priscila Moreira da Silva Xavier[1]; Ana Márcia Macedo Ladeira Carvalho[1]; Fernando José Borges Gomes[2]

[1] Universidade Federal de Viçosa

[2] Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro

Resumo: Este estudo teve como objetivo avaliar as modificações estruturais da lignina Kraft de eucalipto submetida ao tratamento térmico do licor negro. A lignina de referência foi comparada à lignina tratada a 225 °C por 150 minutos por meio de caracterização química, análise elementar, espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier (FTIR) e pirólise acoplada à cromatografia gasosa e espectrometria de massas (Py-GC/MS). Os resultados indicaram aumento da lignina insolúvel e do teor de carbono, bem como redução dos teores de oxigênio e hidrogênio. O FTIR evidenciou alterações nos grupos metoxila e nas ligações C–O, enquanto a Py-GC/MS confirmou a redução da razão siringila/guaiacila e o aumento da formação de compostos catecólicos, indicando reações de desmetoxilação e condensação. Conclui-se que o tratamento térmico promoveu modificações seletivas e controladas na estrutura da lignina, preservando seu núcleo aromático e ampliando significativamente seu potencial de aplicação em materiais e produtos de maior valor agregado.

Palavras-chave: Reatividade; Estrutura aromática; Licor negro.

Effect of heat treatment on the chemical properties of eucalyptus kraft lignin

Abstract: This study aimed to evaluate the structural modifications of eucalyptus Kraft lignin subjected to thermal treatment of black liquor. The reference lignin was compared to the lignin treated at 225 °C for 150 minutes through chemical characterization, elemental analysis, Fourier-transform infrared spectroscopy (FTIR), and pyrolysis coupled with gas chromatography and mass spectrometry (Py-GC/MS). The results indicated an increase in insoluble lignin and carbon content, as well as a reduction in oxygen and hydrogen contents. FTIR revealed changes in methoxyl groups and C–O bonds, while Py-GC/MS confirmed a reduction in the syringyl/guaiacyl ratio and an increase in the formation of catechol compounds, indicating demethoxylation and condensation reactions. It is concluded that the thermal treatment promoted selective and controlled modifications in the lignin structure, preserving its aromatic core and significantly expanding its potential for application in higher value-added materials and products.

Keywords: Reactivity; Aromatic structure; Black Liquor.

1. Introdução

A crescente demanda por processos industriais mais sustentáveis tem incentivado o desenvolvimento de tecnologias para o melhor aproveitamento dos materiais gerados pela indústria de celulose e papel. Nesse cenário, a lignina destaca-se por ser a segunda macromolécula natural mais abundante do planeta e a principal fonte renovável de compostos aromáticos, gerando interesse para a produção de materiais e produtos químicos de maior valor agregado (Boerjan, Ralph e Baucher, 2003).

No processo Kraft de produção de celulose, a lignina é removida da madeira e incorporada ao licor negro que na maior parte das indústrias, é utilizado como combustível para geração de energia. Entretanto, esse composto possui potencial para outras finalidades, o que tem impulsionado pesquisas sobre o seu aproveitamento em produtos de maior valor agregado. Apesar disso, a lignina Kraft ainda apresenta desafios para sua utilização, principalmente devido à sua elevada heterogeneidade estrutural, à presença de compostos sulfurados e à baixa reatividade química resultante das alterações sofridas durante o processo de polpação (Chakar e Ragauskas, 2004).

Nesse contexto, o tratamento térmico do licor negro surge como uma alternativa para modificar a estrutura da lignina e aumentar sua reatividade. Durante esse processo, podem ocorrer reações como desmetilação, desmetoxilação e condensação, capazes de alterar a composição química da lignina e ampliar seu potencial de aplicação em diferentes processos industriais (Demuner *et al.*, 2021).

Para compreender essas modificações, é necessário utilizar técnicas de caracterização que forneçam informações complementares. A caracterização química permite avaliar alterações nos teores de lignina, enquanto a análise elementar identifica mudanças na composição dos principais elementos químicos. Já a espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier (FTIR) possibilita identificar variações nos grupos funcionais presentes na estrutura da lignina por meio de suas bandas características (Faix, 1991).

De forma complementar, a pirólise acoplada à cromatografia gasosa e à espectrometria de massas (Py-GC/MS) permite identificar os compostos formados durante a degradação térmica. Essa técnica contribui para uma compreensão mais detalhada das alterações estruturais promovidas pelo tratamento térmico (Demuner *et al*., 2021).

Dessa forma, o objetivo deste trabalho é analisar as modificações estruturais promovidas pelo tratamento térmico na lignina Kraft de eucalipto. Para isso, foram correlacionados os resultados de caracterização química, análise elementar, espectroscopia FTIR e Py-GC/MS,

buscando compreender, de forma integrada, os efeitos do tratamento térmico sobre a composição química, a estrutura molecular e o potencial de reatividade da lignina.

2. Material e métodos

Foram analisadas as alterações químicas e estruturais da lignina Kraft de eucalipto decorrentes do tratamento térmico do licor negro, obtido a partir do processo de polpação Kraft de madeira de eucalipto e fornecido por uma indústria brasileira de celulose e papel. Para isso, foi comparada a lignina de referência, obtida sem tratamento térmico, com a lignina submetida ao tratamento a 225 °C por 150 minutos. Essa condição foi selecionada por apresentar as modificações mais expressivas na estrutura da lignina.

O tratamento térmico foi realizado em um digestor Parr, modelo 4848 M, e, posteriormente, a lignina Kraft foi extraída do licor negro original e do licor tratado, seguindo a metodologia de (Lin, 1992). A caracterização química das amostras incluiu a determinação dos teores de lignina solúvel, insolúvel e total, conforme as normas TAPPI UM 250 (Tappi, 2000) e TAPPI T 222 om-02 (Tappi, 2002). Em seguida, foi realizada a análise elementar em equipamento LECO modelo CHNS-O. Os teores de carbono, hidrogênio, nitrogênio e enxofre foram determinados no módulo TruSpec CHNS Micro, enquanto o teor de oxigênio foi determinado no módulo TruSpec Oxygen Add-On.

As alterações estruturais foram avaliadas por espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier (FTIR), utilizando um espectrômetro VARIAN 600 com acessório GladiATR. Os espectros, obtidos na faixa de 400 a 4000 cm^{-1} e resolução de 4 cm^{-1}, foram interpretados com base em (Faix, 1991) e correlacionados aos resultados da análise elementar. Complementando essa avaliação, a técnica de pirólise acoplada à cromatografia gasosa e espectrometria de massas (Py-GC/MS) foi empregada para identificar os produtos da degradação térmica da lignina e determinar a razão entre as unidades (S/G), conforme metodologia citada em Demuner *et al.* (2021).

A discussão dos resultados foi conduzida relacionando as informações obtidas por cada técnica de caracterização. As análises foram realizadas em duplicata, utilizando-se a média dos resultados obtidos. Sendo assim, foi possível compreender os efeitos do tratamento térmico sobre a composição química, os grupos funcionais e a estrutura molecular da lignina Kraft de eucalipto.

3. Resultados e discussão

3.1 Caracterização química e análise elementar

A caracterização química e a análise elementar permitiram avaliar as principais modificações promovidas pelo tratamento térmico na composição da lignina Kraft de eucalipto. Para essa análise, foram comparados os resultados da lignina de referência com aqueles obtidos para a lignina submetida à condição mais elevada de tratamento térmico (225 °C por 150 minutos), conforme apresentado na Tabela 1.

Tabela 1 – Caracterização química e composição elementar da lignina Kraft de referência e da lignina submetida ao tratamento térmico de 225 °C por 150 minutos

Parâmetros	Referência	225 ºC/ 150 min
Lignina solúvel (%)	5,64	1,63
Lignina insolúvel (%)	91,30	96,63
Lignina total (%)	96,94	98,26
Carbono (%)	63,52	70,73
Hidrogênio (%)	5,68	4,94
Nitrogênio (%)	0,12	0,13
Oxigênio (%)	27,63	23,02
Enxofre (%)	3,01	1,06

Os resultados mostram que o tratamento térmico promoveu alterações na composição química da lignina, principalmente pela redução da lignina solúvel (de 5,64% para 1,63%) e aumento da lignina insolúvel (de 91,30% para 96,63%), enquanto a lignina total sofreu apenas pequena variação (de 96,94% para 98,26%). Esses dados indicam que não houve degradação significativa da lignina, mas sim modificações estruturais. Segundo Demuner et al. (2021), esse comportamento está relacionado às reações de condensação em altas temperaturas, que tornam a lignina menos solúvel e mais estável.

A análise elementar revelou aumento do teor de carbono (de 63,52% para 70,73%) e redução dos teores de oxigênio (de 27,63% para 23,02%) e hidrogênio (de 5,68% para 4,94%), indicando a remoção de grupos oxigenados, principalmente metoxila, e o enriquecimento da estrutura aromática. De acordo com Boerjan, Ralph e Baucher (2003), essas alterações estão associadas a reações de desmetoxilação e desmetilação,que modificam a estrutura química sem comprometer o esqueleto aromático da lignina.

Também foi observada redução do teor de enxofre (de 3,01% para 1,06%), sugerindo a remoção de compostos sulfurados incorporados durante o processo Kraft,
o que favorece aplicações de maior valor agregado. O teor de nitrogênio permaneceu praticamente constante, indicando que esse elemento não foi afetado pelo tratamento.

Em conjunto, os resultados demonstram que o tratamento térmico promoveu uma lignina mais aromática, condensada e potencialmente mais reativa. No entanto, como as análises químicas e elementares não identificam diretamente as modificações nos grupos funcionais, torna-se necessária a utilização da espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier (FTIR) para confirmar essas alterações estruturais.

3.2 Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR)

A espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier (FTIR) foi empregada para avaliar as modificações nos principais grupos funcionais da lignina após o tratamento térmico. Essa técnica permite identificar alterações nas ligações químicas presentes na macromolécula por meio das bandas de absorção características, possibilitando relacionar as mudanças estruturais observadas com os resultados da caracterização química e da análise elementar (Faix, 1991). Os espectros de FTIR da lignina Kraft de referência e da lignina tratada termicamente a 225 °C por 150 minutos estão apresentados na Figura 1.

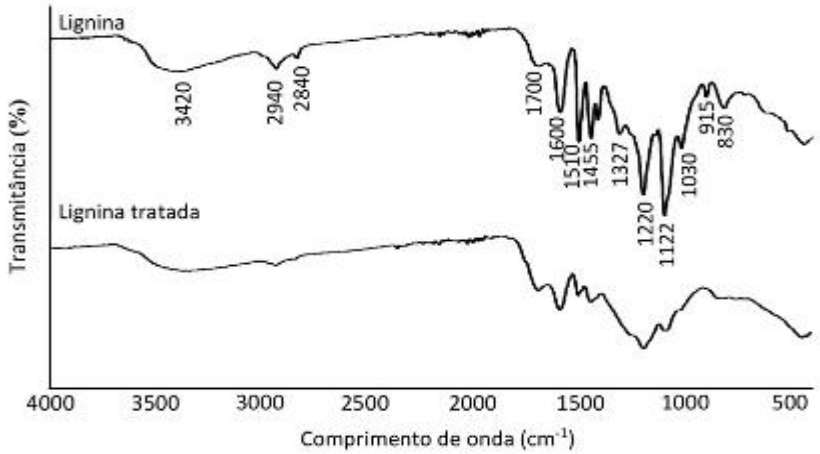


Figura 1 – Espectros de FTIR da lignina Kraft de referência e da lignina tratada termicamente a 225 °C por 150 minutos.

Ao comparar os espectros, observa-se que as bandas em, aproximadamente, 1510 cm^{-1} associadas ao esqueleto aromático da lignina, permaneceram praticamente inalteradas após o tratamento térmico. Esse resultado indica que a estrutura aromática foi preservada, evidenciando a caracterização química, que mostrou pequenas variações na lignina total. As principais alterações ocorreram nas bandas relacionadas aos grupos oxigenados. A redução da intensidade da banda em 1220 cm^{-1}, atribuída às ligações C–O dos grupos metoxila das unidades guaiacila e

siringila, pode sugerir a remoção parcial desses grupos durante o tratamento térmico, compatível com a diminuição do teor de oxigênio observada na análise elementar.

Resultado semelhante foi observado na banda em aproximadamente 1030 cm^{-1}, correspondente às ligações C–O de álcoois e éteres, reforçando a redução de grupos oxigenados na estrutura da lignina. Além disso, a diminuição da intensidade da banda entre 2940 e 2840 cm^{-1}, relacionada aos grupos metila e metileno, está de acordo com a redução do teor de hidrogênio, indicando a ocorrência de reações de desmetilação.

A banda em 1122 cm^{-1}, característica das unidades siringila, também apresentou redução de intensidade, sugerindo maior tendência dessas unidades às reações de desmetoxilação. De modo geral, o FTIR demonstrou que o tratamento térmico promoveu modificações principalmente nos grupos funcionais periféricos da lignina, preservando o núcleo aromático da macromolécula. Em conjunto com a análise elementar, os resultados confirmam a ocorrência de reações de desmetoxilação e desmetilação, responsáveis pela redução dos teores de oxigênio e hidrogênio e pelo aumento relativo do teor de carbono. Embora o FTIR confirme essas alterações químicas, a técnica não permite identificar diretamente as unidades estruturais da lignina que foram mais afetadas. Dessa forma, a análise por Py-GC/MS torna-se fundamental para identificar os compostos fenólicos gerados durante a pirólise e validar as modificações estruturais sugeridas pelas análises química, elementar e espectroscópica.

3.3 Validação das modificações estruturais por Py-GC/MS

A pirólise acoplada à cromatografia gasosa e espectrometria de massas (Py-GC/MS) foi utilizada para identificar os compostos fenólicos formados durante a degradação térmica da lignina, validando as modificações estruturais indicadas pela caracterização química, análise elementar e FTIR (Demuner et al., 2021). A Tabela 2 apresenta a distribuição dos principais compostos fenólicos da lignina de referência e da lignina tratada a 225 °C por 150 minutos.

Tabela 2 – Distribuição relativa dos principais compostos fenólicos obtidos

Classe	Lignina referência (%)	Lignina tratada 225 ºC/ 150 min (%)
Hidroxifenila (H)	1,27	7,56
Guaiacila (G)	20,52	14,70
Siringila (S)	59,90	20,28
Catecol (Ca)	18,31	57,45
Razão S/G	2,92	1,38

Os resultados evidenciaram redução da participação das unidades siringila (S), de 59,90% para 20,28%, acompanhada pela diminuição da razão S/G, de 2,92 para 1,38. Em contrapartida, houve aumento expressivo da fração de catecol, de 18,31% para 57,45%, além do aumento dos compostos hidroxifenílicos.

Segundo Boerjan, Ralph e Baucher (2003), as unidades siringila possuem dois grupos de metoxilas, tornando-as mais propensas às reações de desmetoxilação durante o tratamento térmico. Como consequência, essas unidades podem ser convertidas em estruturas menos metoxiladas, como compostos guaiacílicos e catecólicos, explicando a redução da razão S/G e o aumento da fração de catecol.

Esses resultados estão em concordância com a análise elementar, que demonstrou redução dos teores de oxigênio e hidrogênio, indicando a remoção de grupos metoxila. Da mesma forma, o FTIR evidenciou diminuição das bandas 1220 cm^{-1}, 1122 cm^{-1} e 2940–2840 cm^{-1}, confirmando alterações nos grupos metoxila e metila da lignina.

O crescimento da formação de catecol indica maior disponibilidade de grupos hidroxila fenólicos, aumentando a reatividade da lignina e favorecendo aplicações como a produção de resinas fenólicas e outros materiais de maior valor agregado.

De forma geral, a integração das técnicas demonstrou que o tratamento térmico promoveu maior condensação da lignina, redução dos grupos metoxila e aumento relativo do teor de carbono, preservando o núcleo aromático da macromolécula. Assim, os resultados da caracterização química, análise elementar, FTIR e Py-GC/MS são complementares e confirmam que o tratamento térmico modifica seletivamente a estrutura da lignina, aumentando seu potencial de reatividade para aplicações de maior valor agregado.

4. Conclusões

O presente trabalho demonstrou que o tratamento térmico aplicado ao licor negro promoveu modificações significativas na estrutura da lignina Kraft de eucalipto.

A caracterização química evidenciou aumento da fração de lignina insolúvel e redução da lignina solúvel, indicando maior grau de condensação. A análise elementar mostrou aumento do teor de carbono e redução dos teores de oxigênio e hidrogênio, sugerindo a ocorrência de reações de desmetoxilação e desmetilação. Essas alterações foram confirmadas pelo FTIR, que identificou modificações nos grupos metoxila e nas ligações C–O, e pelo Py-GC/MS, que evidenciou redução da razão siringila/guaiacila (S/G) e aumento da formação de compostos catecólicos.

De forma geral, os resultados demonstram que o tratamento térmico preservou o núcleo aromático da lignina e promoveu modificações seletivas em seus grupos funcionais, aumentando seu potencial de reatividade. Assim, a condição de 225 °C por 150 minutos mostrou-se promissora para a obtenção de uma lignina com maior potencial de aplicação na produção industrial.

5. Agradecimentos

Ao Laboratório de Celulose e Papel (LCP), à Universidade Federal de Viçosa (UFV), à Profa. Dra. Iara F. Demuner e à Dra. Jamille C. Souza pelo apoio, orientação e suporte durante o desenvolvimento deste trabalho.

6. Referências bibliográficas

Demuner, I. F., Gomes, F. J. B., Coura, M. R., Gomes, J. S., Demuner, A. J., Carvalho, A. M. M. L., & Silva, C. M. (2021). Determination of chemical modification of eucalypt kraft lignin after thermal treatment by Py-GC–MS. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 156(105158). https://doi.org/10.1016/j.jaap.2021.105158

Faix, O. (1991). Classification of lignins from different botanical origins by FTIR spectroscopy. Holzforschung, 45(Supplement), 21–27. https://doi.org/10.1515/hfsg.1991.45.s1.21

Boerjan, W., Ralph, J., & Baucher, M. (2003). Lignin Biosynthesis. Annual Review of Plant Biology, 54(1), 519–546. https://doi.org/10.1146/annurev.arplant.54.031902.134938

Embrapa. (s.d.). Licor negro. Agência de Informação Tecnológica Embrapa. https://www.embrapa.br/web/agencia-de-informacao

Ralph, J., Lundquist, K., Brunow, G., Lu, F., Kim, H., Schatz, P. F., Marita, J. M., Hatfield, R. D., Ralph, S. A., Christensen, J. H., & Boerjan, W. (2004). Lignins: Natural polymers from oxidative coupling of 4-hydroxyphenylpropanoids. Phytochemistry Reviews, 3(1-2), 29–60. https://doi.org/10.1023/B:PHYT.0000047809.65444.a4

Hisatomi, C. (s.d.). Lignina: o que é, propriedades e usos. eCycle. https://www.ecycle.com.br/lignina/amp/

Scribd. (s.d.). *Tabela de valores de absorção no infravermelho para compostos orgânicos*. Scribd. https://pt.scribd.com/doc/52673015/TABELA-DE-VALORES-DE-ABSORCAO-NO-INFRAVERMELHO-PARA-COMPOSTOS-ORGANICOS

Chakar, F. S., & Ragauskas, A. J. (2004). Review of current and future softwood kraft lignin process chemistry. *Industrial Crops and Products*, *20*(2), 131–141. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2004.04.016

Lin, S. Y. (1992). Commercial spent pulping liquors. Em C. W. Dence & S. Y. Lin (Eds.), *Methods in Lignin Chemistry* (pp. 75–80). Springer-Verlag. https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-642-74065-7

Technical Association of the Pulp and Paper Industry. (2000). *TAPPI UM 250: Acid-soluble lignin in wood and pulp*. TAPPI Press. https://imisrise.tappi.org/TAPPI/Products/01/UM250.aspx

Technical Association of the Pulp and Paper Industry. (2002). *TAPPI T 222 om-02: Acid-insoluble lignin in wood and pulp*. TAPPI Press. https://imisrise.tappi.org/TAPPI/Products/01/T222.aspx

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

EFEITO DO USO DE BIOCHAR NA PRODUÇÃO DE *Cannabis sativa*

Laísa Pereira Oliveira[1]; Thaís Brito Sousa[1]; Douglas Siqueira Freitas[1]; Vinicius Oliveira Santos[1]; Camila Duarte[1]; Allana Katiussya Silva Pereira[2]; Adriana Gomes de Moraes[3]

1 Universidade do Estado de Minas Gerais (UEMG), Unidade Ituiutaba, Curso de Agronomia, Ituiutaba, Minas Gerais, Brasil

[2] Universidade Federal do Recôncavo da Bahia (UFRB), Cruz das Almas, Bahia, Brasil

[3] Universidade Federal de Uberlândia (UFU), Curso de Agronomia, Uberlândia, Minas Gerais, Brasil

[4] Universidade Federal de Uberlândia (UFU), Campus Pontal, Curso de Ciências Biológicas, Ituiutaba, Minas Gerais, Brasil

Resumo: O reaproveitamento de caules de *Cannabis sativa* para produção de biochar pode reduzir resíduos e gerar um condicionador de solo. Objetivou-se caracterizar esse material e avaliar doses no crescimento vegetativo da espécie. Os caules foram pirolisados a 500 °C por 60 minutos. O biochar foi caracterizado físicamente e quimicamente e aplicado nas doses de 0; 2,5; 5,0 e 7,5% (v/v), em delineamento inteiramente casualizado, com quatro repetições. Altura, diâmetro do caule e número de folhas foram avaliados aos 30, 60 e 90 dias. O biochar apresentou rendimento de 25,13%, porosidade de 86,75%, pH 9,93 e 58,12% de carbono fixo. Aos 30 dias, as doses aumentaram a altura. Aos 60 dias, 2,5% manteve desempenho semelhante ao controle, enquanto 5,0 e 7,5% reduziram altura e número de folhas. Aos 90 dias não houve diferenças. O caule apresenta potencial para produção de biochar, mas a resposta depende da dose e do período de avaliação.

Palavras-chave: Pirólise; Condicionador de solo; Economia circular

EFFECT OF BIOCHAR USE ON THE PRODUCTION OF *Cannabis Sativa*

Abstract: Reusing *Cannabis sativa* stems for biochar production may reduce waste and provide a soil conditioner. This study characterized the material and evaluated application rates on vegetative growth. Stems were pyrolyzed at 500 °C for 60 minutes. Biochar was physically and chemically characterized and applied at 0, 2.5, 5.0, and 7.5% (v/v) in a completely randomized design with four replicates. Plant height, stem diameter, and leaf number were evaluated at 30, 60, and 90 days. Biochar showed a 25.13% yield, 86.75% porosity, pH 9.93, and 58.12% fixed carbon. At 30 days, all rates increased height. At 60 days, 2.5% performed similarly to the control, whereas 5.0 and 7.5% reduced height and leaf number. At 90 days, treatments did not differ. Cannabis stems are a promising feedstock, but plant response depends on application rate and evaluation period.

Keywords: Pyrolysis; Soil conditioner; Circular economy

1. Introdução

A *Cannabis sativa* apresenta importância medicinal, farmacêutica e econômica crescente, principalmente pela presença de canabinoides bioativos empregados em produtos terapêuticos. O avanço das aplicações medicinais e da regulamentação desses produtos ampliou o interesse pelo cultivo da espécie e pelas práticas de manejo capazes de conciliar produtividade, qualidade e sustentabilidade (Bonini et al., 2018; Brasil, 2026). Com a expansão

do cultivo, aumenta também a geração de resíduos vegetais, sobretudo caules descartados após a colheita e o processamento das partes de interesse.

O aproveitamento dessa biomassa é relevante em sistemas produtivos que buscam reduzir perdas e reinserir resíduos no processo agrícola. A conversão de caules em insumos pode diminuir o volume de material descartado, agregar valor à biomassa e contribuir para a economia circular no sistema produtivo.

Entre as alternativas de reaproveitamento, destaca-se o biochar, material carbonáceo obtido pela pirólise de biomassa sob disponibilidade limitada de oxigênio. A matéria-prima e as condições de produção determinam características como pH, densidade, porosidade, teor de cinzas, carbono fixo e composição mineral (Lehmann & Joseph, 2015; Ippolito et al., 2020). Por apresentar estrutura porosa e superfícies reativas, o biochar pode melhorar a retenção de água e nutrientes, a aeração e a capacidade de troca catiônica, além de criar microambientes favoráveis à atividade biológica do solo (Glaser et al., 2002).

Os efeitos agronômicos, contudo, não são uniformes. A resposta depende da biomassa utilizada, da temperatura de pirólise, do solo, da cultura e, principalmente, da dose aplicada. Materiais alcalinos em concentrações elevadas podem aumentar excessivamente o pH, alterar a disponibilidade de micronutrientes e provocar desequilíbrios nutricionais (Schimmelpfennig & Glaser, 2012; El-Naggar et al., 2019). Portanto, a caracterização do produto deve anteceder sua recomendação agronômica.

Os caules de *C. sativa* são resíduos com potencial para conversão termoquímica. Embora existam estudos sobre biochar de diferentes biomassas, ainda são limitadas as informações sobre o material produzido a partir do caule da própria espécie e aplicado em seu cultivo. Estudos recentes indicam que essa biomassa pode originar materiais com aplicações agrícolas e ambientais, mas ainda é necessário compreender a interação entre as propriedades do biochar, a dose e o crescimento das plantas (Ceretta et al., 2025). Assim, este trabalho teve como objetivo caracterizar o biochar produzido a partir do caule de *Cannabis sativa* e avaliar os efeitos de diferentes doses sobre a altura, o diâmetro do caule e o número de folhas de plantas da mesma espécie.

2. Material e métodos

2.1 Produção e caracterização do biochar

Os caules de *Cannabis sativa* foram obtidos após o processamento de plantas destinadas à produção medicinal na Associação Tijucanna, em Minas Gerais. A biomassa, proveniente de

plantas com aproximadamente cinco meses, foi seca ao ar, triturada, moída em moinho de facas e classificada, selecionando-se partículas entre 1 e 2 mm. A pirólise foi realizada em mufla elétrica, sob disponibilidade limitada de oxigênio, a 500 °C, durante 60 minutos. Após o resfriamento, o biochar foi armazenado em recipientes herméticos.

O rendimento gravimétrico foi calculado pela relação entre a massa de biochar e a massa seca de biomassa alimentada no processo. O teor de umidade seguiu a ASTM E871-82; a densidade aparente, a ABNT NBR 11941; a densidade a granel, a ASTM D5057-17; e a porosidade foi estimada com base na ASTM D167-93. A composição imediata, incluindo materiais voláteis, cinzas e carbono fixo, foi determinada conforme a ASTM D1762-84. O pH foi determinado segundo Adhikari et al. (2022).

A biomassa original e o biochar foram analisados quanto aos teores de nitrogênio, fósforo, potássio, cálcio, magnésio, enxofre, carbono, hidrogênio, ferro, cobre, zinco, níquel, manganês, boro e molibdênio, com metodologias recomendadas pela Embrapa e pelo Instituto Agronômico de Campinas. Também foi verificada a presença de chumbo, cádmio, mercúrio e cromo conforme o método EPA 3050B.

2.2 Condução experimental e avaliações

O experimento foi conduzido entre março e junho de 2026 na Associação Tijucanna, em Ituiutaba, Minas Gerais. Foram utilizadas plantas da variedade Sour Diesel, propagadas por estaquia. Após o enraizamento em vermiculita, mudas uniformes foram transplantadas para vasos de 10 L contendo Latossolo Vermelho proveniente da Fazenda Experimental da Universidade do Estado de Minas Gerais. Os tratamentos corresponderam à incorporação de 0; 2,5; 5,0 e 7,5% (v/v) de biochar ao volume de solo.

O delineamento foi inteiramente casualizado, com quatro tratamentos e quatro repetições, totalizando 16 unidades experimentais, cada uma constituída por um vaso com uma planta. Os vasos foram distribuídos aleatoriamente e receberam manejo uniforme de irrigação, adubação e demais práticas culturais.

As avaliações foram realizadas aos 30, 60 e 90 dias após a instalação do experimento. A altura foi mensurada da superfície do solo ao ápice da planta, em centímetros. O diâmetro do caule foi calculado a partir da circunferência do colo e expresso em milímetros. O número de folhas foi obtido por contagem das folhas completamente expandidas.

2.3 Análise estatística

Os dados foram analisados separadamente para cada época. Após os testes de normalidade de Shapiro-Wilk e de homogeneidade das variâncias, realizou-se análise de variância. Quando houve efeito significativo, as médias foram agrupadas pelo teste de Scott-Knott a 5% de probabilidade.

3. Resultados e discussão

3.1 Caracterização física e composição imediata

A pirólise de 7,0 kg de caules secos resultou em 1,759 kg de biochar, correspondente a rendimento gravimétrico de 25,13%. O valor encontra-se no limite inferior da faixa geralmente relatada para pirólise lenta de biomassas lignocelulósicas. A temperatura de 500 °C favorece a liberação de compostos voláteis e reduz a fração sólida remanescente, de modo que o rendimento observado é coerente com as condições empregadas (Antal & Grønli, 2003; Ippolito et al., 2020).

Tabela 1 – Propriedades físicas e composição imediata do caule e do biochar de *Cannabis sativa*

Propriedade	Unidade	Caule	Biochar
Rendimento gravimétrico	%	–	25,13
Umidade	%	7,32	6,71
Densidade a granel	kg m^{-3}	–	144,15
Densidade aparente	kg m^{-3}	–	138,48
Densidade verdadeira	kg m^{-3}	–	1.134,64
Porosidade	%	–	86,75
pH	–	–	9,93
Materiais voláteis	%	70,58	21,21
Cinzas	%	12,01	20,67
Carbono fixo	%	17,41	58,12

Fonte: dados experimentais e laudos analíticos de laboratórios parceiros da Associação Tijucanna (2026). Os valores físicos do biochar correspondem às médias de cinco repetições analíticas.

A baixa densidade e a porosidade de 86,75% (tabela 1) evidenciam a formação de uma matriz leve e com elevado volume de espaços vazios. Essas características podem reduzir a densidade do meio de cultivo, melhorar a aeração e aumentar a retenção de água, favorecendo o ambiente radicular (Blanco-Canqui, 2017). O pH 9,93 revela caráter fortemente alcalino, atribuído à concentração de cinzas, carbonatos e óxidos básicos durante a pirólise. Esse atributo pode ser útil em solos ácidos, porém exige cautela em doses elevadas, pois o aumento excessivo do pH pode limitar a disponibilidade de micronutrientes (Ippolito et al., 2020).

A composição imediata confirmou a carbonização do material. Os materiais voláteis diminuíram de 70,58 para 21,21%, enquanto o carbono fixo aumentou de 17,41 para 58,12%. A perda de compostos lábeis e a formação de estruturas aromáticas mais condensadas aumentam a estabilidade do carbono e a resistência à decomposição. O teor de cinzas passou de 12,01 para 20,67%, refletindo a concentração relativa da fração mineral após a degradação térmica da matéria orgânica (Antal & Grønli, 2003; Lehmann & Joseph, 2015).

3.2 Caracterização química

A pirólise alterou de forma distinta a composição mineral do material. O teor de nitrogênio apresentou pequena redução, enquanto cálcio, magnésio, ferro e manganês aumentaram (tabela 2). O carbono passou de 385,5 para 461,0 g kg^{-1} e o hidrogênio diminuiu 58,3%, comportamento compatível com a desidratação, a volatilização de compostos orgânicos e o aumento do grau de carbonização (El-Naggar et al., 2019).

Tabela 2 – Composição química selecionada do caule e do biochar de *Cannabis sativa*

Elemento	Unidade	Caule	Biochar	Variação (%)
Nitrogênio (N)	g kg^{-1}	12,5	12,1	-3,2
Fósforo (P)	g kg^{-1}	4,29	0,85	-80,2
Potássio (K)	g kg^{-1}	9,41	8,82	-6,3
Cálcio (Ca)	g kg^{-1}	1,71	3,42	+100,0
Magnésio (Mg)	g kg^{-1}	1,71	2,42	+41,5
Carbono (C)	g kg^{-1}	385,5	461,0	+19,6
Hidrogênio (H)	g kg^{-1}	56,4	23,5	-58,3
Ferro (Fe)	mg kg^{-1}	214,3	428,1	+99,8
Manganês (Mn)	mg kg^{-1}	209,1	428,2	+104,8

Variação (%) = [(biochar − caule) / caule] × 100. Fonte: laudos analíticos obtidos em laboratório parceiro da Associação Tijucanna (2026).

O aumento de cálcio e magnésio sugere concentração de elementos menos voláteis na matriz carbonizada. Os teores de ferro e manganês praticamente duplicaram. Em contrapartida, houve redução expressiva de fósforo, cobre, zinco e boro, demonstrando que a pirólise não promoveu enriquecimento uniforme. A magnitude dessas alterações depende da composição da matéria-prima e das condições do processo térmico (El-Naggar et al., 2019).

Não foram detectados chumbo, cádmio, mercúrio e cromo na biomassa ou no biochar. Esse resultado reduz a preocupação com os metais avaliados, embora a segurança agronômica exija considerar dose, frequência de aplicação e características do solo. Em conjunto, os dados indicam um material rico em carbono, poroso e alcalino, com potencial condicionador, mas cuja composição recomenda avaliação agronômica em doses distintas.

3.3 Crescimento vegetativo

Tabela 3 – Crescimento de *Cannabis sativa* submetida a diferentes doses de biochar aos 30, 60 e 90 dias

Tratamento	Altura (cm)	Diâmetro (mm)	Número de folhas
30 dias			
0%	14,5 ± 1,2 B	1,9 ± 0,6 A	19,3 ± 1,2 A
2,5%	17,5 ± 1,3 A	1,9 ± 0,9 A	18,0 ± 1,7 A
5,0%	17,5 ± 0,6 A	1,8 ± 0,2 A	15,0 ± 4,8 A
7,5%	16,8 ± 1,0 A	1,9 ± 0,7 A	16,0 ± 4,3 A
60 dias			
0%	29,6 ± 3,1 A	4,4 ± 0,3 A	37,0 ± 2,6 A
2,5%	29,3 ± 2,2 A	5,2 ± 1,0 A	43,3 ± 2,4 A
5,0%	25,2 ± 2,3 B	4,0 ± 0,2 A	28,3 ± 2,4 B
7,5%	25,5 ± 1,7 B	4,4 ± 0,9 A	29,8 ± 7,1 B
90 dias			
0%	71,0 ± 5,6 A	9,6 ± 0,6 A	92,3 ± 11,0 A
2,5%	63,5 ± 5,5 A	9,7 ± 0,1 A	92,5 ± 3,8 A
5,0%	68,0 ± 4,3 A	9,9 ± 0,9 A	90,5 ± 9,3 A
7,5%	68,3 ± 2,4 A	9,6 ± 0,5 A	90,0 ± 5,7 A

Médias seguidas pela mesma letra na coluna, dentro de cada época, não diferem pelo teste de Scott-Knott a 5% de probabilidade. Valores apresentados como média ± erro-padrão.

Os efeitos das doses de biochar variaram com o período de avaliação (Tabela 3). Aos 30 dias, os tratamentos com 2,5; 5,0 e 7,5% apresentaram plantas mais altas que o controle, sem diferenças para diâmetro do caule e número de folhas. O incremento inicial pode estar relacionado à melhoria da aeração e da retenção hídrica proporcionada pela estrutura porosa, além da presença de nutrientes associados ao crescimento, como nitrogênio, cálcio e magnésio (Blanco-Canqui, 2017; Marschner, 2012).

Aos 60 dias, as doses de 5,0 e 7,5% reduziram a altura e o número de folhas em relação ao controle e à dose de 2,5%, sem alteração significativa do diâmetro. O pH elevado do material pode ter modificado a disponibilidade de nutrientes em maiores proporções de incorporação. Além disso, a concentração de cinzas e minerais pode alterar a salinidade e a dinâmica iônica do substrato. Assim, atributos benéficos em doses moderadas podem produzir respostas neutras ou negativas quando a quantidade aplicada excede a capacidade tampão do sistema (Schimmelpfennig & Glaser, 2012; Joseph et al., 2021).

A dose de 2,5% apresentou o comportamento mais equilibrado na avaliação intermediária: altura semelhante à testemunha, maior média numérica de diâmetro e maior número de folhas. Esse resultado não significa uma recomendação definitiva, pois o experimento avaliou apenas quatro repetições, uma variedade, um tipo de solo e um ciclo de

cultivo. Entretanto, indica que doses moderadas devem ser priorizadas em estudos posteriores com o material.

Aos 90 dias não houve diferenças entre os tratamentos. O sistema radicular mais desenvolvido pode ter explorado maior volume de solo, reduzindo contrastes iniciais. Além disso, as plantas se encontravam em fase de floração, quando parte dos fotoassimilados é direcionada ao desenvolvimento reprodutivo, diminuindo o ritmo de crescimento vegetativo. Portanto, os efeitos positivos iniciais e as restrições observadas aos 60 dias não se mantiveram até a última avaliação.

Os resultados demonstram que a caracterização do biochar e a avaliação biológica devem ser interpretadas em conjunto. A elevada porosidade e o carbono fixo indicam potencial para condicionamento do solo e permanência de carbono, mas o pH alcalino e as alterações minerais justificam cautela com doses elevadas. A resposta dependente do tempo também reforça que avaliações isoladas podem superestimar ou subestimar o efeito agronômico do material.

4. Conclusões

O caule de *Cannabis sativa* apresentou potencial como matéria-prima para produção de biochar. A pirólise a 500 °C gerou material de baixa densidade, elevada porosidade, caráter alcalino, maior teor de carbono fixo e enriquecimento de cálcio, magnésio, ferro e manganês. Essas características são compatíveis com o uso potencial como condicionador de solo, mas o pH elevado exige adequação da dose ao substrato.

A aplicação influenciou principalmente o crescimento inicial. Todas as doses aumentaram a altura aos 30 dias; aos 60 dias, a dose de 2,5% apresentou desempenho mais equilibrado, enquanto 5,0 e 7,5% reduziram altura e número de folhas. Aos 90 dias não houve diferenças entre os tratamentos. Assim, o efeito foi dependente da dose e do período de avaliação.

O reaproveitamento dos caules para produção de biochar constitui alternativa para agregação de valor aos resíduos e para a economia circular no cultivo medicinal. Estudos futuros devem avaliar doses inferiores e intermediárias, propriedades do solo após a aplicação, crescimento radicular, nutrição mineral, produção de biomassa e qualidade da inflorescência.

5. Agradecimentos

À Associação Tijucanna pela autorização, infraestrutura e apoio à condução do experimento; à Universidade do Estado de Minas Gerais, Unidade Ituiutaba; aos laboratórios

parceiros responsáveis pelas análises; e a todos os colaboradores que contribuíram para a execução do trabalho.

6. Referências bibliográficas

Adhikari, S., Timms, W., & Mahmud, M. A. P. (2022). Optimising water holding capacity and hydrophobicity of biochar for soil amendment: A review. *Science of the Total Environment, 851*, 158043. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.158043

Antal, M. J., & Grønli, M. (2003). The art, science, and technology of charcoal production. *Industrial & Engineering Chemistry Research, 42(8)*, 1619–1640. https://doi.org/10.1021/ie0207919

Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2003). ABNT NBR 11941: Madeira—Determinação da densidade básica.

ASTM International. (1993). ASTM D167-93: Standard test method for apparent and true specific gravity and porosity of lump coke.

ASTM International. (2017). ASTM D5057-17: Standard test method for screening apparent specific gravity and bulk density of waste.

ASTM International. (2019). ASTM E871-82: Standard test method for moisture analysis of particulate wood fuels.

ASTM International. (2021). ASTM D1762-84: Standard test method for chemical analysis of wood charcoal.

Blanco-Canqui, H. (2017). Biochar and soil physical properties. *Soil Science Society of America Journal, 81(4)*, 687–711. https://doi.org/10.2136/sssaj2017.01.0017

Bonini, S. A., Premoli, M., Tambaro, S., Kumar, A., Maccarinelli, G., Memo, M., & Mastinu, A. (2018). Cannabis sativa: A comprehensive ethnopharmacological review of a medicinal plant with a long history. *Journal of Ethnopharmacology, 227*, 300–315. https://doi.org/10.1016/j.jep.2018.09.004

Brasil. Agência Nacional de Vigilância Sanitária. (2026). Anvisa alinha normas a regras de cannabis aprovada em janeiro. https://www.gov.br/anvisa/pt-br/assuntos/noticias-anvisa/2026/anvisa-alinha-normas-a-regras-de-cannabis-aprovada-em-janeiro

Ceretta, M. B., Antic Gorrazzi, S., D'Ippolito, S., Mendieta, J., Nercessian, D., & Bonanni, S. (2025). Cannabis sativa biochar: Characterization and preliminary application in plant growth

and adsorption, and as an electrode material. *RSC Sustainability*, *3*, 1932–1940. https://doi.org/10.1039/D4SU00829D

El-Naggar, A., El-Naggar, A. H., Shaheen, S. M., Sarkar, B., Chang, S. X., Tsang, D. C. W., Rinklebe, J., & Ok, Y. S. (2019). Biochar composition-dependent impacts on soil nutrient release, carbon mineralization, and potential environmental risk: A review. *Journal of Environmental Management*, *241*, 458–467. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.02.044

Glaser, B., Lehmann, J., & Zech, W. (2002). Ameliorating physical and chemical properties of highly weathered soils in the tropics with charcoal: A review. *Biology and Fertility of Soils*, *35*, 219–230. https://doi.org/10.1007/s00374-002-0466-4

Ippolito, J. A., Cui, L., Kammann, C., Wrage-Mönnig, N., Estavillo, J. M., Fuertes-Mendizabal, T., Cayuela, M. L., Sigua, G., Novak, J. M., Spokas, K., & Borchard, N. (2020). Feedstock choice, pyrolysis temperature and type influence biochar characteristics: A comprehensive meta-data analysis review. *Biochar*, *2*, 421–438. https://doi.org/10.1007/s42773-020-00067-x

Joseph, S., Cowie, A. L., Van Zwieten, L., Bolan, N., Budai, A., Buss, W., Cayuela, M. L., Graber, E. R., Ippolito, J. A., Kuzyakov, Y., Luo, Y., Ok, Y. S., Palansooriya, K. N., Shepherd, J., Stephens, S., Weng, Z., & Lehmann, J. (2021). How biochar works, and when it does not: A review of mechanisms controlling soil and plant responses to biochar. *GCB Bioenergy*, *13(11)*, 1731–1764. https://doi.org/10.1111/gcbb.12885

Lehmann, J., & Joseph, S. (Eds.). (2015). *Biochar for environmental management: Science, technology and implementation* (2nd ed.). Routledge.

Marschner, P. (Ed.). (2012). *Marschner's mineral nutrition of higher plants* (3rd ed.). Academic Press.

Schimmelpfennig, S., & Glaser, B. (2012). One step forward toward characterization: Some important material properties to distinguish biochars. *Journal of Environmental Quality*, *41(4)*, 1001–1013. https://doi.org/10.2134/jeq2011.0146

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Efeito dos Extrativos de Espécies do Semiárido Neotropical Sobre o Crescimento *In Vitro* de *Pseudosamanea guachapele*

Rafael Lucas Marassi[1]; William Moreira Rosário de Oliveira[1]; Natane Amaral Miranda Padua[1]; Rosimeire Cavalcante dos Santos[2]; Natália Dias de Souza[1]

[1] Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro
[2] Universidade Federal do Rio Grande do Norte

Resumo: A Caatinga abriga espécies vegetais com elevado potencial químico e biotecnológico. Nesse contexto, o trabalho teve como objetivo investigar o efeito dos extrativos das cascas de duas espécies da Caatinga, *Aspidosperma pyrifolium* e *Cynophalla flexuosa* sobre o crescimento *in vitro* de *Pseudosamanea guachapele*. Os extratos hidrofílicos (metanólicos) foram incorporados ao meio de cultura MS em diferentes concentrações (0; 0,05; 0,1; e 1,0 mg L^{-1}) para avaliar o desenvolvimento de sementes de *P. guachapele*. Os extrativos metanólicos das espécies influenciaram no vigor, número de folhas, clorose e abscisão de folíolos de *P. guachapele*, sendo as doses de 0,05 e 0,1 mg L^{-1} as mais recomendadas. As plantas também apresentaram maior número de folhas quando expostas ao extrativo de *A. pyrifolium*. Os resultados obtidos ampliam o conhecimento sobre a composição química das espécies da Caatinga e evidenciam o potencial de seus extrativos como fontes de compostos bioativos de interesse biotecnológico.

Palavras-chave: Caatinga; Metabólitos Secundários; Potencial Bioativo

Effect of Extractives from Neotropical Semiarid Species on the In Vitro Growth of *Pseudosamanea guachapele*

Abstract: The Caatinga biome harbors plant species with remarkable chemical and biotechnological potential. In this context, this study aimed to investigate the effects of bark extractives from two Caatinga species, *Aspidosperma pyrifolium* and *Cynophalla flexuosa*, on the in vitro growth of *Pseudosamanea guachapele*. Hydrophilic (methanolic) extracts were incorporated into MS culture medium at different concentrations (0, 0.05, 0.1, and 1.0 mg L^{-1}) to evaluate the development of *P. guachapele* seeds. The methanolic extractives influenced seedling vigor, leaf number, chlorosis, and leaflet abscission, with concentrations of 0.05 and 0.1 mg L^{-1} showing the most favorable responses. Seedlings exposed to *A. pyrifolium* extract

also exhibited a greater number of leaves. These findings expand current knowledge regarding the chemical composition of Caatinga species and highlight the potential of their extractives as sources of bioactive compounds with promising biotechnological applications.

Keywords: Caatinga; Secondary Metabolites; Bioactive Potential.

1. Introdução

Caracterizada por um clima semiárido, a Caatinga apresenta uma vegetação adaptada às condições de altas temperaturas e longos períodos de seca. Nesse ambiente predominam plantas de pequeno porte, como cactos e arbustos espinhosos, que desenvolveram estratégias para sobreviver à escassez de água. Exclusivamente brasileiro, esse bioma ocupa 10,1% do território nacional, concentrando-se principalmente na região Nordeste, e é considerado o bioma menos conhecido do país, devido à escassez de coletas no mesmo (MMA, 2024; Melo & Carneiro, 2021). Além disso, a Caatinga abriga uma rica diversidade de fauna, com espécies endêmicas, que se adaptaram ao ecossistema severo e variado. A Caatinga é um dos biomas mais singulares do Brasil, apresentando uma complexidade ecológica que permite à sua fauna e flora desenvolverem adaptações específicas, com um metabolismo intenso de substâncias químicas essenciais para a sobrevivência (ISPN, 2024; Assad, 2024).

O bioma enfrenta desafios significativos, como o desmatamento e a degradação do solo, que têm sido acelerados pela expansão de atividades agrícolas e pela exploração madeireira ilegal. A seca prolongada, por sua vez, agrava ainda mais a vulnerabilidade do bioma, que passa por um extenso processo de alteração e deterioração ambiental, impactando tanto a fauna quanto a flora (Assad, 2024). O estudo da Caatinga, com suas características ambientais e culturais, é essencial para a compreensão da complexidade do Nordeste brasileiro e para o desenvolvimento de estratégias de manejo que promovam a conservação desse bioma vital às comunidades que vivem em sua proximidade (Melo, et al., 2023).

Entre as diversas espécies que ocorrem naturalmente na Caatinga, destacam-se a *Cynophalla flexuosa* (L.) J.Presl, conhecida popularmente como Feijão-bravo, e a *Aspidosperma pyrifolium* Mart., popularmente denominada Pereiro, que possuem um importante valor regional, por serem associadas ao fornecimeno de madeira para carpintaria, carvão vegetal e lenha; de forragem para gado; e de recurcos medicinais, utilizados pelos moradores locais (Santos *et al*., 2009; Pereira *et al*., 2014; Souza *et al*., 2021).

Os extrativos, formados a partir de alterações nos carboidratos durante processos fisiológicos das plantas, exercem um papel fundamental na caracterização das espécies. Dentre as diversas estruturas vegetais passíveis de aproveitamento para a obtenção de extrativos, a casca destaca-se por sua elevada diversidade química. Nessa estrutura, encontram-se compostos de baixo peso molecular, tais como fenóis, ácidos graxos, álcoois e terpenos. Além disso, a casca apresenta classes de substâncias que ocorrem em menores concentrações ou são ausentes na madeira, como os taninos condensados (Oliveira; Salatino, 2023).

A investigação de extrativos é fundamental, considerando sua significância comercial em áreas como alimentos, agricultura, perfumaria e, especialmente, na indústria farmacêutica, onde constituem princípios ativos de inúmeros medicamentos (Oliveira; Salatino, 2023). A análise dos extrativos de espécies do semiárido neotropical representa uma oportunidade para caracterizar e isolar metabólitos, oferecendo valiosas contribuições para a descoberta de novas substâncias (Santos, 2016).

Dentre essas novas descobertas pode-se destacar o efeito dos extrativos sobre o crescimento *in vitro*. O cultivo *in vitro* de plantas, apesar de ser uma ferramenta muito promissora na produção em massa de plantas livres de doenças, ainda é um processo que causa algum estresse às plantas, e precisa ser trabalhado de forma específica para cada material vegetal (Miranda et al., 2020). O uso de extrativos vegetais pode potencializar o crescimento de plantas *in vitro* (Silva et al., 2025).

Com isso, o objetivo deste trabalho foi investigar o efeito dos extrativos das cascas de *Aspidosperma pyrifolium* (pereiro) e *Cynophalla flexuosa* (feijão-bravo), sobre o crescimento *in vitro* de *Pseudosamanea guachapele*.

2. Material e métodos

2.1 Coleta das amostras

As amostras de Pereiro e Feijão-bravo utilizadas neste estudo foram coletadas em talhões localizados na Fazenda Milhã, situada no estado do Rio Grande do Norte (RN), nas coordenadas 5°35’47,3’’ S e 35°51’59,6’’ W. A fazenda possui área total composta por 1.132,78 ha sendo composta por 60% de vegetação nativa de Caatinga submetida ao manejo florestal sustentável (Menezes, 2025).

Foram selecionados e abatidos três indivíduos de cada uma das espécies (Feijão-bravo e

Pereiro). De cada árvore foram retirados discos nas posições correspondentes a 0 %, 25 %, 50 %, 75 % e 100 % da sua altura comercial. Posteriormente, a madeira foi separada da casca, permitindo a obtenção de amostras independentes para a realização das análises.

2.2 Preparação das amostras

As cascas foram moídas no moinho tipo Willey. O material moído foi peneirado, sendo a fração retida na malha 60 mesh utilizada para o preparo das amostras.

2.3 Preparo dos extrativos

Colocou-se 10 g da amostra peneirada, homogeneizada, em cartuchos de papel filtro e em seguida foi submetida a três extrações sucessivas com ciclo hexano, acetato de etila e metanol por 12 horas em aparelho soxhlet, utilizando-se 250 ml de cada solvente por extração.

Após o processo em Soxhlet, a mistura de solvente e extrato foi submetida à destilação sob pressão reduzida em evaporador rotativo (Rotavapor), visando a obtenção da solução concentrada. Posteriormente, os extratos concentrados foram transferidos para recipientes de vidro e mantidos em capela de exaustão até a completa evaporação dos solventes residuais.

2.4 Avaliação do crescimento *in vitro* de *Pseudosamanea guachapele*

Para a avaliação do crescimento *in vitro* foi utilizado o extrato obtido na extração com metanol. Para inoculação das sementes de *P. guachapele*, foi utilizado o meio MS (Murashige & Skoog, 1962), com 0,1 g L^{-1} de mio-inositol, 0,8 g L^{-1} de PVP, 20 g L^{-1} de sacarose e 6,5 g L^{-1} de ágar, ajustando-se o pH para 5,7 ± 0,1. A esses meios foram adicionados os extratos hidrofílicos (metanólicos) das cascas de pereiro e feijão-bravo nas concentrações de 0; 0,05; 0,1; e 1,0 mg L^{-1}.

Antes da inoculação das sementes, todos os frascos contendo 30 mL de meio de cultura e as distintas concentrações dos extrativos foram esterilizados em autoclave a 120 °C por 20 minutos, sob pressão de 1 atm, a fim de garantir a completa assepsia dos materiais. As sementes de *P. guachapele* utilizadas no experimento foram fornecidas pelo Laboratório de Biologia Reprodutiva e Conservação de Espécies Arbóreas (LACON), vinculado ao Departamento de Silvicultura da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro. O material vegetal empregado consistiu em sementes previamente submetidas à desinfestação química com ácido sulfúrico

(98 %) por 10 minutos. Posteriormente, em câmara de fluxo laminar, as sementes foram lavadas três vezes com água destilada autoclavada, visando à remoção dos resíduos do agente químico e à manutenção das condições assépticas para a condução do experimento.

Cada frasco de cultivo recebeu duas sementes e estes permaneceram em sala de cultura com temperatura (25±2°C) e fotoperíodo (16h) controlados, até a sua avaliação. Aos 24 dias de cultivo, foram avaliadas a taxa de contaminação, germinação, vigor, o número de folhas, a presença de clorose e a abscisão de folíolos de todas as amostras.

2.5 Análise de dados

Para a condução da análise do crescimento *in vitro*, adotou-se o delineamento inteiramente casualizado (DIC) fatorial 2x4, com extrativos de duas espécies e quatro concentrações, 10 repetições, sendo cada repetição um frasco de cultivo contendo duas sementes. Os resultados obtidos foram submetidos à análise de variância (ANOVA) e análise de regressão, utilizando-se o software R versão 4.5.3 (R Core Team, 2026) e o pacote ExpDes (Ferreira et al., 2014). A significância foi verificada pelo teste F a 5 % de probabilidade. Nos casos em que a ANOVA indicou efeito significativo, realizou-se a análise de regressão por meio do desdobramento em modelos lineares e quadráticos. A seleção do modelo ajustado baseou-se na significância dos coeficientes, no teste de desvios de regressão e no valor do coeficiente de determinação (R^2). Para as variáveis que não apresentaram efeito significativo, a interpretação dos resultados foi conduzida com base no comportamento das médias dos tratamentos.

3. Resultados e discussão

O vigor das plântulas, a clorose e o número de folíolos abscindidos foram influenciados significativamente pela concentração de extrativo utilizado, independente da espécie de origem do extrativo. A característica número de folhas foi influenciada pela origem do extrativo (espécie) e pela concentração utilizada. A interação dos fatores espécie e concentração não foi significativa para nenhuma das características avaliadas, indicando que os efeitos dos fatores ocorreram de forma independente (Tabela 1).

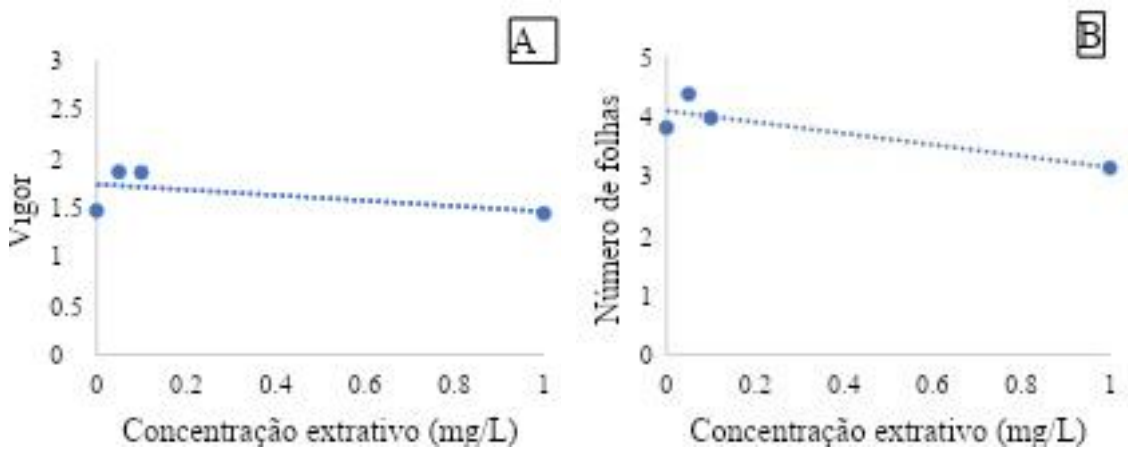
A germinação e contaminação das sementes não apresentaram diferenças estatística entre os tratamentos. Houve germinação de 100% das sementes do teste e a taxa de contaminação foi de 28,7%.

Tabela 1. Resultado da análise de variância para a taxa de contaminação, vigor, número de folhas, clorose e abscisão de folíolos, a partir de sementes de *Pseudosamanea guachapele* inoculadas *in vitro* em função do fator espécie e concentração de extrativos, 24 dias após a inoculação.

Variável	***P***		
	Espécie	**Concentração**	**Espécie x Concentração**
Contaminação	0,2106^{ns}	0,2962^{ns}	01069^{ns}
Vigor	05189^{ns}	0,0065*	0,2359^{ns}
Número de folhas	0,0408*	0,0335*	0,2985^{ns}
Clorose	0,6978^{ns}	0,0229*	0,2521^{ns}
Abscisão de folíolos	0,5992^{ns}	0,0066*	0,4564^{ns}

P: probabilidade do valor P; *: p<0,05; ns: p≥0,05.

Para a característica vigor das plântulas, houve ajuste de um modelo quadrático, enquanto para as variáveis número de folhas, clorose e abscisão de folíolos observou-se ajuste de modelos lineares (Figura 1). O vigor das plantas foi superior nas concentrações 0,05 e 0,1 mg L^{-1}, com o ponto de máximo do modelo na concentração 0,49 mg L^{-1} (Figura 1A). O número de folhas diminuiu com o aumento da concentração dos extrativos (Figura 1B), e a clorose e abscisão de folíolos foram mais expressivas com o aumento das concentrações dos extrativos (Figuras 1C e 1D). As concentrações 0,05 e 0,1 mg L^{-1} de extrativo de casca de pereiro e feijão bravo permitiram obter plantas *in vitro* mais vigorosas e com mais folhas, enquanto o uso dos extrativos em maior concentração permitiu observar plantas mais cloróticas e maior abscisão de folíolos.



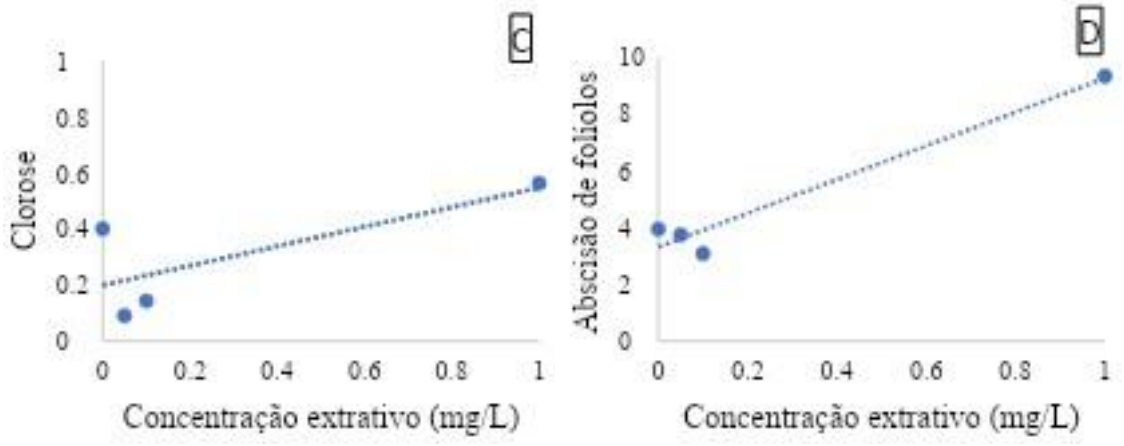


Figura 1. Modelos ajustados para vigor (A), número de folhas (B), clorose (C) e abscisão de folíolos (D) em função da concentração de extrativo no meio de cultura para crescimento de sementes de *Pseudosamanea guachapele*, aos 24 dias de cultivo.

A origem do extrativo (espécie) influenciou apenas no número de folhas emitidas pelas plantas *in vitro*. Quando se utilizou extrativo da casca de pereiro, a média do número de folhas foi de 4,1, enquanto com o uso de extrativo da casca de feijão bravo a média de número de folhas foi de 3,5.

A adição dos extrativos no meio de cultura não aumentou ou reduziu a taxa de contaminação, embora já tenha trabalhos, como o de Gomes et al. (2018), que mostram que grandes concentrações de extratos vegetais metanólicos de espécies como a canela possuem efeito inibitório sobre fungos, sendo 20 mg L^{-1} a concentração mais recomendada. As concentrações utilizadas no presente trabalho podem ser consideradas baixas para observar efeito inibitório em microrganismos, sendo necessários novos testes direcionados a este objetivo para afirmativas sobre o efeito antibiótico dos extrativos utilizados.

Para as demais variáveis observadas foi possível identificar que a maior concentração utilizada (1,0 mg L^{-1}) causou efeitos semelhantes ou negativos nas plântulas em comparação a dose controle, sem presença de extrativos, enquanto as doses de 0,05 e 0,1 mg L^{-1} se mostraram mais promissoras em comparação com a dose controle (Figura 1). Estudos com extratos vegetais já descreveram esse efeito dependente da dose, nos quais variados compostos interferem no metabolismo primário e no balanço hormonal, alterando o crescimento de plântulas, podendo atuar como promotores de crescimento *in vitro* principalmente em doses reduzidas (Małkowski et al., 2020)

A intensificação da abscisão dos folíolos, a clorose e a redução do vigor das plântulas

evidenciaram um padrão de fitotoxicidade dependente da dose, comportamento relatado em estudos de propagação que utilizam extratos vegetais (Faria, 2009; Saboia, 2018). De acordo com a Embrapa (2014) esses sintomas podem ser causados pelos compostos fenólicos e outros metabólitos secundários encontrados nos extrativos das plantas utilizadas, capazes de interferir no equilíbrio hormonal das plântulas e na síntese proteica.

Com o uso de doses reduzidas dos extrativos não foi observada redução de germinação, nem aumento da contaminação e foi possível obter maior vigor e maior número de folhas, indicando que há possibilidade de ganhos de crescimento *in vitro* com o uso dos extrativos da casca de pereiro e de feijão bravo. Conhecer o efeito destes compostos em outras concentrações e em outras fases da micropropagação podem auxiliar no entendimento do efeito morfogênico dos compostos e no entendimento da potencialidade de uso destes no cultivo de plantas *in vitro*.

4. Conclusões

Os extrativos de casca de pereiro e feijão-bravo influenciaram no crescimento *in vitro* da espécie *P. guachapele* para as variáveis vigor, número de folhas, clorose e abscisão de folíolos. As respostas são influenciadas principalmente pela concentração de extrativo utilizada, sendo as menores concentrações, 0,05 e 0,1 mg L^{-1}, responsáveis pelas melhores respostas de crescimento. O fator espécie foi menos significativo que o fator concentração, e o extrativo de pereiro apresentou desempenho superior ao de feijão-bravo apenas para a variável número de folhas. O conhecimento sobre à composição química das espécies do semiárido neotropical evidenciam o potencial dos seus extrativos como fontes de compostos bioativos de interesse biotecnológico.

5. Agradecimento

À Fundação Carlos Chagas Filho de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro (Faperj) pelo apoio financeiro (Bolsa Iniciação Científica).

6. Referências bibliográficas

Assad, M. L. L. (2024). *Caatinga: o bioma exclusivamente brasileiro*. FGV Agro, Observatório de Bioeconomia.

Brasil. Ministério do Meio Ambiente. (2024). *Caatinga*. https://www.gov.br/mma/pt-br/assuntos/ecossistemas-1/biomas/caatinga

Embrapa. (2014). *Fisiologia do estresse em plantas*. Embrapa Agropecuária Oeste. https://www.embrapa.br

Faria, M. F. (2009). Potencial alelopático de extratos vegetais sobre a germinação e desenvolvimento inicial de plântulas. *Revista Científica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia*, *5*(2), 45–53.

Ferreira, E. B., Cavalcanti, P. P., & Nogueira, D. A. (2014). ExpDes: An R package for ANOVA and experimental designs. *Applied Mathematics*, *5*(19), 2952–2958.

Gomes, E. M. C., Firmino, A. V., Pena, R. da C. M., & Almeida, S. S. M. da S. de. (2018). Efeito inibitório in vitro de extratos de Cinnamomum zeylanicum BLUME no controle de Cylindrocladium candelabrum. *Ciência Florestal*, *28*(4), 1559–1567.

Instituto Sociedade, População e Natureza (ISPN). (2024). *Caatinga, o único bioma 100% brasileiro*. Cerratinga. https://www.cerratinga.org.br/biomas/caatinga/

Malkowski, E., et al. (2020). Hormesis in plants: The role of oxidative stress, auxins and photosynthesis in corn treated with Cd or Pb. *International Journal of Molecular Sciences*, *21*(6), 2099.

Melo, M. L. A., & Carneiro, M. C. (2021). Florística e fenologia de dez espécies do extrato arbustivo-arbóreo em torno do Apiário-Escola da Universidade Estadual de Alagoas (UNEAL). *Diversitas Journal*, *6*(1), 1748–1776.

Melo, O. J., et al. (2023). A Caatinga: um bioma exclusivamente brasileiro. *Ciência e Cultura*, *75*(4).

Menezes, B. X. (2025). *Potencial bioativo dos extrativos da casca de espécies do gênero Mimosa no crescimento in vitro de Leucaena leucocephala* [Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro].

Miranda, N. A., et al. (2020). Quality and intensity of light in the in vitro development of microstumps of Eucalyptus urophylla in a photoautotrophic system. *Forest Science*, *66*(6), 754–760.

Murashige, T., & Skoog, F. (1962). A revised medium for rapid growth and bioassays with tobacco tissue cultures. *Physiologia Plantarum*, *15*, 473–497.

Oliveira, L. R., & Salatino, M. L. F. (2023). *Constituintes da casca externa de plantas do cerrado e suas atividades biológicas* [Tese de doutorado, Universidade de São Paulo].

Pereira Júnior, L. R., Andrade, A. P. D., Araújo, K. D., Barbosa, A. D. S., & Barbosa, F. M. (2014). Espécies da caatinga como alternativa para o desenvolvimento de novos fitofármacos. *Floresta e Ambiente*, *21*(4), 509–520.

R Core Team. (2026). *R: A language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing.

Saboia, G. C. (2018). Atividade alelopática de extratos foliares sobre a germinação e o vigor de plântulas. *Revista Ciência Agronômica*, *49*(1), 123–131.

Santos, A. P. B., Nascimento, M. F. S., & Santos, F. S. E. (2009). *Guia de campo de árvores da caatinga* (Vol. 1). Pernambuco.

Santos, S. P. D. D. (2016). *Alcaloides indólicos de Aspidosperma pyrifolium: estudo fitoquímico e dados espectroscópicos* [Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Norte].

Silva, C. D. D., Souza, A. B. C. D., Sampaio, D. A., Souza, N. D. D., Pádua, N. A. M., & Carvalho, A. M. D. (2025). Caracterização fitoquímica dos resíduos do beneficiamento da noz da macadâmia (Macadamia integrifolia) visando à aplicação dos seus extrativos no crescimento in vitro de Adenanthera pavonina L. *Revista Brasileira de Gestão Ambiental e Sustentabilidade*, *12*(31), 885–899.

Souza, E. M., Pereira, E. B. S. S., & Miranda, I. S. (2021). Capparaceae (Feijão-bravo). In E. M. Souza (Org.), *Plantas da Caatinga: um olhar multidisciplinar* (pp. 94–98). IFSertãoPE.

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Eficiência dos taninos de *Acacia mearnsii* De Wild. e *Eucalyptus cloeziana* F. Muell. no tratamento terciário de efluente de kraft

Kézia Ellen Souza Bomfim[1]; Ariane Mateus de Souza [1]; Thaynara Silva Vieira[1]; Nicolle de Filippo Brumano[1]; Pedro Henrique Elias da Silva[1]; Taís Aparecida das Neves Custódio[1]; Luís Eduardo do Nascimento[1]; João Gilberto Meza Ucella-Filho[1]

[1] Universidade Federal de Viçosa 01

Resumo: O tratamento terciário de efluentes da indústria de celulose kraft é essencial para remover poluentes residuais, viabilizar o reuso do efluente e minimizar impactos ambientais. Este estudo avaliou a eficiência dos taninos em pó de acácia-negra (*Acacia mearnsii*) e eucalipto cloeziana (*Eucalyptus cloeziana*) como coagulantes orgânicos no tratamento terciário de efluente da indústria de celulose kraft. Os ensaios de coagulação-floculação foram realizados em triplicata em jar test com dosagens de 200, 400, 600 e 800 mg L^{-1} de cada tanino. A eficiência foi avaliada pela remoção da cor aparente e da turbidez, pela variação da DQO e pelas alterações de pH do sobrenadante. O tanino de acácia-negra apresentou melhor desempenho, com eficiência máxima de remoção de cor de 60,8% e de turbidez de 13,0% na dosagem de 600 mg L^{-1}, além de baixa influência sobre o pH. Entretanto, houve aumento da DQO, possivelmente devido à natureza orgânica do tanino. Já o tanino de eucalipto cloeziana apresentou baixo potencial como coagulante, visto que promoveu aumento de até 302,5% na cor aparente, 289,6% na turbidez e 360,7% na DQO na dosagem de 800 mg L^{-1}. Os resultados obtidos destacam o potencial do tanino de acácia-negra como alternativa sustentável aos coagulantes inorgânicos no tratamento terciário de efluente de celulose kraft, bem como demonstram que a eficiência dos coagulantes à base de tanino depende da espécie vegetal utilizada.

Palavras-chave: Indústria de celulose; Coagulantes Orgânicos; Cor Aparente.

Efficiency of *Acacia mearnsii* and *Eucalyptus cloeziana* tannins in the tertiary treatment of kraft effluent

Abstract: Tertiary treatment of kraft pulp industry effluents is essential to remove residual pollutants, enable effluent reuse, and minimize environmental impacts. This study evaluated the efficiency of powdered tannins from black wattle (*Acacia mearnsii*) and *Eucalyptus cloeziana* as organic coagulants for the tertiary treatment of kraft pulp industry effluent. Coagulation-flocculation tests were performed in triplicate using a jar test with dosages of 200, 400, 600, and 800 mg L^{-1} of each tannin. The efficiency was evaluated based on apparent color and turbidity removal, COD variation, and changes in the pH of the supernatant. Black wattle tannin showed the best performance, with maximum removal efficiencies of 60.8% for apparent color and 13.0% for turbidity at a dosage of 600 mg L^{-1}, while having little influence on pH. However, an increase in COD was observed, possibly due to the organic nature of the tannin. In contrast, *Eucalyptus cloeziana* tannin showed low potential as a coagulant, promoting increases of up to 302.5% in apparent color, 289.6% in turbidity, and 360.7% in COD at a dosage of 800 mg L^{-1}. The results highlight the potential of black wattle tannin as a sustainable alternative to inorganic coagulants for the tertiary treatment of kraft pulp industry effluent and demonstrate that the efficiency of tannin-based coagulants depends on the plant species used.

Keywords: Pulp Industry; Organic Coagulants; Apparent Color.

1. Introdução

A indústria de celulose ocupa um papel de destaque na economia florestal brasileira. Segundo a Indústria Brasileira de Árvores (Ibá, 2025), o Brasil produziu cerca de 25,5 milhões de toneladas de celulose em 2024, com 18,6 milhões de toneladas destinadas ao mercado externo, consolidando-se como o maior exportador mundial de celulose. Dentre os processos de produção, o processo kraft é o mais adotado no Brasil devido à sua elevada eficiência na obtenção de fibras celulósicas (Mboowa, 2024).

Apesar de sua importância econômica, a produção de celulose demanda grandes volumes de água, com um consumo entre 20 e 50 m^3 por tonelada de celulose (Sousa *et al*., 2023). Como consequência desse elevado consumo hídrico, são gerados grandes volumes de efluentes, uma vez que grande parte da água empregada no processo industrial se torna efluente. Esses efluentes apresentam elevada carga orgânica decorrente da presença de lignina, carboidratos e extrativos da madeira, além de produtos químicos utilizados nas etapas de produção, como o cozimento, a lavagem e o branqueamento da polpa (Ramos *et al*., 2022).

O tratamento de efluentes da indústria de celulose tradicionalmente utilizado é composto pelas etapas de pré-tratamento, tratamento primário e tratamento secundário. No tratamento primário, são removidos os sólidos suspensos, enquanto o tratamento secundário, também denominado biológico, utiliza microrganismos para reduzir a carga orgânica do efluente. Após o tratamento convencional, o efluente pode ser submetido a tratamento terciário, com o objetivo de melhorar suas características, promovendo a remoção de cor, turbidez, compostos recalcitrantes e matéria orgânica residual. Além de contribuir para o atendimento aos padrões estabelecidos pela Resolução CONAMA n° 430/2011 (Brasil, 2011), o tratamento terciário viabiliza o reuso do efluente tratado e reduz impactos ambientais associados ao lançamento em corpos hídricos (Ramos *et al*., 2022).

Entre as tecnologias empregadas no tratamento terciário, destaca-se o processo de coagulação-floculação, no qual são utilizados coagulantes para promover a desestabilização e agregação das partículas em suspensão e coloides, facilitando sua remoção. O sulfato de alumínio ($Al_2(SO_4)_3$) é um dos coagulantes inorgânicos mais tradicionais e amplamente utilizados no tratamento de água e efluentes, devido à sua eficiência e baixo custo. Entretanto, sua aplicação apresenta limitações, como a necessidade de ajuste de pH, a geração de elevado

volume de lodo contendo alumínio residual e possíveis restrições quanto ao seu aproveitamento agrícola, uma vez que o acúmulo desse elemento pode causar fitotoxicidade às culturas e reduzir a disponibilidade de fósforo no solo (Loganathan *et al*., 2024). Diante desse cenário, os coagulantes orgânicos à base de taninos apresentam-se como uma alternativa promissora, pois são provenientes de fontes renováveis e biodegradáveis. Diferentemente dos coagulantes inorgânicos metálicos, eles evitam a incorporação de sais metálicos ao lodo gerado no processo de coagulação, resultando em um resíduo biodegradável, cujo potencial de aplicação agrícola deve ser avaliado mediante caracterização especifica, considerando as características do efluente tratado. Além disso, tendem a causar menor alteração do pH do meio, reduzindo a necessidade de correção de pH (Tomasi *et al*., 2022).

Diante do exposto, este trabalho teve como objetivo avaliar a eficiência de taninos em pó de acácia-negra (*Acacia mearnsii*) e eucalipto cloeziana (*Eucalyptus cloeziana*) como coagulantes no tratamento terciário de efluente de celulose kraft, em diferentes concentrações, considerando os parâmetros de cor aparente, turbidez, pH e demanda química de oxigênio (DQO), buscando determinar a dosagem mais eficiente para cada tanino.

2. Material e métodos

1.1. Coleta e armazenamento do efluente

O efluente secundário utilizado no estudo foi coletado na indústria de celulose kraft, localizada no município de Belo Oriente, Minas Gerais. A amostra corresponde à saída do tratamento secundário (biológico) da estação de tratamento de efluentes (ETE) da indústria. Após a coleta, o efluente foi acondicionado em recipientes de polietileno e mantido sob refrigeração em câmara fria a 4°C e na ausência de luz até o momento da realização das análises laboratoriais.

1.2. Preparação da solução de tanino

Foram utilizados como coagulantes orgânicos taninos em pó extraídos das cascas de *Acacia mearnsii* e de *Eucalyptus cloeziana,* obtidos por meio de parceria com uma empresa do setor florestal especializada na produção e comercialização de taninos vegetais. Para o preparo da solução estoque utilizada nos ensaios de coagulação, os taninos em pó foram solubilizados em água deionizada na concentração de 2,5% (m/v).

1.3. Ensaio de coagulação em Jar Test

Os testes de coagulação-floculação foram realizados no equipamento jar test (modelo 218/LDB 06 Nova Ética), utilizando 2000 mL de efluente em cada unidade experimental, e avaliando quatro dosagens para cada tanino: 200, 400, 600 e 800 mg L^{-1}. Os experimentos foram

conduzidos em triplicata, sob as seguintes condições operacionais: agitação rápida a 270 rpm por 30 s, agitação lenta a 50 rpm por 20 min e decantação por 20 min. Após a sedimentação, alíquotas do sobrenadante foram coletadas para a determinação dos parâmetros de cor aparente, turbidez, pH e demanda química de oxigênio (DQO), conforme os procedimentos descritos no *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (APHA, AWWA, WEF, 2023).

1.4. Determinação da cor aparente

A determinação da cor aparente foi realizada pelo método espectrofotométrico na escala Platina-Cobalto (Pt-Co), conforme o método 2120 C (APHA, AWWA, WEF, 2023), utilizando um espectrofotômetro Hach, modelo DR 2800. A cor aparente representa a coloração da amostra resultante da presença de substâncias dissolvidas e de partículas em suspensão.

1.5. Determinação da turbidez

A determinação da turbidez foi realizada pelo método nefelométrico, conforme o método 2130 B (APHA, AWWA, WEF, 2023), baseado na medição da intensidade da luz espalhada por partículas em suspensão na amostra. Os resultados foram expressos em UNT (Unidades Nefelométricas de Turbidez), utilizando um turbidímetro Hach, modelo 2100Q.

1.6. Determinação do potencial hidrogeniônico (pH)

A determinação do pH foi realizada pelo método potenciométrico, conforme o método 4500-H^+ B (APHA, AWWA, WEF, 2023), baseado na medição da diferença de potencial elétrico em função da atividade de íons de hidrogênio (H^+), utilizando um multiparâmetro Hach, modelo HQ40d.

1.7. Determinação da demanda química de oxigênio (DQO)

A determinação da DQO foi realizada pelo método de refluxo fechado com leitura colorimétrica, conforme o método 5220 D (APHA, AWWA, WEF, 2023), utilizando um espectrofotômetro Hach, modelo DR 2800. A DQO corresponde a uma medida indireta de matéria orgânica presente na amostra, expressa como a quantidade de oxigênio equivalente (O_2) consumida durante a oxidação por dicromato de potássio ($K_2Cr_2O_7$) em meio ácido.

1.8. Análise de dados

Os dados brutos obtidos nos ensaios foram tabulados e processados por meio do software Microsoft Excel (versão 2021), no qual foram calculadas as médias e os desvios-padrão das determinações realizadas em triplicata, permitindo a comparação entre as diferentes dosagens e as duas espécies de tanino avaliadas. Os resultados foram apresentados na forma de tabelas. Os valores de cor aparente, turbidez, pH e DQO foram mantidos em seus valores de

medição, a partir dos quais foi calculada a eficiência de remoção (%) em relação à amostra-controle.

3. Resultados e discussão

Os resultados analíticos obtidos no tratamento terciário do efluente de celulose kraft utilizando os taninos em pó de *Acacia mearnsii* são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 – Resultados analíticos do tratamento terciário do efluente de celulose kraft com tanino de *Acacia mearnsii* em pó

Dose (mg L^{-1})	Cor aparente (mg L^{-1} Pt-Co)	DQO (mg L^{-1} O_2)	Turbidez (UNT)	pH
Efluente	645 ± 2,0	216,5 ± 0,9	5,09 ± 0,03	7,36 ± 0,01
200	384 ± 1,0	226,5 ± 0,0	5,84 ± 0,02	7,14 ± 0,02
400	288 ± 3,6	224,2 ± 0,3	6,63 ± 0,70	7,03 ± 0,02
600	253 ± 3,1	239,0 ± 5,0	4,43 ± 0,08	7,24 ± 0,04
800	280 ± 5,0	265,7 ± 1,4	5,04 ± 0,03	7,16 ± 0,01

A partir das determinações analíticas, foram calculadas as eficiências percentuais de remoção em relação ao efluente afluente ao tratamento terciário, conforme apresentado na Tabela 2.

Tabela 2 – Eficiência de remoção (%) dos parâmetros avaliados no tratamento terciário do efluente de celulose kraft com tanino de *Acacia mearnsii* em pó

Dose (mg L^{-1})	Cor aparente (%)	DQO (%)	Turbidez (%)
200	40,5	-4,6	-14,7
400	55,3	-3,6	-30,3
600	60,8	-10,4	13,0
800	56,6	-22,7	1,0

Valores negativos indicam aumento do parâmetro após o tratamento.

Conforme apresentado na Tabela 1 e 2, observa-se que o tanino da *Acacia mearnsii* mostrou-se eficiente na clarificação do efluente com o aumento da remoção até a dosagem de 600 mg L^{-1}. Os resultados da Tabela 1 evidenciam a redução da cor aparente de 645 para 253 mg L^{-1} Pt-Co na dosagem 600 mg L^{-1}. Conforme a Tabela 2, a eficiência variou de 40,5% na concentração de 200 mg L^{-1} para uma eficiência máxima de 60,8% na dosagem de 600 mg L^{-1}, sugerindo que o incremento da dosagem pode ter favorecido a desestabilização e agregação das partículas responsáveis pela coloração do efluente. Contudo, na dosagem de 800 mg L^{-1} observou-se redução da eficiência de remoção em relação à dose anterior, diminuindo para 56,6%. Esse comportamento pode estar associado ao fenômeno de reestabilização coloidal, no qual a sobredosagem do coagulante promove a inversão da carga eletroestática das partículas, reduzindo a eficiência do processo de coagulação-floculação (Leiviskä & Santos, 2023).

Por outro lado, para a DQO, embora tenha sido observada uma discreta redução nos valores apresentados na Tabela 1 entre as dosagens de 200 e 400 mg L^{-1} (226,5 e 224,2 mg L^{-1} O_2, respectivamente), os valores permaneceram próximos, indicando comportamento semelhante. A partir de 600 mg L^{-1}, verificou-se aumento mais pronunciado da DQO, atingindo 265,7 mg L^{-1} O_2 na dosagem de 800 mg L^{-1}, o que corresponde a um aumento de 22,7% em relação ao efluente inicial, conforme apresentado na Tabela 2. Esse comportamento pode estar relacionado à natureza orgânica do tanino, de modo que parte dos compostos orgânicos que não foi incorporada aos flocos no processo de coagulação-floculação permaneceu no sobrenadante, contribuindo para o aumento da matéria orgânica residual (Tomasi *et al*., 2022).

Em relação à turbidez, as variações observadas entre as dosagens foram pequenas e não apresentaram uma tendência definida. Na Tabela 1, o aumento apresentado pelas dosagens de 200 e 400 mg L^{-1} (5,8 UNT e 6,6 UNT) pode estar relacionado à permanência das partículas floculadas em suspensão durante o processo de coagulação-floculação. A menor turbidez foi obtida na dosagem de 600 mg L^{-1}, correspondendo a uma remoção de 13,0% em relação ao efluente inicial, conforme apresentado na Tabela 2. Entretanto, na dosagem de 800 mg L^{-1}, a eficiência de remoção da turbidez reduziu para 1,0%, o que pode estar associado ao fenômeno de reestabilização coloidal decorrente da sobredosagem do coagulante (Leiviskä & Santos, 2023).

Quanto ao pH, analisando a Tabela 1, não foram observadas variações expressivas, com os valores permanecendo entre 7,03 e 7,24 em todas as dosagens avaliadas. Esse comportamento demonstra que o coagulante à base de tanino da acácia-negra apresentou baixa influência sobre o pH do meio, o que a literatura aponta como uma potencial vantagem operacional em relação aos coagulantes inorgânicos convencionais, que frequentemente demandam correção do pH após o tratamento devido ao consumo de alcalinidade (Mohd-Salleh *et al*., 2021).

Os resultados analíticos obtidos no tratamento terciário do efluente de celulose kraft utilizando os taninos em pó de *Eucalyptus cloeziana* são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 – Resultados analíticos do tratamento terciário do efluente de celulose kraft com tanino de *Eucalyptus cloeziana* em pó

Dose (mg L^{-1})	Cor aparente (mg L^{-1} Pt-Co)	DQO (mg L^{-1} O_2)	Turbidez (UNT)	pH
Efluente	600 ± 2,0	219,0 ± 0,5	2,60 ± 0,01	7,67 ± 0,01
200	1255 ± 5,0	437,3 ± 7,2	2,64 ± 0,02	7,52 ± 0,01
400	1612 ± 10,0	662,3 ± 1,4	4,17 ± 0,01	7,48 ± 0,01

600	1728 ± 16,0	685,3 ± 27,4	5,86 ± 0,10	7,46 ± 0,02
800	2415 ± 28,0	1009,0 ± 6,6	10,13 ± 0,31	7,45 ± 0,01

A partir das determinações analíticas, foram calculadas as eficiências percentuais de remoção em relação ao efluente afluente ao tratamento terciário, conforme apresentado na Tabela 4.

Tabela 4 – Eficiência de remoção (%) dos parâmetros avaliados no tratamento terciário do efluente de celulose kraft com tanino de *Eucalyptus cloeziana* em pó

Dose (mg L^{-1})	Cor aparente (%)	DQO (%)	Turbidez (%)
200	-109,2	-99,7	-1,5
400	-168,7	-202,4	-60,4
600	-188,0	-212,9	-125,4
800	-302,5	-360,7	-289,6

Valores negativos indicam aumento do parâmetro após o tratamento.

Em contrapartida, os resultados da utilização de tanino de *Eucalyptus cloeziana* (Tabela 3) não apresentaram desempenho satisfatório como coagulante nas condições avaliadas. Com o aumento da dosagem do coagulante, observou-se aumento pronunciado da cor aparente, da turbidez e da DQO. A cor passou de 600 mg L^{-1} Pt-Co no efluente inicial para 2415 mg L^{-1} Pt-Co na dosagem de 800 mg L^{-1}, o que corresponde a um aumento de 302,5% em relação ao efluente inicial, conforme apresentado na Tabela 4. A turbidez também apresentou aumento com o incremento da dosagem do tanino, passando de 2,6 UNT no efluente inicial para 10,1 UNT na dosagem de 800 mg L^{-1}, o que corresponde a um aumento de 289,6% (Tabela 4). Já a DQO passou de 219,0 mg L^{-1} O_2 no efluente inicial para 1009,0 mg L^{-1} O_2 na dosagem de 800 mg L^{-1}, o que corresponde a um aumento de 360,7% (Tabela 4). Esse resultado sugere que as características do tanino de *Eucalyptus cloeziana* não favoreceram o processo de coagulação-floculação, uma vez que a eficiência dos taninos como coagulantes depende de sua estrutura química, do grau de modificação e da espécie vegetal de origem (Leiviskä & Santos, 2023).

Em relação ao pH, analisando a Tabela 3, não foram observadas variações expressivas, permanecendo os valores na faixa de 7,45 a 7,52 em todas as dosagens avaliadas. Portanto, embora o tanino de *Eucalyptus cloeziana* tenha apresentado baixo desempenho como coagulante, sua aplicação exerceu baixa influência sobre o pH do meio, em concordância com a literatura (Mohd-Salleh *et al*., 2021).

Embora devam ser consideradas as diferenças nas características físico-químicas iniciais dos efluentes empregados em cada ensaio e a ausência de uma análise estatística comparativa direta, os resultados evidenciam o desempenho superior do tanino de *Acacia mearnsii* nas

condições avaliadas, o qual atingiu remoção máxima de 60,8% da cor aparente. Em contrapartida, o tanino de *Eucalyptus cloeziana* promoveu o aumento da cor, da turbidez e da DQO em todas as dosagens avaliadas. Esses resultados reforçam que a eficiência dos taninos como coagulantes depende da composição química e da espécie vegetal utilizada (Leiviskä & Santos, 2023).

4. Conclusões

O tanino de *Acacia mearnsii* apresentou potencial para aplicação como coagulante orgânico no tratamento terciário de efluente de celulose kraft, sendo a dosagem de 600 mg L^{-1} a mais eficiente entre as dosagens avaliadas. Nessa dosagem, foram obtidas a maior remoção de cor aparente e a maior redução da turbidez, sem alterações expressivas no pH do efluente. Embora a DQO nessa dosagem tenha sido superior às observadas para 200 e 400 mg L^{-1}, a avaliação conjunta dos parâmetros demonstrou que a dosagem de 600 mg L^{-1} apresentou o melhor equilíbrio entre a eficiência de clarificação e as características físico-químicas do efluente tratado, destacando-se como a melhor condição de aplicação do tanino de *Acacia mearnsii*.

Já o tanino de *Eucalyptus cloeziana* apresentou baixo desempenho como coagulante nas condições avaliadas, uma vez que promoveu aumento da cor aparente, da turbidez e da DQO à medida que a dosagem foi elevada, indicando que suas características não favoreceram o processo de coagulação-floculação. Os resultados obtidos demonstram que os coagulantes à base de tanino constituem uma alternativa potencial aos coagulantes inorgânicos, entretanto, sua eficiência depende da espécie vegetal utilizada. Dessa forma, estudos futuros devem avaliar outras espécies vegetais, diferentes métodos de modificação química dos taninos, condições operacionais de coagulação-floculação e a caracterização do lodo gerado, visando ampliar a eficiência do processo e o potencial de aproveitamento agrícola desse resíduo.

5. Agradecimentos

À Universidade Federal de Viçosa (UFV), ao Departamento de Engenharia Florestal (DEF), ao Laboratório de Resíduos da Indústria Florestal (LABRIF), à Fundação SIF, à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG), à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES – Código de Financiamento 001), e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

6. Referências bibliográficas

American Public Health Association, American Water Works Association, & Water Environment Federation. (2023). *Standard methods for the examination of water and wastewater* (24th ed.). APHA Press.

Brasil. (2011). *Resolução nº 430, de 13 de maio de 2011*. Conselho Nacional do Meio Ambiente. https://www.ibama.gov.br/sophia/cnia/legislacao/CONAMA/RE0430-130511.PDF

Indústria Brasileira de Árvores. (2025). *Relatório anual 2025*. https://iba.org/wp-content/uploads/2025/10/relatorioAnual2025.pdf

Leiviskä, T., & Santos, S. C. R. (2023). Purifying water with plant-based sustainable solutions: Tannin coagulants and sorbents. *Groundwater for Sustainable Development, 23*, 101004. https://doi.org/10.1016/j.gsd.2023.101004

Loganathan, P., Kandasamy, J., Ratnaweera, H., & Vigneswaran, S. (2024). Use of wastewater alum-coagulation sludge as a phosphorus fertiliser: A mini review. *Environmental Science and Pollution Research, 31*(12), 18412 - 18421. https://doi.org/10.1007/s11356-024-32497-6

Mboowa, D. (2024). A review of the traditional pulping methods and the recent improvements in the pulping processes. *Biomass Conversion and Biorefinery*, *14*(1), 1–12. https://doi.org/10.1007/s13399-020-01243-6

Microsoft. (2021). *Microsoft Excel* (Versão 16.0). https://www.microsoft.com/microsoft-365/excel

Mohd-Salleh, S. N. A., Mohd-Zin, N. S., Othman, N., Chew, I. M. L., & Mohammad, A. W. (2021). Synthesising tannin-based coagulants for water and wastewater application: A review. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, *9*(1), 105007. https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.105007

Ramos, M. D. N., Rangel, A. S., Azevedo, K. S., Melo, M. G. B., Oliveira, M. C., Watanabe, C. M. U., Pereira, F. F., Silva, C. M., & Aguiar, A. (2022). Characteristics and treatment of Brazilian pulp and paper mill effluents: A review. *Environmental Monitoring and Assessment, 194*(9), 651. https://doi.org/10.1007/s10661-022-10331-1

Sousa, A. M., Pinto, I. S. S., Machado, L., Gando-Ferreira, L., & Quina, M. J. (2023). Sustainability of kraft pulp mills: Bleaching technologies and sequences with reduced

water use. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, *125*, 58 - 70. https://doi.org/10.1016/j.jiec.2023.05.033

Tomasi, I. T., Machado, C. A., Boaventura, R. A. R., Botelho, C. M. S., & Santos, S. C. R. (2022). Tannin-based coagulants: Current development and prospects on synthesis and uses. *Science of the Total Environment, 822*, 153454. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.153454

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Encapsulamento de Compostos Fenólicos Derivados da Madeira por gelificação iônica e liofilização

Carlos Antonio Alves dos Santos[1]; Theo Souza Silva Moura Valente[1]; Mariana Correia dos Santos[1]; Fernando José Borges Gomes[1]; Roberto Carlos Costa Lelis[1]; Ericka Figueiredo Alves Redmond[2]; Caroline Silva de Abreu[3], Fernando Palha Leite[3]

[1] Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, Brasil.
[2] State University of New York- College of Environmental Science and Forestry. Syracuse, Nova Iorque.
[3] Celulose Nipo Brasileira. Belo Oriente, Brasil.

Resumo: O uso de compostos fenólicos, como o tanino condensado, devido ao seu potencial antioxidante, é dificultado em decorrência da variabilidade físico-química desses compostos, sendo o encapsulamento uma alternativa promissora. Assim, este trabalho avaliou as técnicas de gelificação iônica (GI) e liofilização (LI) para o encapsulamento de tanino condensado utilizando alginato de sódio (AS) combinado com goma arábica (GA), carboximetilcelulose (CMC) e goma xantana (GX). Foram determinadas a eficiência de encapsulamento (EE%), a atividade antioxidante (RSA%) e a morfologia das partículas por microscopia eletrônica de varredura. A técnica de LI apresentou maior eficiência de encapsulamento, destacando-se a formulação ASGA (72%), que também apresentou maior atividade antioxidante. As partículas obtidas por LI apresentaram formas irregulares, enquanto a GI produziu cápsulas esféricas e uniformes. Os resultados indicam que a formulação ASGA associada à liofilização apresenta elevado potencial de uso.

Palavras-chave: Tanino Condensado; Alginato de Sódio; Atividade Antioxidante.

Encapsulation of Wood-Derived Phenolic Compounds by Ionic Gelation and Freeze-Drying

Abstract: The use of phenolic compounds, such as condensed tannins, is challenging due to their physicochemical variability; however, encapsulation offers a promising alternative. This study evaluated ionic gelation (IG) and freeze-drying (FD) techniques for encapsulating condensed tannins using sodium alginate (SA) combined with gum arabic (GA), carboxymethylcellulose (CMC), and xanthan gum (XG). Encapsulation efficiency (EE%), antioxidant activity (RSA%), and particle morphology (via scanning electron microscopy) were determined. The FD technique yielded higher encapsulation efficiency, particularly with the SA-GA formulation (72%), which also exhibited the highest antioxidant activity. Particles obtained via FD were irregular in shape, whereas IG produced uniform, spherical capsules. The results indicate that the SA-GA formulation combined with freeze-drying holds significant potential for application.

Keywords: Antioxidant Activity; Condensed Tannin; Sodium Alginate.

1. Introdução

Parte dos produtos precisam de embalagem para proteção contra danos físicos, contaminação externa e deterioração (MISSIO et al., 2018; DU et al., 2023). Os materiais de plásticos sintéticos, como polietileno de baixa densidade (PEBD) e polietileno linear de baixa densidade (PEBDL), estão se tornando defasados, visto o crescente interesse na interação da embalagem com o produto (MISSIO et al., 2018). Além disso, a dificuldade do plástico em se degradar, gera problemas ao ecossistema, tornando necessário o desenvolvimento de materiais de embalagem verde, ecologicamente corretos e ativos (AHMED et al., 2022).

Depois da lignina, os taninos condensados (TC's) são os polihidroxifenóis naturais mais abundantes do planeta (SEIDI et al., 2025). Esses metabólicos secundários das plantas, desempenham um papel fundamental em seu sistema de defesa química contra estresses bióticos e abióticos (SOLDADO et al., 2021). Esses polifenóis possuem efeitos antioxidantes (WANG et al., 2023) e seu uso de em embalagem ativa pode contribuir para o aumento da vida útil dos alimentos e, também, como estabilizadores do material da embalagem contra degradação térmica e fotoinduzida (HUANG et al., 2022). A heterogeneidade física da amostra em termos de distribuição granulométrica é uma desvantagem dos CT's quando disperso na matriz polimérica aplicados na embalagem de alimentos (PANZELLA et al., 2022).

O encapsulamento consiste no revestimento de um material de interesse por um material secundário, formando partículas compósitas (AYYARIL et al., 2023). Existem diferentes técnicas de encapsulamento, tais como gelificação iônica e liofilização. A gelificação iônica consiste na formação de esferas de hidrogel por rede de rede de reticulação iônica, um crosslinking entre um polímero aniônico e um cátion monovalente (ZHANG et al., 2023), tendo como maior vantagem a biocompatibilidade (SILVEIRA et al., 2023). A liofilização, técnica utilizada para encapsular compostos ativos, é a remoção da umidade da solução congelada, resultando em um produto seco e de alta qualidade (KANDASAMY & NAVEEN, 2022), permitindo a preservação a longo prazo de compostos sensíveis ao calor e propenos à oxidação (BULJETA et al., 2022).

A aplicação direta do tanino condensado em embalagens de alimentos enfrenta limitações devido à sua heterogeneidade física, que dificulta a dispersão homogênea na matriz polimérica e pode comprometer as propriedades funcionais do material. Essa limitação impacta negativamente o desempenho das embalagens ativas, afetando tanto a liberação controlada do composto quanto a estabilidade do sistema. Nesse contexto, o encapsulamento surge como uma alternativa promissora para melhorar a dispersão do tanino e otimizar suas propriedades de aplicação. Diante disso, este trabalho teve como objetivo avaliar as técnicas de gelificação

iônica (GI) e de liofilização (LI) no encapsulamento de tanino condensado para aplicação em embalagens ativas.

2. Material e métodos

As técnicas utilizadas foram de gelificação iônica (GI) e de liofilização (LI) para comparação o melhor encapsulamento dos TC's. Concentrações de 3% (m/v) de alginato de sódio (AS), 2% (m/v) de cloreto de cálcio (CaCl2) e 1% (m/v) tanino condensado (TC) foi aplicado em ambas as técnicas. Para formação de cápsulas mais estáveis, foram testados 1% (m/v) de três polímeros diferentes, para cada técnica: goma arábica (ASGA), Carboximetilcelulose (ASCMC) e goma xantana (ASGX).

2.1 Encapsulamento

Misturas poliméricas contendo alginato mais goma arábica, CMC ou goma xantana foram preparadas à 28ºC sob agitação constante. O TC, preparado com água destilada, foi colocado sob agitação constante e em banho ultrassônico, alternadamente por 20 minutos durante 1 hora, antes de ser adicionado na mistura.

A técnica de gelificação iônica foi realizada com o gotejamento das misturas poliméricas em um banho de coagulação de CaCl2 de 2% (m/v), em banho maria à 28ºC sob agitação constante, com o auxílio de uma seringa de 3 ml e uma agulha de 25 x 0,70 mm. As esferas formadas foram mantidas na solução salina sob agitação por 30 minutos e depois lavadas com 100 mL de água destilada para retirar o excesso de sal. Amostras úmidas foram mantidas em geladeira à 4ºC e as amostras secas mantidas em estufa à 28 ºC por 48 h. Além disso, algumas foram liofilizadas para caracterização.

Para a técnica de liofilização, as misturas poliméricas contendo tanino condensado (ASGA, ASCMC ou ASGX) foram utilizadas no preparo de filmes que foram secos à 30ºC por 48h. Esse material foi congelado por 24 horas antes da liofilização.

Para as amostras obtidas por gelificação iônica, amostras foram secas em estufa a 28ºC por 48 horas. Para as amostras obtidas por liofilização, as partículas resultantes da liofilização foram maceradas com bastão de vidro.

2.2 Caracterização

Na técnica de GI após coagulação em banho com CaCl2 de 2% (m/v) e o processo de secagem, as amostras foram medidas com o auxílio de um paquímetro. Na de LI as amostras

foram medidas pelas imagens do microscópio eletrônico de varredura (MEV). A avaliação morfológica de todas as amostras foi realizada com o MEV.

2.3 Eficiência de encapsulamento (EE%)

A eficiência de encapsulamento foi determinada pela análise da concentração de tanino nas alíquotas coletadas em diferentes etapas do processo.

EE% = ((TC inicial − TC livre) / TC inicial) × 100

TC inicial = Concentração inicial de tanino condensado.
TC livre = Concentração de tanino não encapsulado.

3. Resultados e discussão

3.1 Caracterização

Nas duas técnicas foi possível o encapsulamento do TC, resultando em formatos diferentes. Somente na técnica de GI foi possível obter o tamanho das cápsulas, visto que por LI resultou em formas variáveis e não uniformes, impossibilitando a mensuração e conclusão de tamanho médio das partículas no pó resultante do encapsulamento. O tamanho médio (mm) das microcápsulas secas foi tabelado (Tabela 1).

Tabela 1 - Tamanhos médio em mm das microcápsulas secas, formadas por gelificação iônica

Microcápsulas	Secas (mm)
ASGA	1,15 ± 0,18
ASCMC	1,16 ± 0,18
ASGX	1,21 ± 0,17

Somente na técnica de GI foi possível obter o tamanho das cápsulas, visto que por LI resultou em formas variáveis e não uniformes, impossibilitando a mensuração e conclusão de tamanho médio das partículas no pó resultante do encapsulamento. As microcápsulas secas apresentaram diâmetro médio 1,18 ± 0,18 mm, com baixa variação entre os tratamentos, indicando boa reprodutibilidade do processo, mesmo após a perda de umidade durante o processo de secagem. A concentração utilizada em todas as amostras foi a mesma, visto que a concentração do polímero impacta no tamanho e forma das esferas (ÖZGEN et al., 2025).

Quando submetidas à LI as partículas resultaram em morfologia irregular e dimensões difíceis de mensurar, provavelmente devido à formação de agregados amorfos que carecem de suporte estrutural, o que compromete o controle sobre o formato (MI et al., 2020; SFANDIARI et al., 2025).

A microcápsulas ASGA e ASCMC formadas por GI obtiveram formas mais esféricas e uniformes em comparação com as ASGX, mesmo após o processo de secagem e o encapsulamento por LI resultou em pós com partículas não uniformes (Figura 1 A, B, C, D, E e F).

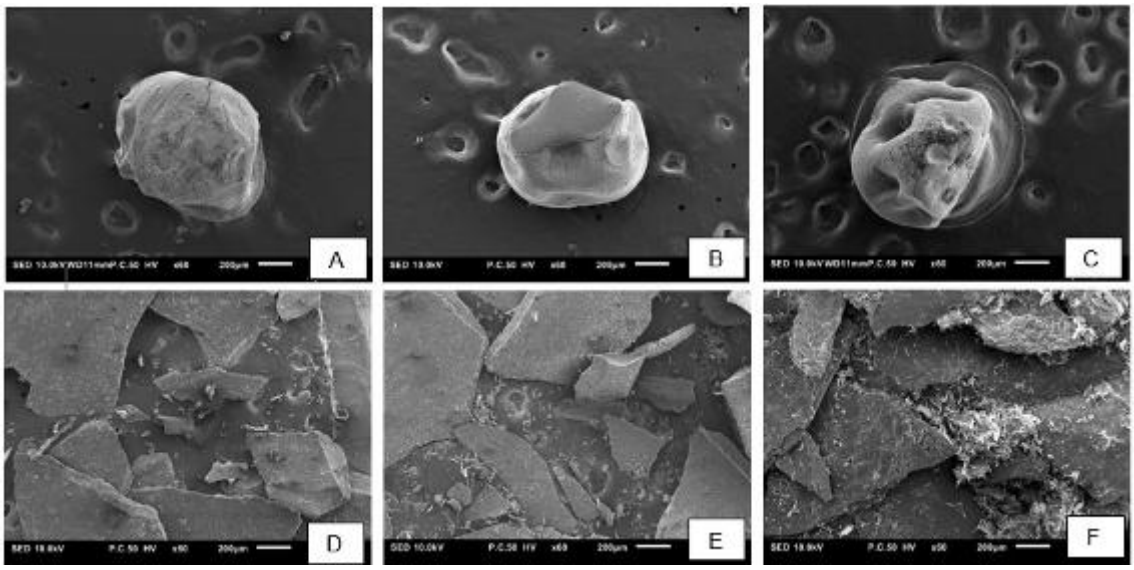


Figura 1 - Imagens de microscópio eletrônico de varredura (MEV) das microcápsulas por gelificação iônica (GI) ASGM (A); ASCMC (B) e ASGX (C); e das partículas do pó resultante do encapsulamento por liofilização (LI) ASGM (C); ASCMC (D) e ASGX (E).

As imagens A (ASGA), B (ASCMC) e C (ASGX) mostram microcápsulas esféricas ou quase esféricas, típicas da técnica de GI. Apesar da formação globalmente arredondada, é possível notar irregularidades superficiais, como rugosidades e depressões, mais evidentes em ASGX (C). A concentração de alginato afeta na forma da cápsula, resultando em forma irregulares, esféricas com calda curta, fusiformes e fusiformes de calda longa, tornando necessária a mistura com outros polímeros para resultados mais esféricos (TAO et al.,2021). A formulação ASGX apresentou maior deformação, possivelmente devido à viscosidade aumentada pela goma xantana, que dificulta a formação de esferas perfeitamente lisas (N'GOUAMBA et al., 2021). A viscosidade da solução, eficiência de aprisionamento e

velocidade da liberação do ingrediente ativo são afetados com altas concentrações de polímeros utilizados (KIM et al., 2021; ÖZGEN et al., 2025).

Já nas imagens D (ASGA-LI), E (ASCMC-LI) e F (ASGX-LI), referentes às amostras obtidas por liofilização, verifica-se ausência de esfericidade, com partículas apresentando formatos irregulares, lamelares e fragmentados. Esse comportamento é esperado, visto que a liofilização ocorre pela remoção da água por sublimação direta, sem que haja uma etapa de gelificação prévia capaz de manter a estrutura tridimensional (LI et al., 2024). Assim, o resultado é um pó de partículas quebradiças e heterogêneas, que inviabiliza a obtenção de um tamanho médio uniforme (ZHANG et al., 2025).

3.2 Eficiência de Encapsulamento (EE%)

A Tabela 2 apresenta a eficiência de encapsulamento obtida para as diferentes formulações, considerando os dois métodos utilizados: gelificação iônica (GI) e liofilização (LI).

Tabela 2 - Eficiência de encapsulamento para as técnicas de Gelificação Iônica (GI) e Liofilização (LI)

Microcápsulas	GI	LI
ASGA	58%	72%
ASCMC	57%	70%
ASGX	43%	64%

Observa-se que, para todas as combinações de polímeros, o método de liofilização resultou em maiores valores de eficiência de encapsulamento em comparação à gelificação iônica. Esse comportamento pode estar relacionado à menor exposição do material ativo a condições de difusão e perdas durante a liofilização, que remove a água por sublimação e preserva melhor a integridade da cápsula (DEGOBERT & AYDIN, 2021).

Entre as formulações, o sistema à base de alginato de sódio com goma arábica (ASGA) apresentou as maiores eficiências para ambos os métodos (58% para GI e 72% para LI), sugerindo maior compatibilidade e interação entre esses biopolímeros, possivelmente resultando em uma rede de encapsulamento mais densa e estável. Por outro lado, a combinação com goma de xantana (ASGX) apresentou os menores valores (43% para GI e 61% para LI), o

que pode indicar menor sinergia entre os polímeros ou maior porosidade da matriz formada, facilitando a difusão e perda do composto ativo (SHARMA et al., 2021).

O uso de carboximetilcelulose (ASCMC) resultou em eficiências intermediárias (57% GI e 70% LI), sugerindo um desempenho próximo ao da goma arábica, mas ligeiramente inferior, possivelmente devido a diferenças na viscosidade e na formação da rede polimérica em interação com alginato, visto que com maltodextrina, a utilização desses polímeros no encapsulamento de antocianina, resultou em EE% iguais (JANG & KOH, 2023). Esses resultados reforçam a importância da escolha adequada do polímero de parede e do método de secagem para otimizar a eficiência de encapsulamento, sendo a liofilização a técnica mais eficaz neste estudo.

3.3 Atividade de remoção de radicais livres (RSA%)

Os gráficos mostram a atividade antioxidante (RSA) das diferentes formulações ao longo da concentração, evidenciando o impacto do tipo de polímero de parede e do método de encapsulamento (Figura 2 A e B).

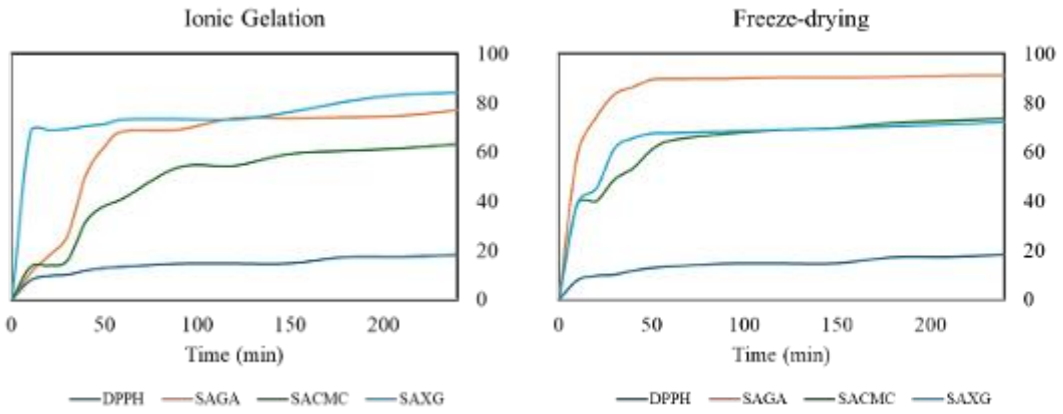


Figura 2 - Gráficos da atividade de remoção de radicais livres (RSA%) das amostras encapsuladas por gelificação iônica, GI (A) e por Liofilização, LI (B).

Todas as amostras tiveram atividade antioxidante significativa, confirmando que o TC manteve sua funcionalidade após o encapsulamento. No entanto, o comportamento variou de acordo com a formulação e a técnica utilizada.

No processo de gelificação iônica (GI), a amostra ASGA (alginato + goma arábica) alcançou rapidamente um platô elevado. A formulação ASCMC (alginato + CMC) apresentou

desempenho intermediário, enquanto ASGX (alginato + xantana) obteve os menores valores de RSA, o que pode ser atribuído à menor eficiência de encapsulamento e possível maior difusão/perda do composto ativo (YANG et al., 2024).

Já na liofilização (LI), as diferenças entre as amostras ficaram mais evidentes. A formulação ASGA novamente se destacou, atingindo valores mais altos e estáveis de RSA. A ASCMC apresentou comportamento semelhante, embora ligeiramente inferior, enquanto a ASGX manteve a menor atividade antioxidante. É importante destacar que os valores obtidos por liofilização foram, em geral, superiores aos obtidos por gelificação iônica, reforçando que esse método foi mais eficiente em preservar a estrutura dos antioxidantes, evitando degradações térmicas ou oxidativas (BODBODAK et al., 2024).

Assim, os resultados sugerem que tanto o tipo de polímero de parede quanto o método de encapsulamento influenciam significativamente a manutenção da atividade antioxidante. A combinação alginato + goma arábica (ASGA) mostrou-se a mais eficiente, e a liofilização foi a técnica que mais contribuiu para preservar a atividade funcional do composto.

4. Conclusões

O encapsulamento por liofilização (LI) resultou em partículas com estruturas mais achatadas e heterogêneas em tamanho e forma, enquanto a gelificação iônica (GI) gerou cápsulas mais esféricas e uniformes. Entre as formulações, a combinação de alginato de sódio com goma arábica (ASGA) na técnica de LI apresentou o melhor desempenho no encapsulamento do tanino condensado, destacando-se como uma alternativa promissora para aplicação em embalagens ativas.

5. Agradecimentos

Os autores agradecem o financiamento da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001, Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e Fundação de Amparo à Pesquisa no Estado do Rio de Janeiro (FAPERJ).

6. Referências bibliográficas

Ahmed, M. W., Haque, M. A., Mohibbullah, M., Khan, M. S. I., Islam, M. A., Mondal, M. H. T., & Ahmmed, R. (2022). A review on active packaging for quality and safety of foods:

Current trends, applications, prospects and challenges. Food Packaging and Shelf Life, 33, 100913. https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2022.100913

Ayyaril, S. S., Shanableh, A., Bhattacharjee, S., Rawas-Qalaji, M., Cagliani, R., & Shabib, A. G. (2023). Recent progress in micro and nano-encapsulation techniques for environmental applications: A review. Results in Engineering, 18, 101094. https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.101094

Bodbodak, S., Nejatian, M., Ghandehari Yazdi, A. P., Kamali Rousta, L., Rafiee, Z., Jalali-Jivan, M., ... & Jafari, S. M. (2024). Improving the thermal stability of natural bioactive ingredients via encapsulation technology. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 64(10), 2824–2846. https://doi.org/10.1080/10408398.2022.2127145

Brand-Williams, W., Cuvelier, M. E., & Berset, C. (1995). Use of a free radical method to evaluate antioxidant activity. LWT – Food Science and Technology, 28(1), 25–30. https://doi.org/10.1016/S0023-6438(95)80008-5

Buljeta, I., Pichler, A., Šimunović, J., & Kopjar, M. (2022). Polysaccharides as carriers of polyphenols: Comparison of freeze-drying and spray-drying as encapsulation techniques. Molecules, 27(16), 5069. https://doi.org/10.3390/molecules27165069

Degobert, G., & Aydin, D. (2021). Lyophilization of nanocapsules: Instability sources, formulation and process parameters. Pharmaceutics, 13(8), 1112. https://doi.org/10.3390/pharmaceutics13081112

Du, H., Sun, X., Chong, X., Yang, M., Zhu, Z., & Wen, Y. (2023). A review on smart active packaging systems for food preservation: Applications and future trends. Trends in Food Science & Technology, 141, 104200. https://doi.org/10.1016/j.tifs.2023.104200

Esfandiari, A., Rownaghi, M., & Niakousari, M. (2025). Ultrasound-assisted spray freeze-drying: A cutting-edge approach for gum Arabic cryogel powder production. Ultrasonics Sonochemistry, 116, 107440. https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2025.107440

Ferri, M., Papchenko, K., Degli Esposti, M., Tondi, G., De Angelis, M. G., Morselli, D., & Fabbri, P. (2023). Fully biobased polyhydroxyalkanoate/tannin films as multifunctional materials for smart food packaging applications. ACS Applied Materials & Interfaces, 15(23), 28594–28605. https://doi.org/10.1021/acsami.3c04611

Huang, X., Ji, Y., Guo, L., Xu, Q., Jin, L., Fu, Y., & Wang, Y. (2022). Incorporating tannin onto regenerated cellulose film towards sustainable active packaging. Industrial Crops and Products, 180, 114710. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2022.114710

Jang, Y., & Koh, E. (2023). Characterisation and storage stability of aronia anthocyanins encapsulated with combinations of maltodextrin with carboxymethyl cellulose, gum Arabic, and xanthan gum. Food Chemistry, 405, 135002. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.135002

Kandasamy, S., & Naveen, R. (2022). A review on the encapsulation of bioactive components using spray-drying and freeze-drying techniques. Journal of Food Process Engineering, 45(8), e14059. https://doi.org/10.1111/jfpe.14059

Kim, J. C., Kim, J., Park, J., Oh, J. K., Choi, I. G., & Kwak, H. W. (2021). Highly efficient and sustainable alginate/carboxylated lignin hybrid beads as adsorbent for cationic dye removal. Reactive and Functional Polymers, 161, 104839. https://doi.org/10.1016/j.reactfunctpolym.2021.104839

Li, Z., Luo, X., Naeem, A., Li, Q., Zhang, Y., Guan, Y., ... & Ming, L. (2024). Recent developments in the physical structure of solid formulations: A comprehensive review. Journal of Chinese Pharmaceutical Sciences, 33(10). https://doi.org/10.5246/jcps.2024.10.064

Mi, S., Liu, Z., Luo, C., Cai, L., Zhang, Z., & Li, L. (2020). A review on preparing new energy ultrafine powder materials by freeze-drying. Drying Technology, 38(12), 1544–1564. https://doi.org/10.1080/07373937.2019.1651733

Missio, A. L., Mattos, B. D., Ferreira, D. D. F., Magalhães, W. L., Bertuol, D. A., Gatto, D. A., Petutschnigg, A., & Tondi, G. (2018). Nanocellulose-tannin films: From trees to sustainable active packaging. Journal of Cleaner Production, 184, 143–151. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.02.205

Özgen, S., Ertop, M. H., & Ertop, U. (2025). Formulation and evaluation of propolis-loaded alginate capsules by ionic gelation technique. Food and Bioprocess Technology. https://doi.org/10.1007/s11947-025-03889-4

Panzella, L., & Napolitano, A. (2022). Condensed tannins, a viable solution to meet the need for sustainable and effective multifunctionality in food packaging: Structure, sources, and properties. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 70(3), 751–758. https://doi.org/10.1021/acs.jafc.1c07229

Seidi, F., Liu, Y., Huang, Y., Xiao, H., & Crespy, D. (2025). Chemistry of lignin and condensed tannins as aromatic biopolymers. Chemical Society Reviews, 54(6), 3140–3232. https://doi.org/10.1039/D4CS00440J

Sharma, S., Sudhakara, P., Singh, J., Ilyas, R. A., Asyraf, M. R. M., & Razman, M. R. (2021). Critical review of biodegradable and bioactive polymer composites for bone tissue engineering and drug delivery applications. Polymers, 13(16), 2623. https://doi.org/10.3390/polym13162623

Silveira, M. P., Almeida, F. L. C., Alvim, I. D., & Prata, A. S. (2023). Encapsulation of pomegranate polyphenols by ionic gelation: Strategies for improved retention and controlled release. Food Research International, 174, 113590. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2023.113590

Soldado, D., Bessa, R. J. B., & Jerónimo, E. (2021). Condensed tannins as antioxidants in ruminants—Effectiveness and action mechanisms to improve animal antioxidant status and oxidative stability of products. Animals, 11(11), 3243. https://doi.org/10.3390/ani11113243

Tao, L., Zhang, T., Wang, P., Ding, M., Liu, L., Tao, N., ... & Zhong, J. (2021). Shape control and stability of multicore millimetre-sized capsules using a combined monoaxial dispersion electrospraying–ionotropic gelation technique. International Journal of Food Science & Technology, 56(10), 5150–5159. https://doi.org/10.1111/ijfs.15300

Wang, M., Chen, T., Wang, Q., & Shi, Y. (2023). Antioxidant, bacteriostatic and preservative effects of extractable condensed tannins isolated from longan pericarps and seeds. Plants, 12(3), 512. https://doi.org/10.3390/plants12030512

Yang, W., Gong, Y., Wang, Y., Wu, C., Zhang, X., Li, J., & Wu, D. (2024). Design of gum Arabic/gelatin composite microcapsules and their cosmetic applications in encapsulating tea tree essential oil. RSC Advances, 14(7), 4880–4889. https://doi.org/10.1039/D3RA08526K

Zhang, F., Ren, Z., Xu, Q., Dai, X., & Liu, R. (2025). Spray freeze dried milk products: Powder microstructure and shell morphology control. Drying Technology. https://doi.org/10.1080/07373937.2025.2517792

Zhang, Y., Yang, Y., Zhao, X., & Gao, J. (2023). Investigation on ionical cross-linking of alginate by monovalent cations to fabrication alginate gel for biomedical application. Reactive and Functional Polymers, 183, 105484. https://doi.org/10.1016/j.reactfunctpolym.2022.105484

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

ESTUDO DA ESCALABILIDADE DA PRODUÇÃO DE LIGNOSSULFONATOS A PARTIR DE LIGNINA KRAFT DE EUCALIPTO

Jamille Carvalho de Souza[1]; Caio César Zandonadi Nunes[1]; Iara Fontes Demuner[1]; Ana Márcia Macedo Ladeira Carvalho[1]; Priscila Moreira da Silva Xavier[1]; Rodrigo Fraga de Almeida[1]

[1] Universidade Federal de Viçosa - UFV

Resumo: Este trabalho investigou a viabilidade da produção de lignossulfonatos em escala ampliada, utilizando lignina kraft de eucalipto. A metodologia consistiu na reação de sulfometilação da lignina em escala piloto, empregando um reator PAAR de 18 L, e utilizando sulfito de sódio e formaldeído a 160°C, sem etapas adicionais de purificação. Os resultados mostraram que o lignossulfonato escalonado apresentou menor teor de lignina solúvel em ácido (28,30%) e maior teor de cinzas (50,54%), em comparação ao material produzido em laboratório (44,59% e 12,25%, respectivamente) e ao material comercial (68,78% e 12,91%, respectivamente). Apesar disso, a solubilidade em água desse material lignossulfonato produzido em escala piloto foi elevada (98,8%), semelhante aos demais. Com isso, foi possível concluir que, apesar das perdas de eficiência atribuídas à mudança de escala e à ausência de purificação, o processo piloto foi viável, produzindo materiais com propriedades adequadas para uso na indústria.

Palavras-chave: Sulfometilação; Modificação Química; Biorrefinaria

Study on the Scalability of Lignosulfonate Production from Eucalyptus Kraft Lignin

Abstract: This study evaluated the scalability of lignosulfonate production from eucalyptus kraft lignin, aiming at industrial applications. The methodology consisted of sulfomethylation of lignin on a pilot scale, using an 18 L PAAR reactor, with sodium sulfite and formaldehyde at 160°C, without purification steps. The results showed that the pilot-scale lignosulfonate presented a lower acid-soluble lignin content (28.30%) and a higher ash content (50.54%) compared to the laboratory material (44.59% and 12.25%, respectively) and the commercial one (68.78% and 12.91%, respectively). However, water solubility was high (98.8%), similar to the others. It is concluded that, despite the efficiency losses attributed to the scale change and the absence of purification, the pilot process is viable, producing materials with suitable properties for industrial use.

Keywords: Sulfomethylation; Chemical Modification; Biorefinery

1. Introdução

Lignina é uma macromolécula natural, tridimensional e aromática, constituída por unidades de fenilpropanóides, que formam uma estrutura amorfa responsável pela resistência e dureza nas células vegetais (DONALDSON, 2001; DEMUNER, 2019). Na natureza, é o

segundo polímero mais abundante, depois da celulose, e representa cerca de 15 a 30 % (m/m) da massa das biomassas lignocelulósicas (GNANSOUNOU, 2017; AHMAD, 2018).

Na indústria, a lignina geralmente é obtida como um resíduo das fábricas de celulose (SAMENI, 2014). Nos processos de polpação, ela é removida da biomassa lignocelulósica a fim de se obter a polpa, que é composta basicamente por celulose e hemiceluloses. Desse processo, tradicionalmente, a polpa é processada com o objetivo de gerar produtos de maior valor agregado e a lignina removida é considerada um resíduo, que, geralmente, é queimado (NORGREN e EDLUND, 2014).

Atualmente, os principais processos químicos utilizados para polpação são o kraft, sulfito, soda e organossolve . No processo kraft, por exemplo, são utilizadas soluções de hidróxido de sódio e sulfito de sódio (licor branco) para cozinhar cavacos de madeira, em temperaturas de 155 a 175 ºC, a fim de hidrolisar e solubilizar a lignina desse material, separando, assim, a polpa celulósica do licor negro kraft rico em lignina (POTTHAST, 2006).

Anualmente, são geradas, aproximadamente, 50 milhões de toneladas de lignina nas indústrias de celulose e papel (HU, ZHANG e LEE, 2018; CHEN e WAN, 2017), sendo que cerca de 98% desse material é incinerado para produzir combustível de baixo valor e apenas 1 a 2% são transformados em produtos de alto valor agregado, como os lignossulfonatos (GELLERSTEDT, 2012; INWOOD, 2014).

Lignossulfonatos são compostos formados por unidades de fenilpropano com grupos sulfônicos, ácidos carboxílicos e grupos hidroxila fenólicos, geralmente, formados no processo de polpação sulfito (WOICIECHOWSKI, 2020). Por serem carregados negativamente e altamente solúveis em água, são utilizados em diversos processos industriais como plastificantes em misturas de concreto, dispersantes, tensoativos, floculantes, ração animal, pesticidas, aditivos para perfuração de poços de petróleo e estabilizantes em suspensões coloidais (VISHTAL, 2011; FATEHI, 2011; ZHOU, 2013).

Na biorrefinaria, utilizar parte da lignina para gerar produtos de alto valor agregado é economicamente mais interessante do que utilizá-la integralmente como combustível em fábricas de celulose kraft (MACFARLANE, 2009). Entretanto, a estrutura química complexa, a baixa reatividade, alta heterogeneidade da lignina e a baixa solubilidade em soluções ácidas e neutras representam um desafio para uma biorrefinaria eficiente (PARK, 2018). Portanto, faz-se necessário modificar essa lignina kraft a fim de ajustar a sua reatividade e heterogeneidade para atender aos requisitos de diversas aplicações (HOFFMANN, 2019; CHEN, 2014).

Entre os tratamentos mais utilizados para modificar a lignina kraft estão a sulfonação ácida e a sulfometilação (GAO, 2019; VIDAL, 2021). Para a produção de lignossulfonatos, a lignina kraft deve passar por um processo de sulfonação, utilizando os métodos de sulfonação ácida ou de sulfometilação (HELANDER, 2013). O método de sulfonação ácida consiste em tratar a lignina com ácido sulfúrico concentrado a altas temperaturas, já o processo de sulfometilação emprega o bissulfito de sódio, na presença de formaldeído, para modificar a lignina kraft, introduzindo o grupo $–CH_2SO_3H$ no anel aromático (YU, 2013; BERLIN, 2014).

Entretanto, a sulfometilação da lignina kraft de madeira de folhosas é um processo desafiador, uma vez que o licor kraft dessas madeiras possui um alto teor de lignina siringila (tipo S), que é pouco reativa (GAO, 2019a). Dessa forma, é preciso ajustar o processo de produção de lignossulfonatos provenientes de lignina kraft de madeira de folhosas, visando otimizar a conversão química e a qualidade do produto final. Demuner et al. (2021) estudou diversos processos e condições de reação para a produção de lignossulfonatos, em escala laboratorial, obtendo bons resultados, semelhantes aos de produtos comerciais.

Entretanto, necessita-se avaliar a viabilidade da produção desses lignossulfonatos em larga escala para fins industriais. Portanto, o objetivo deste estudo foi produzir materiais lignossulfonatos, a partir de lignina kraft de eucalipto, em escala piloto, caracterizando-os e comparando suas características com as dos materiais lignossulfonatos produzidos em laboratório e também comerciais, a fim de avaliar a eficiência da conversão química na escala piloto e a qualidade do produto final.

2. Material e métodos

A lignina kraft de eucalipto, na forma de pó, utilizada como referência e matéria-prima neste trabalho, foi fornecida por uma empresa brasileira de celulose e papel. Para as reações de sulfometilação, foram utilizados formaldeído (37% em massa), sulfito de sódio (pureza > 99%) e ácido sulfúrico adquiridos comercialmente.

O material lignossulfonato comercial também foi adquirido comercialmente. Os lignossulfonatos produzidos em laboratório e escala piloto foram obtidos a partir da reação de sulfometilação da matéria-prima lignina kraft de eucalipto. A metodologia para a obtenção do lignossulfonato “laboratorial” foi detalhadamente descrita por Demuner et al. (2021). Já para a produção do material lignossulfonato “escalonado”, a condição utilizada foi baseado no melhor resultado reportado por Demuner et al. (razão molar de 1,6 entre hidroximetilssufonato de sódio e lignina, e temperatura de 160 °C).

Neste caso, a lignina kraft foi misturada, escalonadamente, com sulfito de sódio, formaldeído e ácido sulfúrico em um reator PARR de 18 L, modelo 4848M. O hidroximetilssulfonato de sódio (reagente ativo para a reação) foi obtido pela reação entre o sulfito de sódio e o formaldeído. A reação de sulfometilação da lignina kraft foi conduzida a 160ºC, sendo que o tempo necessário para atingir essa temperatura foi 80 minutos e, após o reator estabilizar em 160ºC, ele permaneceu nessa temperatura por 240 minutos. A razão molar entre o hidroximetilssulfonato de sódio e a lignina foi de 1, 6 e a dosagem de ácido sulfúrico foi de 60 $g.L^{-1}$, visando manter o pH final das amostras entre 8,0 e 9,0. Diferentemente de trabalhos anteriores, não foi realizada nenhuma etapa adicional de purificação, a fim de simplificar o processo e deixá-lo menos oneroso para fins industriais.

Tanto a lignina kraft de eucalipto, quanto os materiais lignossulfonatos comercial, produzidos em laboratório e em escala piloto foram caracterizados em relação aos teores de lignina insolúvel em ácido, solúvel em ácido, total, carboidratos, cinzas e solubilidade em água. Para a determinação da lignina insolúvel em ácido, foi utilizada a norma TAPPI T 222 om-02 (Technical Association of, 2002a) e, para a lignina solúvel em ácido, a norma TAPPI UM 250 (Technical Association of, 2000). O teor de lignina total foi calculado somando-se os valores obtidos de lignina insolúvel e solúvel em ácido. A composição dos teores de carboidratos e cinzas foi obtida, utilizando-se as normas SCAN-CM 71:09 (Scandinavian Pulp and Paper, 1993) e TAPPI T 211 om-02 (Technical Association of, 2002b), respectivamente.

Por fim, a solubilidade em água foi determinada. Para isso, 200 mg de cada material foram suspensos em 20 mL de água deionizada e mantidos sob agitação a 100 rpm por 2 h a 25ºC (Konduri e Fatehi, 2015). Em seguida, as amostras foram centrifugadas por 5 min a 1000 rpm. Após esse tempo, o sobrenadante foi separado e seco em estufa a 105ºC até atingir massa constante. A Equação 1 a seguir demonstra como a solubilidade em água foi calculada.

$$Solubilidade\,(\%) = \left(\frac{m_f}{m_i}\right) * 100\,\% \qquad (1)$$

Nessa equação, m_f representa a massa final obtida após a secagem do sobrenadante, que se traduz na massa de material dissolvido; e m_i representa a massa inicial do material considerado.

3. Resultados e discussão

As caracterizações químicas da lignina kraft e dos materiais lignossulfonatos (comercial, produzidos em laboratório e em escala piloto), em relação aos teores de lignina insolúvel em ácido, lignina solúvel em ácido, lignina total, carboidratos, cinzas e solubilidade em água, estão apresentadas na Tabela 1 abaixo.

Tabela 1 – Caracterização dos materiais: lignina kraft, lignossulfonato comercial, lignossulfonato laboratorial[1], lignossulfonato escalonado[2], em relação aos teores de lignina insolúvel em ácido, lignina solúvel em ácido, lignina total, carboidratos, cinzas e solubilidade em água

Parâmetros	Lignina kraft	Lignossulfonato comercial	Lignossulfonato laboratorial[1]	Lignossulfonato escalonado[2]
Lignina insolúvel em ácido (%)	85,50	0	30,31	0,10
Lignina solúvel em ácido (%)	9,80	68,78	44,59	28,30
Lignina total (%)	95,30	68,78	74,90	28,40
Carboidratos (%)	2,50	4,65	1,47	0,30
Cinzas (%)	2,20	12,91	12,25	50,54
Solubilidade em água (%)	7,2	100	100	98,8

1 – Material lignossulfonato produzido em laboratório por Demuner et al. (2021).
2 – Material produzido em escala piloto, utilizando a melhor condição obtida por Demuner et al. (2021) em laboratório.

Quando comparados à amostra original de lignina kraft, todos os materiais lignossulfonatos apresentaram teores de lignina insolúvel em ácido menores do que o da lignina kraft e teores de lignina solúvel em ácido maiores. O lignossulfonato comercial apresentou um teor de 68,78% de lignina solúvel em ácido e não foi possível quantificar o teor de lignina insolúvel em ácido, devido ao seu valor extremamente baixo para esse material. Esse elevado valor de lignina solúvel em ácido do lignossulfonato comercial se deve ao baixo pKa dos grupos sulfonato e outros grupos funcionais tipicamente presentes nesses materiais comerciais (DUVAL e LAWOKO, 2014).

Já os materiais lignossulfonatos produzidos em laboratório e em escala piloto apresentaram teores de lignina solúvel em ácido superiores aos da lignina kraft (9,8%), porém inferiores aos do lignossulfonato comercial (68,78%), sendo que o lignossulfonato produzido em laboratório apresentou o valor de lignina solúvel em ácido (44,59%) maior que o lignossulfonato produzido em escala piloto (28,30%). Essa diferença nos valores de lignina solúvel em ácido pode ser explicada pelas condições de escala ampliada empregadas no

presente trabalho, que empregou um reator de 18 L no lugar do reator de 15 mL utilizado no laboratório por Demuner et al. (2021).

O teor de carboidratos da lignina kraft foi de 2,5%. Esse valor é condizente com dados reportados na literatura para lignina kraft de eucalipto (GORDOBIL, 2016; TAGAMI, 2019). Já para o material lignossulfonato comercial, o teor de açúcar encontrado foi mais elevado (4,65%). Isso pode estar relacionado com o processo de obtenção desse material, uma vez que diversos autores atribuem elevados valores de carboidratos a impurezas remanescentes dos processos de extração e purificação de materiais obtidos a partir de lignina (LIN, 1992; ZHU, 2014; SILVA, 2020; CASSALES, 2020). E, por fim, os materiais lignossulfonatos produzidos em laboratório e em escala piloto apresentaram menores valores de açúcares (1,47% e 0,30%, respectivamente). Esses baixos teores de carboidratos estão associados, provavelmente, às condições em que as reações ocorreram, principalmente em relação às elevadas temperaturas, que degradam os carboidratos.

Em relação aos teores de cinzas, os materiais lignossulfonatos apresentaram valores bem mais elevados, quando comparados à lignina kraft (2,20%). O lignossulfonato comercial e o lignossulfonato preparado em laboratório apresentaram valores de cinzas similares, 12,91% e 12,25%, respectivamente. Já o lignossulfonato produzido em escala piloto apresentou um elevado valor de cinzas (50,54%). Esse parâmetro está diretamente relacionado à pureza do material e os valores elevados podem estar associados à matéria-prima, ao processo de extração ou de reação (LIN, 1992; ZHU, 2014).

Para a obtenção de lignossulfonatos de maior pureza, são necessárias várias etapas de purificação (FORS, 1985). O material produzido em laboratório por Demuner et al. (2021) foi submetido a algumas etapas de purificação, o que pode explicar a similaridade do teor de cinzas desse material com o comercial. Já o material lignossulfonato produzido em escala piloto não passou por nenhuma etapa adicional de purificação após o processo. Esse fato pode justificar o elevado teor de cinzas desse material.

Por fim, no estudo da solubilidade dos materiais em água, como esperado, a lignina kraft apresentou baixo valor de solubilidade em água (7,2%), enquanto todos os materiais lignossulfonatos apresentaram valores elevados de solubilidade em água (> 98%). A lignina kraft se dissolve em pHs elevados, pois seus componentes assumem um caráter polianiônico em solução alcalina. Entretanto, apresenta baixa solubilidade em pHs neutros e ácidos (SARKANEN, 1984; MATSUSHITA, 2005; KONDURI, 2015; MELRO, 2020). Já os materiais lignossulfonatos apresentam essa elevada solubilidade em água, devido à introdução

dos grupos sulfonatos, que são capazes de interagir com moléculas de água por meio de ligações de hidrogênio.

Konduri e Fatehi (2015) realizaram um estudo semelhante no qual avaliaram a produção de lignossulfonatos via sulfometilação, utilizando formaldeído e sulfito de sódio. No estudo, os lignossulfonatos produzidos a partir de lignina kraft de madeira de folhosas apresentaram solubilidade em água de 100% em pH 7.

O lignossulfonato produzido em escala piloto apresentou uma solubilidade ligeiramente inferior (98,8%) aos materiais lignossulfonatos comercial (100%) e produzido em laboratório (100%), entretanto ainda muito superior ao da lignina kraft de eucalipto (7,2%), o que o torna adequado para as finalidades desse tipo de material.

4. Conclusões

A lignina kraft de eucalipto utilizada para a produção de lignossulfonatos apresentou características típicas em sua composição química. A partir dessa lignina, foi possível produzir lignossulfonatos pelo processo de sulfometilação. Esse processo foi estudado e otimizado, em escala laboratorial, por Demuner et al. e, nas melhores condições (razão molar de 1 para 6 entre hidroximetilssufonato de sódio e lignina, e temperatura igual a 160°C), apresentou resultados satisfatórios, condizentes com os parâmetros esperados de um produto comercial.

Essas condições otimizadas foram aplicadas para a produção de lignossulfonatos a partir da lignina kraft de eucalipto em escala piloto e o material obtido foi caracterizado, apresentando resultados menos satisfatórios do que o material produzido em laboratório. A piora nos resultados pode ser atribuída à escala em que a reação de sulfometilação ocorreu (quantidade e pureza dos reagentes, efetividade no transporte de massa entre os reagentes, etc) e também ao fato de não terem sido realizadas etapas adicionais de purificação do material obtido. Apesar disso, foi possível produzir lignossulfonatos em escala piloto.

5. Agradecimentos

À Universidade Federal de Viçosa e ao Departamento de Engenharia Florestal pelo suporte e estrutura institucional concedidos. À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico Tecnológico (CNPq), pelo apoio financeiro.

6. Referências bibliográficas

Ahmad, M., & Gnansounou, E. (2018). A review on lignin: A versatile biopolymer for the production of high-value chemicals and materials. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 96, 118–132. https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.07.037

Berlin, A., & Balakshin, M. (2014). Industrial lignins: Analysis, properties, and applications. In Biopolymers (pp. 315–360). Wiley-VCH.

Chen, Y., Stark, N. M., Cai, Z., Frihart, C. R., Lorenz, L. F., & Ibach, R. E. (2014). Chemical modification of kraft lignin: Effect on chemical and thermal properties. BioResources, 9(3), 5488–5500.

Chen, Z., & Wan, C. (2017). Biological valorization strategies for converting lignin into fuels and chemicals. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 73, 610–621. https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.01.166

Demuner, I. F. (2021). Modificações na lignina kraft de eucalipto e produção de lignosulfonatos [Tese de doutorado, Universidade Federal de Viçosa. https://locus.ufv.br//handle/123456789/27987

Demuner, I. F., Colodette, J. L., Demuner, A. J., & Jardim, C. M. (2019). Biorefinery review: Wide-reaching products through kraft lignin. BioResources, 14(3), 7543–7581.

Demuner, I. F., Gomes, F. J. B., Gomes, J. S., Coura, M. R., Borges, F. P., Carvalho, A. M. M. L., & Silva, C. M. (2021). Improving kraft pulp mill sustainability by lignosulfonates production from processes residues. Journal of Cleaner Production, 317, 128286. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128286

Donaldson, L. A. (2001). Lignification and lignin topochemistry — an ultrastructural view. Phytochemistry, 57(6), 859–873. https://doi.org/10.1016/S0031-9422(01)00049-8

Duval, A., & Lawoko, M. (2014). A review on lignin-based polymeric, micro- and nano-structured materials. Reactive and Functional Polymers, 85, 78–96. https://doi.org/10.1016/j.reactfunctpolym.2014.09.017

Fatehi, P., & Ni, Y. (2011). Integrated forest biorefinery – Sulfite process. In J. Y. Zhu, X. Zhang, & X. Pan (Eds.), Sustainable Production of Fuels, Chemicals, and Fibers from Forest Biomass (pp. 409–441). American Chemical Society.

Forss, K., Sagfors, P.-E., & Kokkonen, R. (1985). The composition of birch lignin. Fractionation of lignosulfonates and lignosulfonate-carbohydrate compounds. In Proceedings of International Symposium on Wood and Pulping Chemistry (pp. 23–26). Vancouver, Canada.

Gao, W., Inwood, J. P. W., & Fatehi, P. (2019). Sulfonation of phenolated kraft lignin to produce water soluble products. Journal of Wood Chemistry and Technology, 39(4), 225–241. https://doi.org/10.1080/02773813.2019.1565866

Gellerstedt, G., Tomani, P., Axegård, P., & Backlund, B. (2012). Lignin recovery and lignin based products. In L. Christopher (Ed.), Integrated Forest Biorefineries: Challenges and Opportunities (pp. 1–66). Royal Society of Chemistry.

Gnansounou, E., & Pandey, A. (2017). Classification of biorefineries taking into account sustainability potentials and flexibility. In E. Gnansounou & A. Pandey (Eds.), Life-Cycle Assessment of Biorefineries (pp. 1–39). Elsevier.

Gordobil, O., Moriana, R., Zhang, L., Labidi, J., & Sevastyanova, O. (2016). Assessment of technical lignins for uses in biofuels and biomaterials: Structure-related properties, proximate analysis and chemical modification. Industrial Crops and Products, 83, 155–165. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2015.12.048

Helander, M., Thelander, H., Lawoko, M., Henriksson, G., Zhang, L., & Lindström, M. E. (2013). Fractionation of technical lignin: Molecular mass and pH effects. BioResources, 8(2), 2270–2282. https://doi.org/10.15376/biores.8.2.2270-2282

Hoffmann, A., Nong, J. P., Porzel, A., Bremer, M., & Fischer, S. (2019). Modification of Lignoboost Kraft Lignin from softwoods with dihydroxybenzenes. Reactive and Functional Polymers, 142, 112–118. https://doi.org/10.1016/j.reactfunctpolym.2019.06.005

Hu, J., Zhang, Q., & Lee, D. J. (2018). Kraft lignin biorefinery: A perspective. Bioresource Technology, 247, 1181–1183.

Inwood, J. (2014). Sulfonation of Kraft Lignin to Water Soluble Value Added Products [Master's thesis, Lakehead University].

Konduri, M. K. R., & Fatehi, P. (2015). Production of water-soluble hardwood kraft lignin via sulfomethylation using formaldehyde and sodium sulfite. ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 3(6), 1172–1182. https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.5b00098

Lin, S. Y., & Dence, C. W. (Eds.). (1992). Methods in Lignin Chemistry. Springer-Verlag.

Macfarlane, A. L., Prestidge, R., Farid, M. M., & Chen, J. J. J. (2009). Dissolved air flotation: A novel approach to recovery of organosolv lignin. Chemical Engineering Journal, 148(1), 15–19. https://doi.org/10.1016/j.cej.2008.07.036

Matsushita, Y., & Yasuda, S. (2005). Preparation and evaluation of lignosulfonates as a dispersant for gypsum paste from acid hydrolysis lignin. Bioresource Technology, 96(4), 465–470. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2004.05.023

Melro, E., Filipe, A., Sousa, D., Valente, A. J., Romano, A., Antunes, F. E., & Medronho, B. (2020). Dissolution of kraft lignin in alkaline solutions. International Journal of Biological Macromolecules, 148, 688–695. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.01.153

Norgren, M., & Edlund, H. (2014). Lignin: Recent advances and emerging applications. Current Opinion in Colloid & Interface Science, 19(5), 409–416. https://doi.org/10.1016/j.cocis.2014.08.004

Park, S. Y., Kim, J. Y., Youn, H. J., & Choi, J. W. (2018). Fractionation of lignin macromolecules by sequential organic solvents systems and their characterization for further valuable applications. International Journal of Biological Macromolecules, 106, 793–802. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2017.08.069

Potthast, A. (2006). Chemistry of kraft cooking. In H. Sixta (Ed.), Handbook of Pulp (pp. 164–168). Wiley-VCH.

Sameni, J., Krigstin, S., dos Santos Rosa, D., Leao, A., & Sain, M. (2014). Thermal characteristics of lignin residue from industrial processes. BioResources, 9(1), 725–737. https://doi.org/10.15376/biores.9.1.725-737

Sarkanen, S., Teller, D. C., Stevens, C. R., & McCarthy, J. L. (1984). Lignin. 20. Associative interactions between kraft lignin components. Macromolecules, 17(12), 2588–2597. https://doi.org/10.1021/ma00142a022

Scandinavian Pulp, Paper and Board Testing Committee. (1993). SCAN-CM 71:09: Pulps Carbohydrate Composition. Scan Test Methods.

Tagami, A., Gioia, C., Lauberts, M., Budnyak, T., Moriana, R., Lindström, M. E., & Sevastyanova, O. (2019). Solvent fractionation of softwood and hardwood kraft lignins for more efficient uses: Compositional, structural, thermal, antioxidant and adsorption properties. Industrial Crops and Products, 129, 123–134. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2018.11.067

Technical Association of the Pulp and Paper Industry. (2000). Standard UM 250: Acid-Soluble Lignin in Wood and Pulp. TAPPI Press.

Technical Association of the Pulp and Paper Industry. (2002a). Standard T 222 om-02: Acid Insoluble Lignin in Wood and Pulp. TAPPI Press.

Technical Association of the Pulp and Paper Industry. (2002b). Standard T211 om-02: Ash in Wood, Pulp, Paper and Paperboard. TAPPI Press.

Vidal, C., Carrillo-Varela, I., Reyes-Contreras, P., & Mendonça, R. T. (2021). Sulfomethylation of Radiata Pine Kraft Lignin and Its Use as a Molybdenite Depressant in Selective Chalcopyrite-Molybdenite Separation by Flotation. BioResources, 16(3), 5646–5666. https://doi.org/10.15376/biores.16.3.5646-5666

Vishtal, A., & Kraslawski, A. (2011). Challenges in industrial applications of technical lignins. BioResources, 6(3), 3547–3568. https://doi.org/10.15376/biores.6.3.3547-3568

Woiciechowski, A. L., Neto, C. J. D., Vandenberghe, L. P. S., de Carvalho Neto, D. P., Sydney, A. C. N., Letti, L. A. J., Karp, S. G., Torres, L. A. Z., & Soccol, C. R. (2020). Lignocellulosic biomass: Acid and alkaline pretreatments and their effects on biomass recalcitrance – Conventional processing and recent advances. Bioresource Technology, 304, 122848. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.122848

Yu, G., Li, B., Wang, H., & Mu, X. (2013). Sulfomethylation of lignin: A review. BioResources, 8(1), 1–15.

Zhou, X. F., & Lu, X. J. (2014). Structural characterization of kraft lignin for its green utilization. Wood Research, 59(4), 583–592.

Zhu, W., Westman, G., & Theliander, H. (2014). Investigation and Characterization of Lignin Precipitation in the LignoBoost Process. Journal of Wood Chemistry and Technology, 34(2), 77–97. https://doi.org/10.1080/02773813.2013.837477

Cassales, A., Ramos, L. A., & Frollini, E. (2020). Synthesis of bio-based polyurethanes from Kraft lignin and castor oil with simultaneous film formation. International Journal of Biological Macromolecules, 145, 28–41. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2019.12.173

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Filmes nanocelulósicos obtidos a partir de resíduos de papel modificados com silicatos

Cínthia Aparecida Silva[1], Júlia Luíse Mendonça Ribeiro[1], Evelize Aparecida Amaral Shashiki[1]; Rafael Carvalho do Lago[1]; Felipe Gomes Batista[1;] Júlia Naves Teixeira[1]; Gustavo Henrique Denzin Tonoli[1]; Lourival Marin Mendes[1];

[1] Universidade Federal de Lavras

Resumo: A produção de nanofibrilas de celulose (NFCs) a partir de resíduos de tubos de papel contribui para a valorização de resíduos lignocelulósicos e para a economia circular. Este estudo avaliou os efeitos de pré-tratamentos com silicatos de cálcio ($CaSiO_3$) e magnésio ($MgSiO_3$) nas propriedades mecânicas, superficiais e de barreira de filmes de NFCs. Os resíduos foram submetidos aos pré-tratamentos, fibrilados mecanicamente e utilizados na produção dos filmes por casting. O $MgSiO_3$ promoveu aumento expressivo da rigidez, com módulo de Young de 9855,78 ± 492,78 MPa, enquanto o $CaSiO_3$ apresentou menor resistência à tração de 6,27 ± 0,31 Mpa. Ambos os tratamentos aumentaram o ângulo de contato, de 56,91 ± 2,84° no controle para 68,36 ± 3,41° e 72,91 ± 3,64° nos filmes tratados com $CaSiO_3$ e $MgSiO_3$, respectivamente. Entretanto, a maior hidrofobicidade superficial não resultou em melhoria das propriedades de barreira, sendo observados valores de permeabilidade ao vapor de água de 46,65 ± 1,95 e 44,60 ± 3,49 g.mm/dia.m².kPa, respectivamente. Os resultados demonstraram que os silicatos modificaram de forma distinta as propriedades dos filmes e possuem potencial para modular suas propriedades. Contudo, caracterizações complementares poderão elucidar os mecanismos envolvidos e otimizar seu desempenho.

Palavras-chave: Resistência mecânica, hidrofobicidade; permeabilidade.

Nanocellulose films obtained from silicate-modified paper waste

Abstract: The production of cellulose nanofibrils (CNFs) from waste paper tubes contributes to the recovery of lignocellulosic residues and to the circular economy. This study evaluated the effects of calcium ($CaSiO_3$) and magnesium ($MgSiO_3$) silicate pre-treatments on the mechanical, surface, and barrier properties of NFC films. The residues were subjected to pre-treatments, mechanically fibrillated, and used in the production of the films by casting. $MgSiO_3$ promoted an expressive increase in rigidity, with a Young modulus of 9855.78 ± 492.78 MPa, while $CaSiO_3$ showed lower tensile strength, 6.27 ± 0.31 MPa. Both treatments increased the contact angle, from 56.91 ± 2.84° in the control to 68.36 ± 3.41° and 72.91 ± 3.64° in the films treated with $CaSiO_3$ and $MgSiO_3$, respectively. However, the higher surface hydrophobicity did not result in an improvement of barrier properties, being observed water vapor permeability values of 46.65 ± 1.95 and 44.60 ± 3.49 g.mm/day. m 2. kPa, respectively. The results showed that silicates modify the properties of the films in a distinct way and have the potential to adjust these properties. However, further characterisation is needed to elucidate the mechanisms involved and optimise their performance.

Keywords: Mechanical strength, Hydrophobicity, Permeability.

1. Introdução

Os princípios da economia circular têm impulsionado o aproveitamento de resíduos lignocelulósicos para a produção de materiais sustentáveis. Nesse contexto, a obtenção de nanofibrilas de celulose (NFCs) a partir de resíduos industriais tem se destacado como estratégia para reduzir impactos ambientais e agregar valor aos subprodutos. Resíduos como papéis reciclados, embalagens multicamadas e materiais da indústria de papel e celulose têm sido amplamente investigados como fontes alternativas para produção de nanocelulose (Chisenga et al., 2026; Lima et al., 2023; Nargotra et al., 2023).

Entre essas fontes, os resíduos de tubos de papel multicamadas destacam-se pela elevada concentração de fibras celulósicas e pelas características favoráveis aos processos de desfibrilação mecânica e química (Pacaphol & Aht-Ong, 2017). Embora a produção de NFCs a partir desses resíduos seja promissora, ainda existem desafios relacionados à modificação funcional das nanofibrilas e à otimização das propriedades dos materiais produzidos a partir delas (Amara et al., 2025; Hu et al., 2021).

Filmes produzidos a partir de NFCs apresentam elevada transparência, biodegradabilidade e boas propriedades mecânicas, favorecendo aplicações em embalagens, revestimentos e biomateriais (Leppänen et al., 2022). Contudo, sua elevada hidrofilicidade, decorrente da abundância de grupos hidroxila, aumenta a sensibilidade à umidade e limita as propriedades de barreira (Li et al., 2019; Sun et al., 2024). Assim, estratégias para reduzir a interação com a água e melhorar o desempenho mecânico e de barreira são essenciais para ampliar suas aplicações.

Nesse contexto, a incorporação de partículas minerais tem se mostrado uma estratégia promissora para modificar as propriedades de filmes nanocelulósicos (Abe, 2019; Kim et al., 2022; Yi et al., 2020). Entre elas, os silicatos de cálcio e magnésio destacam-se pela capacidade de interagir com a matriz celulósica. Estudos anteriores demonstraram o potencial de silicato de sódio na modificação de materiais celulósicos, particularmente quanto às propriedades mecânicas e superficiais (Mascarenhas et al., 2022, 2024). Entretanto, permanece pouco explorado o efeito comparativo de diferentes silicatos minerais sobre filmes de NFC obtidos de resíduos de tubos de papel, especialmente quanto à relação entre propriedades mecânicas, molhabilidade e transporte de vapor de água.

Diante disso, o presente estudo teve como objetivo avaliar os efeitos de pré-tratamentos com silicatos de cálcio e magnésio nas propriedades mecânicas, superficiais e de barreira de filmes produzidos com NFCs obtidas a partir de resíduos de tubos de papel multicamadas. Partiu-se da hipótese de que a natureza dos silicatos e suas diferentes interações com a matriz celulósica poderiam promover alterações distintas na organização da rede nanofibrilar, resultando em mudanças na rigidez, na interação com a água e na permeabilidade ao vapor de água.

2. Material e métodos

Foram utilizados resíduos de tubo de papel kraft, com gramatura média de 400 g/m², fornecidos pela empresa Tubominas Indústria e Comércio LTDA. Para promover maior homogeneidade do material, os resíduos foram inicialmente fragmentados em moinho de facas e, posteriormente, submetidos separadamente a pré-tratamentos com soluções de silicato de cálcio ($CaSiO_3$) e silicato de magnésio ($MgSiO_3$), ambas na concentração de 5% (m/v). As suspensões foram mantidas a 80 ± 2 °C sob agitação constante (400 rpm) durante 2 horas. Após os tratamentos, os resíduos foram lavados com água deionizada até atingirem pH neutro. Amostras de resíduos sem tratamento foram utilizadas como controle (Dias et al., 2019; Mascarenhas et al., 2022).

A obtenção das NFCs foi realizada por fibrilação mecânica, utilizando um desfibrilador Supermass-colloider Masuko Sangyo MKGA-80 (Kawaguchi, Japão), operando a 1500 rpm, com 10 passagens. A distância entre os discos iniciou-se em 10 µm, sendo ajustada até 100 µm conforme o aumento da viscosidade da suspensão (Mascarenhas et al., 2022). Posteriormente, suspensões de NFCs na concentração de 1% (m/v) foram utilizadas para produção de filmes pelo método de casting. As suspensões foram vertidas em moldes de acrílico e submetidas à secagem em condições controladas de temperatura e umidade.

Os filmes obtidos foram caracterizados quanto às propriedades mecânicas, superficiais e de barreira. As propriedades mecânicas foram avaliadas por ensaios de tração e punctura, conforme a norma ASTM D882-12 (ASTM, 2018). A molhabilidade e o ângulo de contato foram determinados segundo o método TAPPI T458 cm-14 (TAPPI, 2014). As propriedades de barreira foram investigadas por meio da taxa de transmissão de vapor de água (TPVA) e da permeabilidade ao vapor de água (PVA), de acordo com os procedimentos estabelecidos pela norma ASTM E96 (ASTM, 2016).

Foram realizadas cinco repetições para cada um dos tratamentos testados. Os resultados foram avaliados por análise de variância (ANOVA) ($P < 0,05$), seguida de um teste de Tukey ($P < 0,05$) para comparar as médias dos tratamentos.

3. Resultados e discussão

Os pré-tratamentos com silicatos influenciaram significativamente o comportamento mecânico dos filmes de NFCs (Figura 1). Os filmes controle apresentaram resistência à tração 45,5 ± 2,27 MPa, enquanto o pré-tratamento com silicato de cálcio reduziu esse valor para 6,28 ± 0,31 MPa. Os filmes obtidos após pré-tratamento com silicato de magnésio apresentaram valor intermediário de 32,19 ± 1,6 MPa (Figura 1A). Por outro lado, não foram observadas diferenças significativas no elongamento na ruptura entre os tratamentos (Figura 1B).

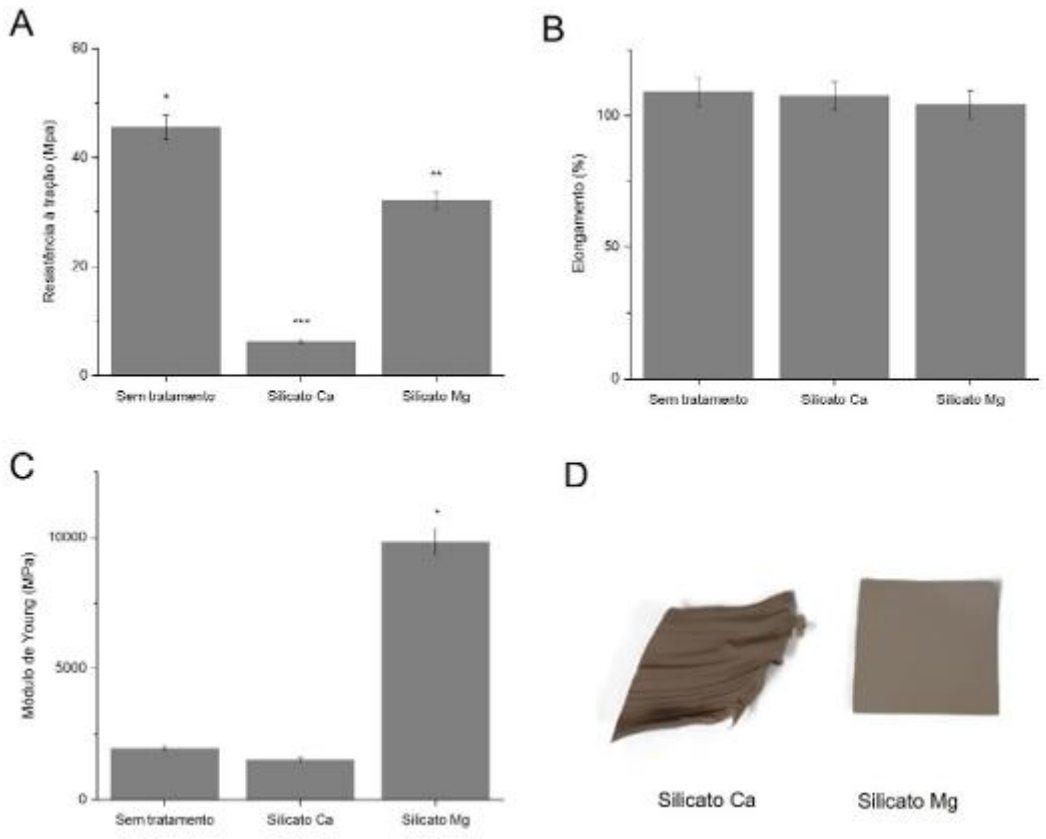


Figura 1: Propriedades mecânicas dos filmes produzidos a partir de NFCs obtidas de resíduos de tubos de papel sem tratamento e pré-tratados com $SiOCa_3$ e $SiOMg_3$: (A) resistência à tração, (B) elongamento na ruptura e (C) módulo de Young. (D) imagem dos filmes de NFCs pré-tratados. * indica diferença significativa entre os tratamentos ($p < 0,05$). As barras de erro representam o desvio padrão de cinco repetições.

O módulo de Young aumentou significativamente com o pré-tratamento com silicato de magnésio, passando de 1950 ± 97,5 MPa no controle para 9855,78 ± 492,79 MPa nos filmes tratados (Figura 1C). A incorporação de partículas inorgânicas pode aumentar a resistência à deformação elástica por meio de interações entre as fases orgânica e inorgânica (Hubbe et al., 2017; Klemm et al., 2018; Moon et al., 2011). Entretanto, esse aumento de rigidez não foi acompanhado por alterações significativas na resistência à tração ou no elongamento na ruptura, indicando que o $MgSiO_3$ influenciou principalmente a resposta elástica inicial dos filmes, sem alterar significativamente sua deformação até a ruptura.

A redução da resistência à tração observada para o tratamento com $CaSiO_3$ sugere que esse pré-tratamento alterou as interações responsáveis pela resistência mecânica dos filmes. Alterações nas interações interfibrilares ou a presença de partículas minerais distribuídas de forma heterogênea na matriz constituem possíveis mecanismos para esse comportamento. Entretanto, na ausência de caracterizações microestruturais, essas possibilidades devem ser consideradas hipóteses e requerem análises complementares para sua confirmação. (Figura 1D).

Os pré-tratamentos promoveram aumento significativo do ângulo de contato em relação ao controle, com valores de 56,91 ± 2,84°; 68,36 ± 3,42°; 72,91 ± 3,64°, controle, $CaSiO_3$ e $MgSiO_3$, respectivamente (Figura 2A). O aumento desse parâmetro indica menor afinidade inicial da superfície dos filmes pela água. Modificações dessa natureza podem decorrer de alterações na disponibilidade de grupos hidroxila e nas características físicas da superfície, como sua rugosidade (Hubbe et al., 2017), sendo também relatadas em sistemas contendo partículas minerais (Kim et al., 2022).

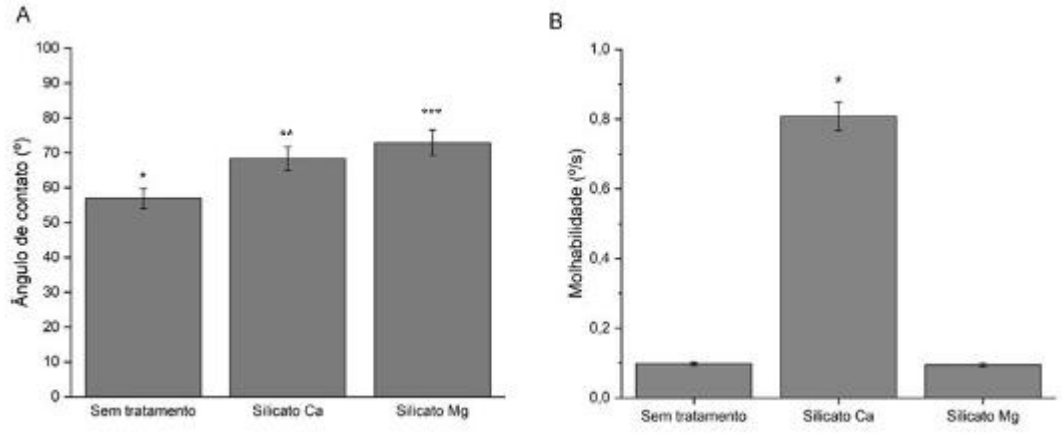


Figura 2 – Propriedades superficiais dos filmes produzidos a partir de NFCS obtidas de resíduos de tubos de papel sem tratamento e pré-tratados com $SiOCa_3$ e $SiOMg_3$: (A) ângulo de contato e (B) molhabilidade. * indica diferença significativa entre os tratamentos ($p < 0,05$). As barras de erro representam o desvio padrão de cinco repetições.

Apesar de aumentar o ângulo de contato, o tratamento com $CaSiO_3$ apresentou maior molhabilidade (0,808 ± 0,404 °/s) em relação ao controle (0,098 ± 0,0049 °/s) e ao $MgSiO_3$ (0,095 ± 0,0047 °/s) (Figura 2B), indicando maior interação água-superfície ao longo do tempo. O $MgSiO_3$ apresentou comportamento semelhante ao controle. Essa diferença entre o ângulo de contato inicial e sua evolução temporal indica que a interação com a água é influenciada não apenas pela química superficial, mas também por características estruturais, como porosidade, rugosidade e organização da matriz (Hubbe et al., 2015; Lavoine et al., 2012). Assim, os silicatos promoveram respostas distintas de molhabilidade, possivelmente relacionadas às alterações na estrutura dos filmes. Os mecanismos responsáveis por essas diferenças necessitam de caracterizações complementares para serem elucidados.

Os pré-tratamentos também influenciaram significativamente as propriedades de barreira dos filmes (Figura 3). A TPVA aumentou de 645 ± 40 g/m².dia no controle para 1014,61 ± 42,43 g/m².dia e 1028,51 ± 80, 38 g/m².dia nos tratamentos com $CaSiO_3$ e $MgSiO_3$, respectivamente (Figura 3A). Comportamento semelhante foi observado para a PVA, cujos valores foram de 6,5 ± 0,7; 46,65 ± 1,95 e 44,6 ± 3,49 g.mm/dia.m².kPa, respectivamente (Figura 3B). Esses resultados demonstram que, nas condições avaliadas, os pré-tratamentos com silicatos reduziram a eficiência dos filmes como barreira ao vapor de água.

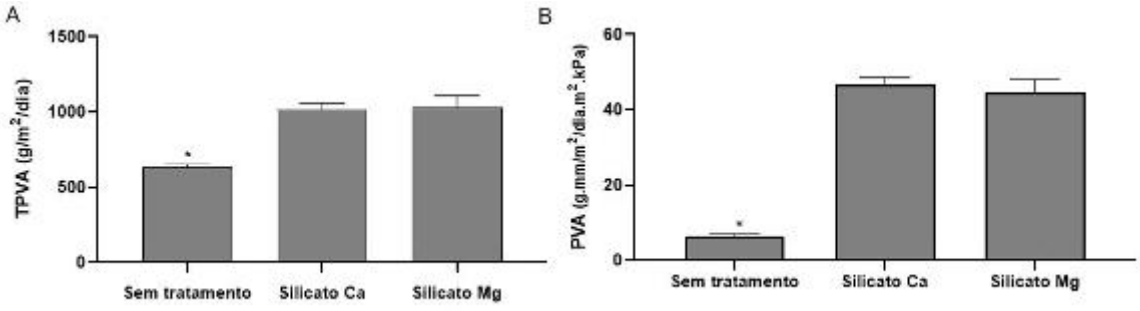


Figura 3 – Propriedades de barreira dos filmes produzidos a partir de nanofibrilas de celulose (NFCS) obtidas de resíduos de tubos sem tratamento e pré-tratados com $SiOCa_3$ e $SiOMg_3$: (A) taxa de transmissão de vapor de água (TPVA) e (B) permeabilidade ao vapor de água (PVA). * indica diferença significativa entre os tratamentos ($p < 0,05$). As barras de erro representam o desvio padrão de cinco repetições.

O aumento da TPVA e da PVA pode estar relacionado a modificações promovidas pelos pré-tratamentos na estrutura dos filmes. Estudos com materiais nanocelulósicos indicam que características como compactação, porosidade e organização da rede fibrilar exercem influência sobre o transporte de vapor de água (Hubbe et al., 2017; Lavoine et al., 2012;

Syverud & Stenius, 2009). Contudo, como essas características não foram determinadas diretamente no presente estudo, não é possível atribuir o aumento da permeabilidade a um mecanismo estrutural específico.

A análise conjunta das propriedades superficiais e de barreira mostrou que o aumento do ângulo de contato promovido pelos silicatos não melhorou a barreira ao vapor de água, evidenciando que a menor afinidade superficial pela água não implica menor transporte de vapor. Da mesma forma, o aumento da rigidez promovido pelo $MgSiO_3$ não resultou em melhoria da barreira. Assim, $CaSiO_3$ e $MgSiO_3$ modificaram de forma distinta as propriedades mecânicas, superficiais e de barreira dos filmes, sendo necessárias caracterizações complementares para elucidar os mecanismos estruturais envolvidos.

4. Conclusões

Os pré-tratamentos com silicatos de cálcio e magnésio influenciaram de forma distinta as propriedades dos filmes de NFCs. O silicato de magnésio aumentou a rigidez dos filmes e apresentou menor interação com a água, enquanto o silicato de cálcio reduziu a resistência à tração e aumentou a molhabilidade. Embora ambos os tratamentos tenham aumentado o ângulo de contato, também promoveram maior permeabilidade ao vapor de água, indicando que os efeitos dos silicatos sobre as propriedades superficiais não resultaram em melhoria das propriedades de barreira. Dessa forma, os resultados demonstram o potencial dos silicatos para modificar o desempenho dos filmes nanocelulósicos, embora seus efeitos dependam do tipo de silicato e da propriedade avaliada. A investigação de diferentes concentrações e condições de pré-tratamento, aliada a caracterizações estruturais complementares, poderá contribuir para a compreensão dos mecanismos envolvidos e para a obtenção de filmes com propriedades mais adequadas à aplicação pretendida.

5. Agradecimentos

Os autores agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) pelo apoio financeiro e incentivo ao desenvolvimento da pesquisa científica. À empresa Tubominas Indústria e Comércio LTDA pelo fornecimento dos resíduos utilizados neste estudo e pela parceria institucional. Além disso, expressam agradecimento à Universidade Federal de Lavras (UFLA) e ao laboratório de Nanotecnologia Florestal pelo suporte técnico, científico e estrutural.

6. Referências bibliográficas

Abe, K. (2019). Novel fabrication of high-modulus cellulose-based films by nanofibrillation under alkaline conditions. *Carbohydrate Polymers*, *205*(October 2018), 488–491. https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2018.10.069

Amara, C., Razzak, A., Khiari, R., Dufresne, A., & Khwaldia, K. (2025). Sustainable production of cellulose nanofibers and nanopaper sheets from olive pomace waste through mechanical defibrillation. *Biomass Conversion and Biorefinery*, *15*(11), 16619–16631. https://doi.org/10.1007/s13399-024-06296-5

Chisenga, S. M., Muga, F. C., Okesola, O. M., Yengwe, J., Liu, H., Kaluba, P., Mweetwa, A. M., & Sodzidzi, Z. (2026). Cellulose-Based Nanoparticles Processed from Agricultural Waste Biomass—A Review. *Nanomaterials*, *16*(6), 1–35. https://doi.org/10.3390/nano16060387

Dias, M. C., Mendonça, M. C., Damásio, R. A. P., Zidanes, U. L., Mori, F. A., Ferreira, S. R., & Tonoli, G. H. D. (2019). Influence of hemicellulose content of Eucalyptus and Pinus fibers on the grinding process for obtaining cellulose micro/nanofibrils. *Holzforschung*, *73*(11), 1035–1046. https://doi.org/10.1515/hf-2018-0230

Hu, F., Zeng, J., Cheng, Z., Wang, X., Wang, B., Zeng, Z., & Chen, K. (2021). Cellulose nanofibrils (CNFs) produced by different mechanical methods to improve mechanical properties of recycled paper. *Carbohydrate Polymers*, *254*(December 2020), 117474. https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2020.117474

Hubbe, M. A., Ferrer, A., Tyagi, P., Yin, Y., Salas, C., Pal, L., & Rojas, O. J. (2017). Nanocellulose in thin films, coatings, and plies for packaging applications: A review. *BioResources*, *12*(1), 2143–2233. https://doi.org/10.15376/biores.12.1.2143-2233

Hubbe, M. A., Gardner, D. J., & Shen, W. (2015). Contact angles and wettability of cellulosic surfaces: A review of proposed mechanisms and test strategies. *BioResources*, *10*(4), 8657–8749. https://doi.org/10.15376/biores.10.4.Hubbe_Gardner_Shen

Kim, G. H., Kang, D. H., Jung, B. N., & Shim, J. K. (2022). Fabrication and Characterization of Hydrophobic Cellulose Nanofibrils/Silica Nanocomposites with Hexadecyltrimethoxysilane. *Polymers*, *14*(4). https://doi.org/10.3390/polym14040833

Klemm, D., Cranston, E. D., Fischer, D., Gama, M., Kedzior, S. A., Kralisch, D., Kramer, F., Kondo, T., Lindström, T., Nietzsche, S., Petzold-Welcke, K., & Rauchfuß, F. (2018). Nanocellulose as a natural source for groundbreaking applications in materials science:

Today's state. *Materials Today*, *21*(7), 720–748. https://doi.org/10.1016/J.MATTOD.2018.02.001

Lavoine, N., Desloges, I., Dufresne, A., & Bras, J. (2012). Microfibrillated cellulose - Its barrier properties and applications in cellulosic materials: A review. *Carbohydrate Polymers*, *90*(2), 735–764. https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2012.05.026

Leppänen, I., Hokkanen, A., Österberg, M., Vähä-Nissi, M., Harlin, A., & Orelma, H. (2022). Hybrid films from cellulose nanomaterials—properties and defined optical patterns. *Cellulose*, *29*(16), 8551–8567. https://doi.org/10.1007/s10570-022-04795-0

Li, W., Wang, S., Wang, W., Qin, C., & Wu, M. (2019). Facile preparation of reactive hydrophobic cellulose nanofibril film for reducing water vapor permeability (WVP) in packaging applications. *Cellulose*, *26*(5), 3271–3284. https://doi.org/10.1007/s10570-019-02270-x

Lima, A. R., Cristofoli, N. L., Rosa da Costa, A. M., Saraiva, J. A., & Vieira, M. C. (2023). Comparative study of the production of cellulose nanofibers from agro-industrial waste streams of Salicornia ramosissima by acid and enzymatic treatment. *Food and Bioproducts Processing*, *137*, 214–225. https://doi.org/10.1016/j.fbp.2022.11.012

Mascarenhas, A. R. P., Scatolino, M. V., Dias, M. C., Martins, M. A., Melo, R. R. De, Damásio, R. A. P., Mendonça, M. C., & Tonoli, G. H. D. (2022). Fibers pre-treatments with sodium silicate affect the properties of suspensions, films, and quality index of cellulose micro/nanofibrils Effect of Na2SiO3. *Nordic Pulp and Paper Research Journal*, *37*(3), 534–552. https://doi.org/10.1515/npprj-2022-0037

Mascarenhas, A. R. P., Scatolino, M. V., Lago, R. C. Do, Medeiros, D. T., Batista, F. G., Setter, C., de Melo, R. R., Martins, M. A., & Tonoli, G. H. D. (2024). Silicates as alternative pretreatment for cellulose pulp to obtain nanofibrils for application in biodegradable packaging: a technical review. *Cerne*, *30*(1). https://doi.org/10.1590/01047760202330013354

Moon, R. J., Martini, A., Nairn, J., Simonsen, J., & Youngblood, J. (2011). Cellulose nanomaterials review: structure, properties and nanocomposites. *Chemical Society Reviews*, *40*(7), 3941–3994. https://doi.org/10.1039/c0cs00108b

Nargotra, P., Sharma, V., Tsai, M. L., Hsieh, S. L., Dong, C. Di, Wang, H. M. D., & Kuo, C. H. (2023). Recent Advancements in the Valorization of Agro-Industrial Food Waste for the Production of Nanocellulose. *Applied Sciences (Switzerland)*, *13*(10). https://doi.org/10.3390/app13106159

Pacaphol, K., & Aht-Ong, D. (2017). Preparation of hemp nanofibers from agricultural waste by mechanical defibrillation in water. *Journal of Cleaner Production*, *142*, 1283–1295. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.09.008

Sun, J., Yang, X., Bai, Y., Fang, Z., Zhang, S., Wang, X., Yang, Y., & Guo, Y. (2024). Recent Advances in Cellulose Nanofiber Modification and Characterization and Cellulose Nanofiber-Based Films for Eco-Friendly Active Food Packaging. *Foods*, *13*(24), 1–35. https://doi.org/10.3390/foods13243999

Syverud, K., & Stenius, P. (2009). Strength and barrier properties of MFC films. *Cellulose*, *16*(1), 75–85. https://doi.org/10.1007/s10570-008-9244-2

Yi, T., Zhao, H., Mo, Q., Pan, D., Liu, Y., Huang, L., Xu, H., Hu, B., & Song, H. (2020). From cellulose to cellulose nanofibrils—a comprehensive review of the preparation and modification of cellulose nanofibrils. In *Materials*,*13*(22). https://doi.org/10.3390/ma13225062

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Influência da Incorporação de Nanocelulose na Rugosidade Superficial de Papéis Celulósicos

Thâmara dos Santos Osaki[1]; Polliana D`Angelo Rios[1]; Alessandro de Oliveira Rios[2]; Natalia Durigon Melo[1]; José Fellip Catique Marinho[1]; José Cícero Pereira Júnior[1]; Rodrigo Schmitz[1]; Rômulo Koeche[1]

[1] Universidade Estadual de Santa Catarina, Centro Agroveterinario (CAV), Lages- SC.
[2] Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto de Ciência e Tecnologia de Alimentos (ICTA), Porto Alegre- RS.

Resumo: A rugosidade superficial constitui um dos principais parâmetros utilizados para avaliar a qualidade de materiais celulósicos destinados à produção de papéis especiais, embalagens e substratos para impressão, uma vez que influencia propriedades como aderência, molhabilidade, resistência ao desgaste e qualidade de revestimentos. Nesse contexto, a incorporação de nanocelulose tem sido investigada como estratégia para promover o refinamento estrutural da matriz fibrosa, favorecendo superfícies mais homogêneas. O objetivo deste trabalho foi avaliar a influência da incorporação de 10% de nanocelulose sobre a rugosidade superficial de papéis produzidos a partir de polpa celulósica branqueada de *Eucalyptus spp.*. A rugosidade foi determinada utilizando rugosímetro portátil, sendo avaliados os parâmetros Ra, Rq e Rz. O papel contendo nanocelulose apresentou redução significativa em todos os parâmetros de rugosidade quando comparado ao controle. O valor de Ra diminuiu de 3,348 para 2,705 µm, enquanto Rq reduziu de 4,142 para 3,375 µm e Rz passou de 19,627 para 16,456 µm. Os resultados indicam que a nanocelulose promoveu maior preenchimento dos vazios entre fibras, proporcionando uma superfície mais uniforme e potencialmente mais adequada para aplicações tecnológicas que exigem elevado acabamento superficial.

Palavras-chave: Topografia superficial; Biomateriais; Celulose.

Influence of nanocellulose incorporation on the surface roughness of cellulosic papers

Abstract: Surface roughness is an important parameter for evaluating the quality of cellulose-based papers because it directly affects coating performance, printability, adhesion and mechanical behavior. Nanocellulose has been widely investigated as a reinforcing material capable of improving the structural organization of cellulose fiber networks. This study evaluated the influence of incorporating 10% nanocellulose on the surface roughness of papers produced from bleached Eucalyptus spp. cellulose pulp. Surface roughness was measured using a Mitutoyo SJ-220 portable roughness tester, and the parameters Ra, Rq and Rz were determined. The incorporation of nanocellulose significantly reduced all evaluated roughness parameters. Ra decreased from 3.348 to 2.705 µm, Rq from 4.142 to 3.375 µm, and Rz from 19.627 to 16.456 µm. These results demonstrate that nanocellulose improves fiber packing and surface homogeneity, indicating its potential for producing cellulose-based materials with superior surface quality.

Keywords: Surface topography; Biomaterials; Cellulose.

1. Introdução

A crescente preocupação com a sustentabilidade e a substituição de materiais derivados de fontes fósseis tem impulsionado o desenvolvimento de materiais renováveis, biodegradáveis e de alto desempenho para aplicações industriais. Nesse contexto, a celulose destaca-se como o biopolímero mais abundante da Terra, sendo amplamente empregada na fabricação de papéis, embalagens, materiais compósitos, biomateriais e produtos de base biológica, devido à sua elevada disponibilidade, biodegradabilidade, baixa densidade e boas propriedades mecânicas (Klemm *et al.,* 2011; Habibi *et al.,* 2010).

Entre os fatores que determinam o desempenho dos materiais celulósicos, a morfologia superficial exerce papel fundamental, influenciando propriedades como imprimibilidade, adesão de revestimentos, absorção de líquidos, propriedades ópticas e desempenho em aplicações de barreira. Nesse sentido, a rugosidade superficial constitui um importante parâmetro de qualidade, pois está diretamente relacionada à distribuição das fibras, à presença de poros e irregularidades e ao grau de compactação da rede fibrosa. Superfícies mais homogêneas favorecem melhor contato entre camadas, maior uniformidade na deposição de revestimentos e melhor desempenho tecnológico, enquanto superfícies excessivamente rugosas podem comprometer processos de impressão, laminação e funcionalização do papel (Hubbe *et al.,* 2008; Spence *et al.,* 2011).

Nos últimos anos, a nanocelulose tem recebido crescente atenção como material de reforço para produtos celulósicos devido às suas propriedades estruturais diferenciadas, incluindo elevada razão de aspecto, grande área superficial específica, elevada cristalinidade e abundância de grupos hidroxila disponíveis para a formação de ligações de hidrogênio. Essas características favorecem a intensificação das interações interfibrilares, promovendo maior coesão da matriz, aumento da densidade da folha e melhoria das propriedades físicas e mecânicas dos materiais produzidos (Klemm *et al.*, 2011; Lavoine *et al.*, 2012).

Diversos estudos demonstram que a incorporação de nanocelulose em papéis e nanopapéis promove o preenchimento dos espaços interfibrilares, reduzindo a porosidade e tornando a superfície mais uniforme. Como consequência, observa-se redução da rugosidade superficial, melhoria das propriedades mecânicas, aumento da resistência à passagem de gases e vapor d'água, além de maior qualidade para impressão e aplicação de revestimentos funcionais (Spence *et al.*, 2011; Shanmugam *et al.*, 2020; Spagnuolo *et al.*, 2022). Segundo Shanmugam *et al.* (2020), a diminuição da rugosidade está diretamente relacionada à reorganização das nanofibrilas durante a formação da rede celulósica, resultando em superfícies mais lisas e homogêneas.

Dessa forma, considerando a importância da rugosidade superficial para o desempenho de papéis destinados a aplicações tecnológicas e o potencial da nanocelulose como agente de reforço estrutural, o objetivo deste trabalho foi avaliar a influência da incorporação de 10% de nanocelulose sobre os parâmetros de rugosidade superficial (Ra, Rq e Rz) de papéis produzidos a partir de polpa celulósica branqueada de *Eucalyptus spp.*

2. Material e métodos

Utilizou-se, como matriz celulósica, acetato de celulose comercial branqueado, obtido a partir de fibras de *Eucalyptus* spp., material amplamente empregado em aplicações industriais.

Obtenção de nanocelulose

Inicialmente, foi preparada uma suspensão aquosa de celulose (2% m/v) que foi submetida a agitação mecânica a 1500 rpm por 15 min (Fisatom, modelo 713D) a temperatura ambiente para promover a dispersão inicial das fibras e reduzir a formação de aglomerados. A solução obtida foi mantida em repouso durante de 24 h, à temperatura ambiente, para completa hidratação das fibras celulósicas e a estabilização da suspensão. Após essa etapa, a suspensão foi submetida ao processo de fibrilação mecânica em um moinho (Masuko Supermasscolloider,

modelo MKCA6-5, Japão) equipado com discos de moagem em óxido de alumínio, sob temperatura ambiente e 20 passagens consecutivas para progressiva redução do tamanho das fibras e a formação de nanocelulose. Durante o processo, a distância entre os discos foi ajustada conforme recomendação do fabricante, de modo a maximizar a ação de cisalhamento sem causar obstruções. Após a moagem, a suspensão obtida apresentou aumento significativo de viscosidade e aspecto levemente opalescente, indicando a formação de nanocelulose. O material foi armazenado em frascos de vidro a 4 °C até as etapas de caracterização.

Formação de folhas de papel

Inicialmente, a nanocelulose foi preparada e utilizada como material de reforço da matriz fibrosa. Em seguida, realizou-se a etapa de incorporação, na qual a nanocelulose foi adicionada à suspensão de fibras celulósicas e homogeneizada por meio de agitação mecânica a 1500 rpm durante 30 minutos (Figura 1), visando promover a dispersão uniforme das nanopartículas e favorecer sua interação com as fibras.

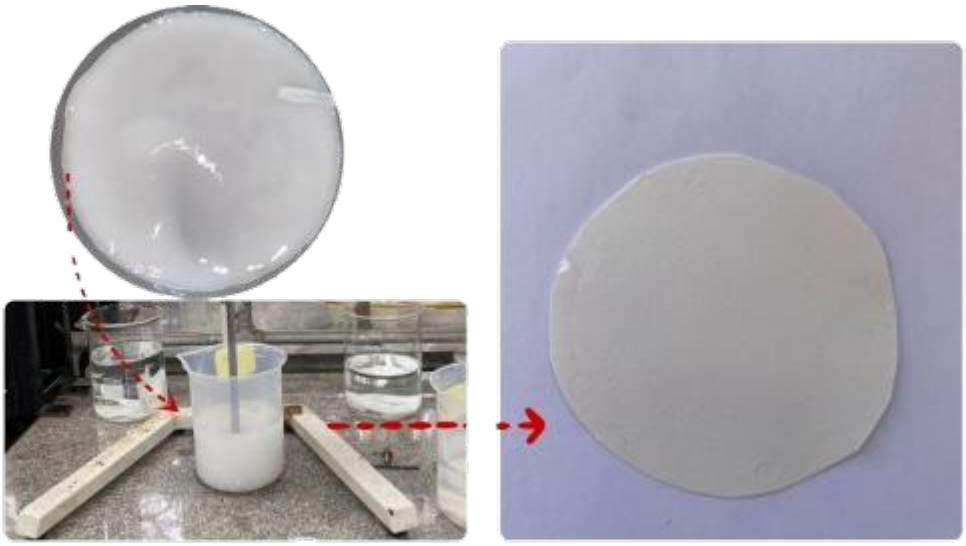


Figura 1 – Etapas de formação do Papel

Após a homogeneização, a suspensão obtida foi submetida ao processo de casting, sendo vertida em um molde apropriado para a formação da folha. Nessa etapa, ocorreu a distribuição da suspensão sobre a superfície do molde, permitindo a conformação inicial do material. Posteriormente, as folhas formadas passaram por uma etapa de pré-secagem e prensagem, sendo

mantidas em estufa a 60 °C durante 2 horas para remoção parcial da água e aumento da estabilidade estrutural da manta fibrosa.

Na sequência, as amostras foram submetidas à termo-prensagem a 115 °C por 5 minutos, sob pressão de 5000 kgf, com o objetivo de promover maior compactação das fibras, reduzir a porosidade e melhorar as propriedades mecânicas e a integridade estrutural das folhas produzidas. Por fim, obteve-se o papel contendo nanocelulose, caracterizado pela formação de uma estrutura mais homogênea e consolidada, adequada para posterior caracterização física, mecânica e morfológica.

Análise de Rugosidade

A rugosidade superficial foi determinada utilizando um rugosímetro digital portátil Mitutoyo SJ-220, equipado com apalpador de diamante, adequado para caracterização topográfica de superfícies celulósicas. As medições foram realizadas em diferentes regiões das amostras, buscando representar a heterogeneidade natural da superfície do papel.

Foram determinados os parâmetros Ra (rugosidade média aritmética), Rq (rugosidade quadrática média) e Rz (altura máxima média do perfil), amplamente utilizados na caracterização da qualidade superficial de materiais.

Os resultados foram expressos como média ± desvio padrão e submetidos à análise estatística, sendo as diferenças entre as médias avaliadas pelo teste de comparação múltipla ao nível de 5% de significância.

3. Resultados e discussão

Formação de folhas e incorporação de nanocelulose

A nanocelulose obtida após o processo de preparação apresentou a formação de uma película contínua, de coloração esbranquiçada e aparência relativamente homogênea, sem a presença evidente de fissuras ou aglomerados macroscópicos. Essas características sugerem uma boa dispersão das nanofibrilas durante o processamento, fator importante para favorecer sua incorporação à matriz fibrosa e maximizar a interação entre os componentes do compósito. Segundo Huang *et al.* (2020), a formação de uma estrutura uniforme também indica que o método empregado foi eficiente na obtenção do material, contribuindo para uma distribuição mais homogênea da nanocelulose nas folhas produzidas.

Análise de Rugosidade

Os valores médios dos parâmetros de rugosidade superficial encontram-se apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 – Parâmetros de rugosidade superficial dos papéis.

Amostras	**Ra (**µm)	**Rz (**µm)	**Rq (**µm)
Controle	3.348 ± 0.205 [d]	19.627 ± 1.074 [d]	4.142 ± 0.255 [d]
10% NC	2.705 ± 0.061 [c]	16.456 ± 0.271 [c]	3.375 ± 0.069 [c]

A incorporação de 10% de nanocelulose promoveu redução estatisticamente significativa ($p < 0,05$) em todos os parâmetros de rugosidade avaliados. Em relação ao papel controle, evidenciando que a presença das nanofibrilas modificou de forma expressiva a topografia superficial da matriz celulósica.

Esse comportamento pode ser atribuído à elevada área superficial específica e ao reduzido diâmetro das nanofibrilas, que favorecem o preenchimento dos vazios interfibrilares e aumentam a formação de ligações de hidrogênio entre as fibras da matriz celulósica. Esse efeito promove maior compactação estrutural, reduzindo irregularidades superficiais e resultando em uma topografia mais homogênea, conforme observado por Shanmugam *et al.* (2020) e confirmado por estudos recentes sobre nanopapéis, que relacionam a redução da rugosidade ao aumento da densidade da rede fibrosa decorrente do preenchimento dos poros por nanofibrilas celulósicas.

A redução simultânea dos parâmetros Ra, Rq e Rz indica que a incorporação da nanocelulose promoveu não apenas a diminuição da rugosidade média, mas também a atenuação da amplitude entre picos e vales da superfície. Essa resposta é característica de matrizes celulósicas mais densificadas e com melhor distribuição das fibras, nas quais a rede de nanofibrilas atua como agente de ligação, aumentando a coesão estrutural por meio de interações intermoleculares, principalmente ligações de hidrogênio. Além de reduzir a rugosidade, essa reorganização estrutural favorece propriedades como resistência mecânica, desempenho de barreira e qualidade superficial para revestimentos e impressão (Kargupta *et al.*, 2022).

4. Conclusões

A incorporação de 10% de nanocelulose promoveu redução significativa dos parâmetros Ra, Rq e Rz em comparação ao papel controle, evidenciando melhoria da qualidade superficial da matriz celulósica. A redução da rugosidade está associada ao preenchimento dos espaços interfibrilares e ao aumento das interações entre as fibras promovidos pelas nanofibrilas. Os resultados demonstram que a utilização de nanocelulose representa uma estratégia eficiente para obtenção de papéis com superfície mais homogênea, característica desejável para aplicações que exigem elevado acabamento superficial, como embalagens, revestimentos e substratos para impressão.

5. Agradecimentos

Os autores agradecem à Universidade do Estado de Santa Catarina (UDESC), em especial ao Centro de Ciências Agroveterinárias (CAV) e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal (PPGEF), pela infraestrutura, suporte técnico-científico e apoio ao desenvolvimento desta pesquisa. Agradecem também à Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), em especial ao Instituto de Ciência e Tecnologia de Alimentos (ICTA), pela disponibilização de infraestrutura e colaboração na realização das análises experimentais. Por fim, agradecem ao Programa de Bolsas Universitárias de Monitoria, Pesquisa e Extensão (PROMOP/UDESC) pela concessão da bolsa de estudos, fundamental para a execução deste trabalho.

6. Referências bibliográficas

Habibi, Y., Lucia, L. A., & Rojas, O. J. (2010). Cellulose nanocrystals: Chemistry, self-assembly, and applications. *Chemical Reviews*, *110*(6), 3479–3500. https://doi.org/10.1021/cr900339w

Huang, L., He, L., Gao, W., Zeng, J., Wang, B., Xu, J., & Chen, K. (2020). Distribution analysis of cellulose nanofibrils in paper handsheets: Dye-labeled method. *Carbohydrate Polymers*, *247*, Artigo 116706. https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2020.116706

Hubbe, M. A., Rojas, O. J., Lucia, L. A., & Sain, M. (2008). Cellulosic nanocomposites: A review. *BioResources*, *3*(3), 929–980.

Kargupta, W., et al. (2022). Preparation and benchmarking of novel cellulose nanopaper. *Cellulose*, *29*(8), 4393–4411.

Klemm, D., Kramer, F., Moritz, S., Lindström, T., Ankerfors, M., Gray, D., & Dorris, A. (2011). Nanocelluloses: A new family of nature-based materials. *Angewandte Chemie International Edition*, *50*(24), 5438–5466. https://doi.org/10.1002/anie.201001273

Lavoine, N., Desloges, I., Dufresne, A., & Bras, J. (2012). Microfibrillated cellulose – Its barrier properties and applications in cellulosic materials: A review. *Carbohydrate Polymers*, *90*(2), 735–764. https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2012.05.026

Shanmugam, K., Batchelor, W., & Varanasi, S. (2020). Engineering surface roughness of nanocellulose film via spraying to produce smooth substrates. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, *589*, Artigo 124396. https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2019.124396

Spagnuolo, L., et al. (2022). Nanocellulose for paper and textile coating: The importance of surface chemistry. *ChemPlusChem*, *87*(8), Artigo e202200204. https://doi.org/10.1002/cplu.202200204

Spence, K. L., Venditti, R. A., Habibi, Y., Rojas, O. J., & Pawlak, J. J. (2011). The effect of chemical composition on microfibrillar cellulose films from wood pulps: Mechanical processing and physical properties. *Bioresource Technology*, *102*(3), 2703–2709. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.10.033

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Influência da lignina residual no teor de compostos fenólicos de filmes de nanocelulose

Gabriela Teixeira da Silva[1]; Aline Sobreira Bezerra[2]; Cristiane Pedrazzi[1]; Rodrigo Coldebella[1]; Daniel Tavares de Farias[1]; Anderson Stoffels Mallmann[3]; Washington Luiz Esteves Magalhães[4]; Gustavo Ventorim[5]

[1] Laboratório de Química da Madeira (LAQUIM), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, Departamento de Ciências Florestais, Universidade Federal de Santa Maria – UFSM, Santa Maria, RS, Brasil – UFSM, Av. Roraima 1000, 97105-900, Santa Maria, RS, Brasil
[2] Departamento de Ciência e Tecnologia de Alimentos, Universidade Federal de Santa Maria – UFSM, Santa Maria, RS, Brasil – UFSM, Av. Roraima 1000, 97105-900, Santa Maria, RS, Brasil
[3]TANAC, Rua Torbjorn Weibull, 199, Montenegro, RS, 95780-000, Brasil
[4] Embrapa Florestas, Estrada da Ribeira, km 111, Colombo, PR, 83411-000, Brasil
[5] Universidade Estadual Paulista – UNESP, Instituto de Ciências e Engenharia – Câmpus de Itapeva, Rua Geraldo Alckmin, 519 – Vila N. Sra. De Fátima, Itapeva, SP, 18409-010, Brasil

Resumo: A lignina residual em filmes de nanocelulose pode agregar propriedades funcionais e ampliar seu potencial de aplicação em embalagens sustentáveis. Assim, este trabalho teve como objetivo avaliar a influência do teor de lignina residual no conteúdo de compostos fenólicos totais de filmes produzidos a partir de polpa kraft de *Eucalyptus urograndis*. Filmes com 3,63% (LCNF-Br), 1,77% (LCNF-PBl) e 0,46% (LCNF-Bl) de lignina residual foram avaliados pelo método de Folin-Ciocalteu. O maior teor de compostos fenólicos foi obtido para o filme LCNF-Br (24,20 mg EAG g^{-1}), seguido por LCNF-PBl (15,42 mg EAG g^{-1}) e LCNF-Bl (14,06 mg EAG g^{-1}). Os resultados demonstram que maiores teores de lignina residual favorecem o aumento dos compostos fenólicos, indicando potencial para embalagens sustentáveis.

Palavras-chave: *Eucalyptus urograndis*; Biomateriais; Potencial antioxidante

Influence of Residual Lignin on the Phenolic Compound Content of Nanocellulose Films

Abstract: Residual lignin in nanocellulose films can impart functional properties and enhance their potential for sustainable packaging applications. This study aimed to evaluate the influence of residual lignin content on the total phenolic content of nanocellulose films produced from *Eucalyptus urograndis* kraft pulp. Films containing 3.63% (LCNF-Br), 1.77% (LCNF-PBl), and 0.46% (LCNF-Bl) residual lignin were evaluated using the Folin–Ciocalteu assay. The highest total phenolic content was observed for the LCNF-Br film (24.20 mg GAE g^{-1}), followed by LCNF-PBl (15.42 mg GAE g^{-1}) and LCNF-Bl (14.06 mg GAE g^{-1}). The results demonstrate that higher residual lignin contents increase the total phenolic content, indicating the potential of these materials for sustainable packaging applications.

Keywords: *Eucalyptus urograndis*; Biomaterials; Antioxidant potential

1. Introdução

A crescente demanda por materiais sustentáveis tem impulsionado o desenvolvimento de embalagens produzidas a partir de recursos renováveis e biodegradáveis. Nesse contexto, a nanocelulose destaca-se como um biomaterial promissor devido à elevada resistência mecânica, baixa densidade, biodegradabilidade e capacidade de formação de filmes, características que favorecem sua aplicação em embalagens para alimentos e outros produtos de alto valor agregado (Liu et al., 2021; Wang et al., 2024).

As nanofibrilas de celulose contendo lignina residual (LCNF) têm despertado interesse por possibilitarem a obtenção de materiais funcionais sem a completa remoção da lignina durante o processamento da biomassa. Além de reduzir o consumo de reagentes químicos, a lignina residual pode conferir aos filmes maior estabilidade térmica, proteção contra radiação ultravioleta, hidrofobicidade e propriedades associadas aos grupos fenólicos presentes em sua estrutura (Liu et al., 2021; Kumar et al., 2023).

A lignina é uma macromolécula aromática tridimensional rica em grupos hidroxila fenólicos, que conferem propriedades funcionais aos materiais lignocelulósicos e estão associados ao seu potencial antioxidante (Pedrazzi et al., 2019; Ge et al., 2014). Entretanto, embora a influência da lignina residual nas propriedades físicas e mecânicas de filmes de nanocelulose já tenha sido demonstrada, ainda são limitados os estudos que investigam seu efeito sobre a disponibilidade de compostos fenólicos nesses materiais, especialmente quando produzidos a partir de polpa kraft de *Eucalyptus urograndis* (Gentil et al., 2023).

Assim, este trabalho teve como objetivo avaliar a influência do teor de lignina residual no conteúdo de compostos fenólicos totais de filmes de nanocelulose produzidos a partir de polpa kraft de *Eucalyptus urograndis*.

2. Material e métodos

2.1 Produção dos filmes de nanocelulose

Os filmes de nanocelulose contendo diferentes teores de lignina residual (LCNF) utilizados neste estudo foram produzidos a partir de polpa kraft marrom de *Eucalyptus urograndis*, correspondendo aos tratamentos LCNF-Br (3,63%), LCNF-PBl (1,77%) e LCNF-Bl (0,46%), conforme a metodologia descrita por Gentil et al., (2023), com adaptações. As principais etapas de produção dos filmes e da determinação dos compostos fenólicos totais estão apresentadas no fluxograma da Figura 1, enquanto a Figura 2 apresenta o aspecto visual dos filmes obtidos.

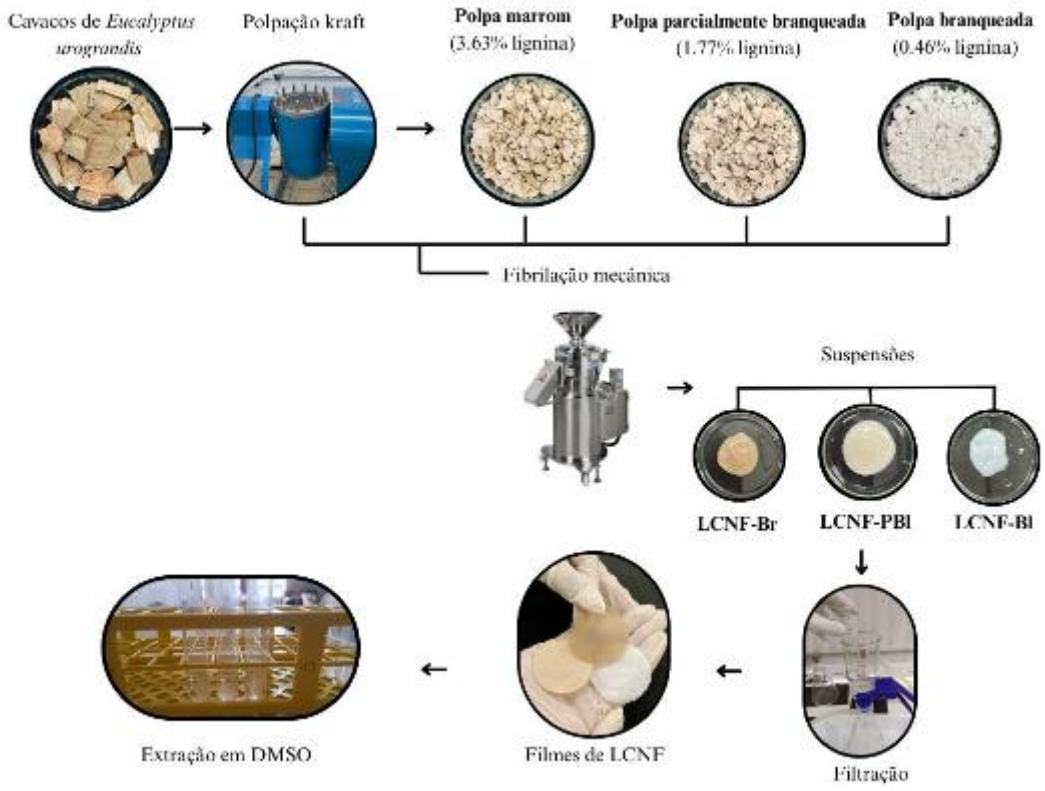


Figura 1 - Fluxograma das etapas de produção dos filmes de LCNF e determinação dos compostos fenólicos totais.

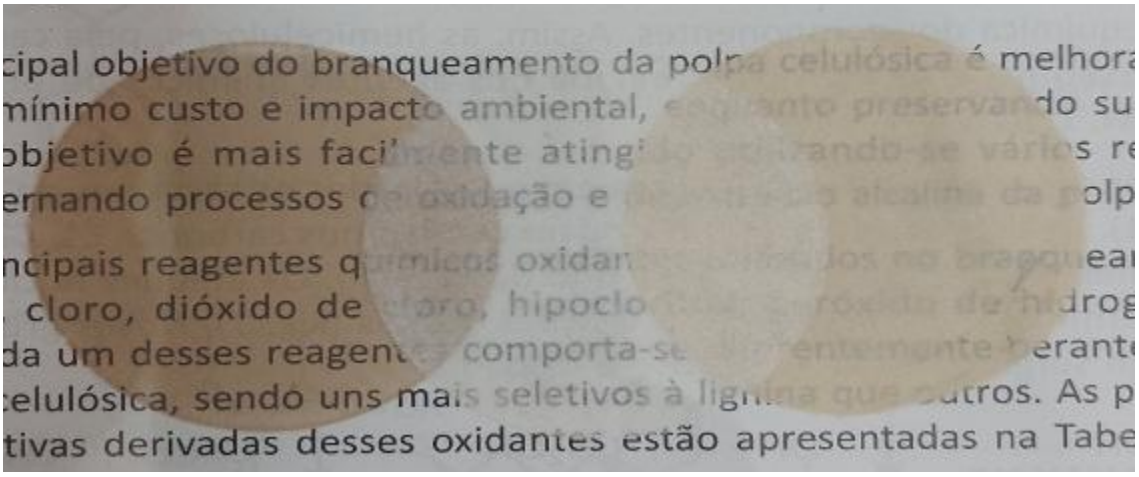


Figura 2 - Aspecto visual dos filmes de nanocelulose produzidos com diferentes teores de lignina residual: LCNF-Br (3,63%), LCNF-Bl (0,46%) e LCNF-PBl (1,77%), da esquerda para a direita.

2.2 Seleção do solvente extrator

Antes da determinação dos compostos fenólicos totais, foi realizado um ensaio preliminar para seleção do solvente extrator mais adequado, conforme metodologia descrita por

Solhi et al., (2023), com adaptações. Foram avaliados dimetilsulfóxido (DMSO), etanol absoluto, etanol 20% (v/v), acetona e água destilada.

Fragmentos dos filmes, com massas entre 0,0040 e 0,0050 g, foram imersos em 5 mL de cada solução extratora e mantidos à temperatura ambiente durante 90 dias. Nos períodos de avaliação, as amostras foram homogeneizadas em agitador tipo vórtex por 1 minuto (40 Hz) e monitoradas quanto às alterações visuais de coloração e à integridade física dos filmes, sendo realizados registros fotográficos periódicos. Com base nessa avaliação, o DMSO foi selecionado como solvente extrator para a determinação dos compostos fenólicos totais.

2.3 Determinação dos compostos fenólicos totais

O teor de compostos fenólicos totais (CFT) foi determinado pelo método de Folin-Ciocalteu, conforme descrito por Bezerra et al., (2013). Foram utilizados 0,1 mL dos extratos, preparados na concentração de 0,8 mg mL^{-1}, aos quais foram adicionados 2,5 mL do reagente Folin-Ciocalteu previamente diluído em água destilada (1:10). Após 5 minutos, adicionaram-se 2,0 mL de solução aquosa de carbonato de sódio a 7,5%.

A reação foi conduzida durante 1 hora ao abrigo da luz e, posteriormente, a absorbância foi determinada em espectrofotômetro a 740 nm. O teor de compostos fenólicos totais foi obtido por interpolação da absorbância das amostras em curva analítica de ácido gálico, sendo os resultados expressos em miligramas de equivalente de ácido gálico por grama de amostra (mg EAG g^{-1}). As análises foram realizadas em triplicata e os resultados submetidos à análise de variância (ANOVA). Quando constatadas diferenças significativas pelo teste F, as médias foram comparadas pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade ($p < 0,05$).

3. Resultados e discussão

3.1 Compostos fenólicos totais

O filme LCNF-Br apresentou o maior teor de compostos fenólicos totais (24,20 mg EAG g^{-1}), diferindo significativamente dos demais tratamentos ($p < 0,05$). Os filmes LCNF-PBl e LCNF-Bl apresentaram valores inferiores, de 15,42 e 14,06 mg EAG g^{-1}, respectivamente, demonstrando que o aumento do teor de lignina residual resultou em maior concentração de compostos fenólicos nos filmes (Figura 3).

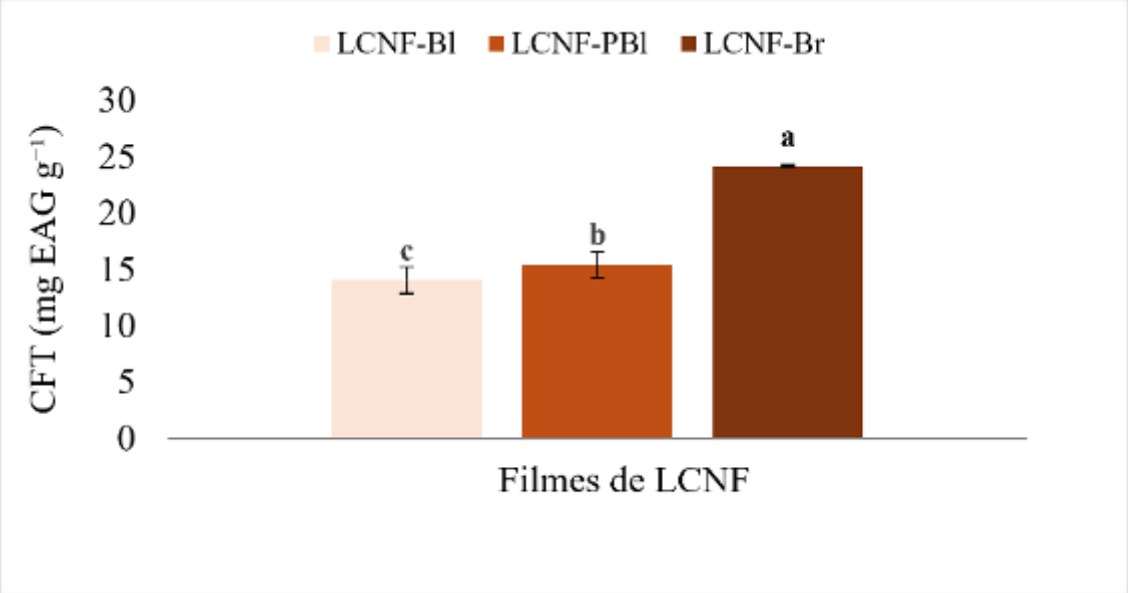


Figura 3 - Teor de compostos fenólicos totais dos filmes de nanocelulose produzidos com diferentes teores de lignina residual.
As barras representam a média ± desvio-padrão. Letras diferentes indicam diferença significativa entre os tratamentos pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

O aumento do teor de compostos fenólicos observado no filme LCNF-Br pode ser atribuído à maior quantidade de lignina residual presente na matriz lignocelulósica. A lignina é uma macromolécula aromática rica em grupos hidroxila fenólicos e, durante a deslignificação, parte dessas estruturas é removida juntamente com a lignina, reduzindo a disponibilidade de grupos fenólicos passíveis de extração e quantificação pelo método de Folin-Ciocalteu. Assim, a maior quantidade de lignina residual preservada após a deslignificação favoreceu a disponibilidade de grupos fenólicos extraíveis e, consequentemente, maiores teores de compostos fenólicos totais nos filmes.

Essa interpretação é consistente com os resultados apresentados por Ge et al., (2014), que associaram maiores teores de lignina à maior disponibilidade de grupos fenólicos em materiais lignocelulósicos. Da mesma forma, Liu et al., (2021) destacam que a lignina residual pode conferir propriedades funcionais aos materiais à base de nanocelulose devido à presença de grupos fenólicos em sua estrutura.

Apesar do método de Folin-Ciocalteu permitir a determinação do conteúdo de compostos fenólicos totais, ele não possibilita identificar ou quantificar individualmente os compostos fenólicos presentes. Dessa forma, estudos futuros poderão aprofundar a caracterização química dos extratos obtidos dos filmes, bem como investigar a relação entre o conteúdo de compostos fenólicos e outras propriedades funcionais desses materiais.

Os resultados obtidos demonstram que o controle do teor de lignina residual representa uma estratégia para modular o conteúdo de compostos fenólicos em filmes de nanocelulose, ampliando o potencial desses materiais para futuras aplicações em embalagens sustentáveis.

4. Conclusões

O filme LCNF-Br, contendo 3,63% de lignina residual, apresentou o maior teor de compostos fenólicos, demonstrando que a preservação da lignina favorece a disponibilidade de grupos fenólicos na matriz do material. Esses resultados indicam que a presença de lignina residual durante a produção de filmes de LCNF pode agregar propriedades funcionais aos materiais, ampliando seu potencial de aplicação em embalagens sustentáveis com potencial antioxidante. Além disso, os resultados obtidos contribuem para o desenvolvimento de materiais de base renovável voltados à produção de embalagens ativas, capazes de agregar valor funcional sem comprometer sua sustentabilidade.

5. Agradecimentos

Os autores expressam seus agradecimentos à Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), ao Laboratório de Química da Madeira (LAQUIM), pela infraestrutura e suporte técnico disponibilizados para o desenvolvimento desta pesquisa, e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio financeiro concedido por meio de bolsa de estudos.

6. Referências bibliográficas

Bezerra, A. S., Nörnberg, J. L., Lima, F. O., Rosa, M. B., Carvalho, L. M. (2013). Parâmetros climáticos e variação de compostos fenólicos em cevada. *Ciência Rural*, *43*(9), 1546–1552. https://doi.org/10.1590/S0103-84782013000900003

Ge, Y., Wei, Q., Li, Z. (2014). Preparation and evaluation of the free radical scavenging activities of nanoscale lignin biomaterials. *BioResources*, *9*(4), 6699–6706. https://doi.org/10.15376/biores.9.4.6699-6706

Gentil, M., Magalhães, W. L. E., Martins, T. R., Mallmann, A. S., Malucelli, L. C., Coldebella, R., Pedrazzi, C. (2023). Influence of residual lignin on *Acacia mearnsii* De Wild nanofibrillated cellulose suspensions and films. *Cellulose*, *30*(17), 10867–10877. https://doi.org/10.1007/s10570-023-05546-5

Kumar, A., Sood, A., Maiti, P., Han, S. S. (2023). Lignin-containing nanocelluloses (LNCs) as renewable and sustainable alternatives: Prospects and challenges. *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry*, *41*, 100830. https://doi.org/10.1016/j.cogsc.2023.100830

Liu, K., Du, H., Zheng, T., Liu, W., Zhang, M., Liu, H., Zhang, X., Si, C. (2021). Lignin-containing cellulose nanomaterials: Preparation and applications. *Green Chemistry*, *23*(24), 9723–9746. https://doi.org/10.1039/D1GC02841C

Pedrazzi, C., Dick, G., Coldebella, R., Gentil, M., Giesbrecht, B. M., Rosa, R. C. da. (2019). *Química da madeira* (1ª ed.). Universidade Federal de Santa Maria.

Solhi, L., Guccini, V., Heise, K., Solala, I., Niinivaara, E., Xu, W., Mihhels, K., Kröger, M., Meng, Z., Wohlert, J., Tao, H., Cranston, E. D., Kontturi, E. (2023). *Understanding nanocellulose−water interactions: Turning a detriment into an asset*. *Chemical Reviews*, *123*(4), 1925–2015. https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.2c00611

Wang, X., Guo, J., Ren, H., Jin, J., He, H., Jin, P., Wu, Z., Zheng, Y. (2024). Research progress of nanocellulose-based food packaging. *Trends in Food Science & Technology*, *143*, 104289. https://doi.org/10.1016/j.tifs.2023.104289

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Influência da Moagem Masuko e da Dispersão em Ultra-Turrax na Distribuição do Tamanho de Partículas de Celulose de *Eucalyptus spp*.

Thâmara dos Santos Osaki[1]; Polliana D`Angelo Rios[1]; Alessandro de Oliveira Rios[2]; Alexsandro Bayestorff da Cunha[1]; Natalia Durigon Melo[1]; José Fellip Catique Marinho[1]; Tarcisio Francisco de Camargo[1]; Rodrigo Schmitz[1];

[1] Universidade Estadual de Santa Catarina, Centro Agroveterinario (CAV), Lages- SC.
[2] Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto de Ciência e Tecnologia de Alimentos (ICTA), Porto Alegre- RS.

Resumo: A caracterização granulométrica de suspensões celulósicas é fundamental para compreender os efeitos de diferentes processos mecânicos sobre a estrutura e a homogeneidade das partículas. Neste estudo, avaliou-se a influência da moagem em moinho Masuko e da dispersão mecânica em Ultra-Turrax na distribuição do tamanho de partículas de celulose de *Eucalyptus spp.,* fornecida por empresa do setor de celulose e papel. As amostras foram analisadas nas condições controle sem diluição, controle diluído, moagem em moinho Masuko (30 passes), moagem seguida de diluição, tratamento em Ultra-Turrax a 70.000 rpm por 15 minutos e tratamento em Ultra-Turrax seguido de diluição. A caracterização foi realizada em analisador granulométrico Microtrac FLEX, utilizando água destilada como meio dispersante, sendo as análises conduzidas em triplicata. Os resultados demonstraram que os tratamentos mecânicos influenciaram significativamente a distribuição granulométrica e o índice de polidispersidade (PDI) das suspensões. A amostra controle diluída apresentou o menor PDI (0,305), indicando maior homogeneidade, enquanto a amostra submetida ao Ultra-Turrax seguida de diluição apresentou o maior valor (4,420), evidenciando elevada heterogeneidade de partículas. As amostras processadas em moinho Masuko também apresentaram aumento da polidispersidade em relação ao controle. Os resultados demonstram que os processos mecânicos empregados modificam significativamente a distribuição de tamanho das partículas de celulose, influenciando diretamente a homogeneidade das suspensões e seu potencial de aplicação em diferentes processos industriais.

Palavras-chave: Granulometria; Polidispersidade; Microtrac.

Influence of Masuko Milling and Ultra-Turrax Dispersion on the Particle Size Distribution of *Eucalyptus spp.* Cellulose

Abstract: The particle size characterization of cellulose suspensions is essential for understanding the effects of mechanical processing on particle structure and homogeneity. This study evaluated the influence of Masuko milling and Ultra-Turrax mechanical dispersion on the particle size distribution of *Eucalyptus spp.*, cellulose supplied by a pulp and paper company. Samples were analyzed under the following conditions: undiluted control, diluted control, Masuko milling (30 passes), Masuko milling followed by dilution, Ultra-Turrax treatment at 5,000 rpm for 15 minutes, and Ultra-Turrax treatment followed by dilution. Particle size characterization was performed using a Microtrac FLEX particle size analyzer, with distilled water as the dispersing medium. All analyses were carried out in triplicate. The results demonstrated that the mechanical treatments significantly affected particle size distribution and the polydispersity index (PDI) of the suspensions. The diluted control sample showed the lowest PDI value (0.305), indicating greater homogeneity. In contrast, the Ultra-Turrax-treated and diluted sample exhibited the highest PDI value (4.420), indicating a highly heterogeneous particle distribution. Samples processed by Masuko milling also showed increased polydispersity compared to the control. Overall, the results indicate that the applied mechanical processes significantly modify the particle size distribution of cellulose, directly affecting suspension homogeneity and its potential for industrial applications.

Keywords: Granulometry; Polydispersity; Particle Characterization.

1. Introdução

Os recursos florestais desempenham papel fundamental no fornecimento de matérias-primas renováveis para diversos setores industriais, destacando-se a madeira e seus componentes estruturais como importantes fontes para o desenvolvimento de materiais sustentáveis. A celulose é o biopolímero renovável mais abundante da Terra e apresenta grande potencial para aplicações em papéis especiais, compósitos, embalagens sustentáveis e materiais nanoestruturados. Seu interesse tecnológico decorre de características como biodegradabilidade, elevada resistência mecânica e ampla disponibilidade proveniente de recursos florestais renováveis (Ferreira *et al.*,2020; Lengowski *et al.*, 2018).

No Brasil, a celulose obtida de espécies do gênero *Eucalyptus* destaca-se pela elevada produtividade florestal e pelas propriedades adequadas para aplicações industriais. O processamento mecânico dessas fibras tem sido amplamente utilizado para promover a redução dimensional e aumentar a área superficial específica do material, favorecendo o desenvolvimento de celuloses microfibriladas e nanofibriladas (Qin, Qiu e Zhu, 2016).

Entre os métodos de processamento mecânico, o moinho Masuko (Super Masscolloider) é amplamente empregado para promover fibrilação das fibras celulósicas por meio de elevadas forças de cisalhamento. Estudos demonstram que sucessivos passes nesse equipamento reduzem significativamente as dimensões das fibras, podendo produzir estruturas em escala micro e nanométrica (Lengowski *et al.*, 2018; Qin, Qiu e Zhu, 2016).

A caracterização granulométrica constitui uma importante ferramenta para avaliar a eficiência desses processos, uma vez que alterações no tamanho e na distribuição das partículas influenciam diretamente propriedades reológicas, estabilidade de suspensões e desempenho tecnológico do material (Jakubek *et al.*, 2018).

Além do tamanho médio das partículas, o índice de polidispersidade (PDI) é frequentemente utilizado para avaliar a homogeneidade de sistemas particulados. Segundo Zhang e Zou (2019), valores menores de PDI indicam distribuições mais uniformes, enquanto valores elevados refletem maior heterogeneidade de tamanhos.

Dessa forma, o objetivo deste trabalho foi avaliar a influência da moagem em moinho Masuko e da dispersão mecânica em Ultra-Turrax sobre a distribuição de tamanho de partículas e o índice de polidispersidade de suspensões de celulose de *Eucalyptus spp.*

2. Material e métodos

Utilizou-se, como matriz celulósica, acetato de celulose comercial branqueado, obtido a partir de fibras de *Eucalyptus* spp., material amplamente empregado em aplicações industriais.

Preparação das amostras

Inicialmente, foi preparada uma suspensão aquosa de celulose (2% m/v) que foi submetida a agitação mecânica a 1500 rpm por 15 min (Fisatom, modelo 713D) a temperatura ambiente para promover a dispersão inicial das fibras e reduzir a formação de aglomerados. Em seguida, a suspensão foi submetida ao processo de fibrilação mecânica em moinho Masuko, totalizando 30 passagens consecutivas para obtenção da nanocelulose.

Após a fibrilação, a suspensão foi homogeneizada utilizando um Ultra-Turrax, operando a 70.000 rpm durante 15 minutos. Posteriormente, foi coletada uma alíquota de 2 mL da suspensão e submetida à análise de distribuição do tamanho das partículas em equipamento Microtrac Nanotrac. Para cada amostra, foram realizadas três corridas de medição, com duração de 30 segundos cada, sendo o resultado final obtido pela média das três corridas. Em seguida, uma nova alíquota de 2 mL da suspensão foi coletada e diluída com 1 mL de água destilada, sendo posteriormente submetida à mesma análise, sob as mesmas condições e também com três corridas de 30 segundos.

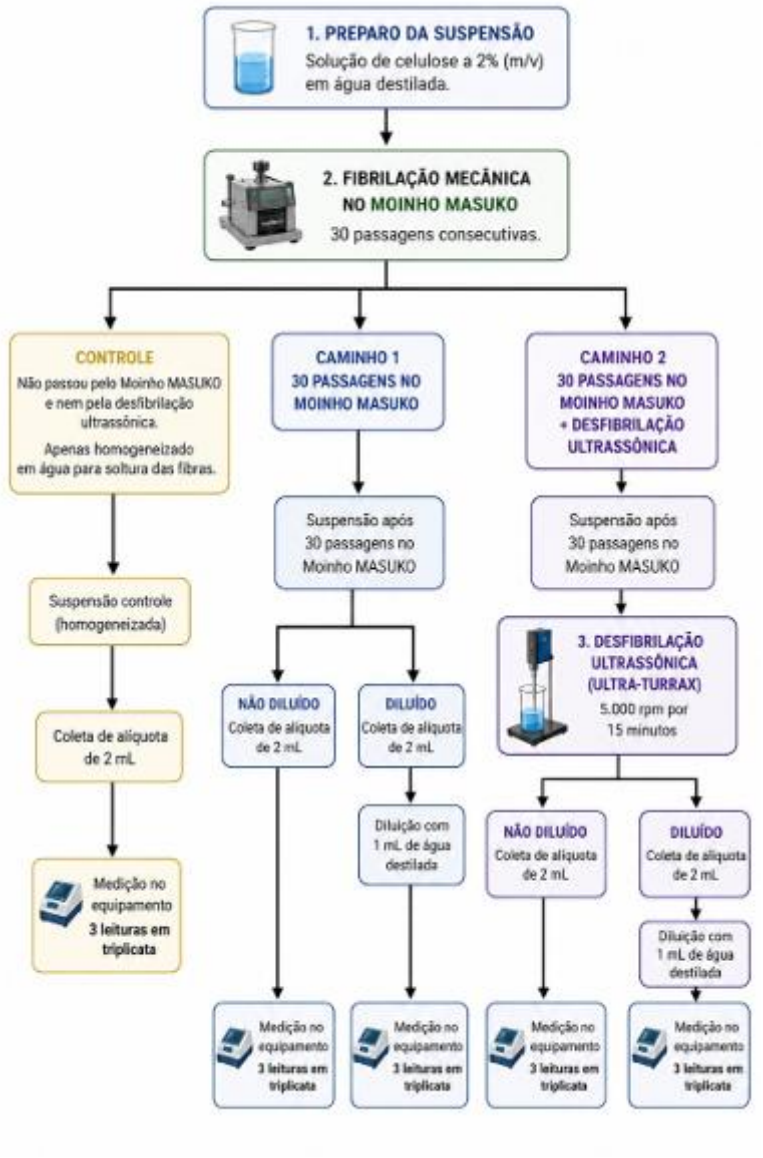


Figura 1 – Delineamento experimental do processo.

A distribuição de tamanho de partículas foi determinada utilizando analisador granulométrico Microtrac FLEX, com resultados expressos em nanômetros. Foram obtidos os diâmetros característicos das partículas, a distribuição volumétrica (%) e o índice de polidispersidade (PDI). Todas as análises foram realizadas em triplicata (n = 3), sendo apresentados os valores médios obtidos.

3. Resultados e discussão

Os tratamentos mecânicos promoveram alterações na distribuição do tamanho das partículas da celulose de Eucalyptus spp. A análise realizada em equipamento Microtrac Nanotrac evidenciou uma distribuição ampla de tamanhos para as amostras submetidas à

fibrilação mecânica. Na amostra apresentada, o índice de polidispersidade (PDI) foi de 0,305, indicando a presença de uma distribuição heterogênea de tamanhos, como pode ser observado na figura 2.

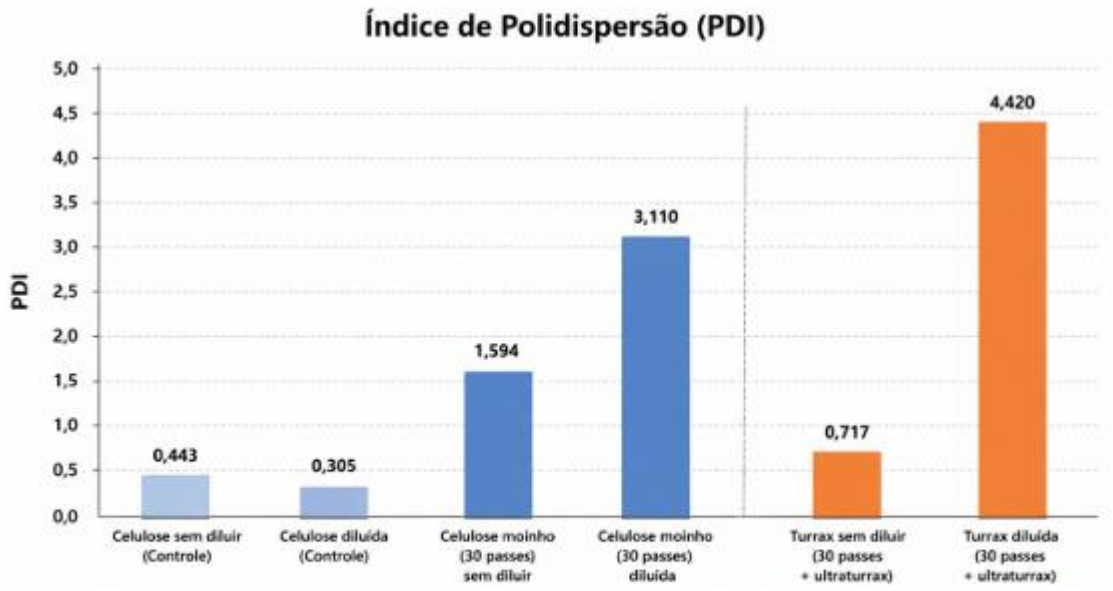


Figura 2 – Valores de PDI para os tratamentos.

Esse comportamento é consistente com estudos que relatam que processos mecânicos intensivos promovem ruptura irregular das fibras, gerando populações simultâneas de partículas finas e fragmentos de maiores dimensões (Ferreira *et al.*, 2020; Dubey, Toh e Yeh, 2018).

O tratamento em Ultra-Turrax apresentou valores intermediários de PDI quando comparado aos materiais controle e às amostras moídas. Esse resultado sugere que o cisalhamento promovido pelo equipamento foi suficiente para dispersar parte dos aglomerados sem produzir fragmentação tão intensa quanto a observada na moagem.

A elevada polidispersidade observada após a diluição das amostras processadas pode estar associada à reorganização dos aglomerados e à coexistência de partículas em diferentes escalas dimensionais. Estudos envolvendo suspensões celulósicas demonstram que a dispersão e a estabilidade das partículas dependem fortemente das interações interfibrilares e das condições de preparação da suspensão (Jakubek *et al.*, 2018).

Dessa forma, embora a fibrilação mecânica tenha promovido a redução das dimensões da celulose e originado uma fração em escala nanométrica, a distribuição permaneceu ampla, com predominância de partículas de maior dimensão quando considerada a mediana da distribuição. Esse comportamento pode estar associado à ocorrência de agregação e à dificuldade de individualização completa das fibrilas após o tratamento mecânico.

4. Conclusões

A moagem em moinho Masuko e a dispersão em Ultra-Turrax alteraram significativamente a distribuição de tamanho de partículas da celulose de *Eucalyptus spp.*

A diluição do material controle promoveu redução do índice de polidispersidade, indicando maior homogeneidade da suspensão.

As amostras submetidas à moagem apresentaram aumento do PDI, evidenciando maior heterogeneidade granulométrica decorrente da fragmentação mecânica das fibras.

O tratamento em Ultra-Turrax apresentou comportamento intermediário, enquanto a combinação entre dispersão mecânica e diluição resultou no maior índice de polidispersidade observado.

Os resultados demonstram que o processamento mecânico exerce influência direta sobre as características granulométricas da celulose, constituindo importante ferramenta para adequação do material às diferentes aplicações industriais.

5. Agradecimentos

Os autores agradecem à Universidade do Estado de Santa Catarina (UDESC), em especial ao Centro de Ciências Agroveterinárias (CAV) e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal (PPGEF), pela infraestrutura, suporte técnico-científico e apoio ao desenvolvimento desta pesquisa. Agradecem também à Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), em especial ao Instituto de Ciência e Tecnologia de Alimentos (ICTA), pela disponibilização de infraestrutura e colaboração na realização das análises experimentais. Por fim, agradecem ao Programa de Bolsas Universitárias de Monitoria, Pesquisa e Extensão (PROMOP/UDESC) pela concessão da bolsa de estudos, fundamental para a execução deste trabalho.

6. Referências bibliográficas

Dubey, R., Toh, Y. R., & Yeh, A. I. (2018). Enhancing cellulose functionalities by size reduction using media-mill. *Scientific Reports*, *8*(1), 11343. https://doi.org/10.1038/s41598-018-29777-w

Ferreira, R. R., Souza, A. G., Nunes, L. L., Shahi, N., Rangari, V. K., & Rosa, D. dos S. (2020). Use of ball mill to prepare nanocellulose from eucalyptus biomass: Challenges and process optimization by combined method. *Materials Today Communications*, *22*, 100755. https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2019.100755

Jakubek, Z. J., Chen, M., Couillard, M., Leng, T., Liu, L., Zou, S., Baxa, U., Clogston, J., Hamad, W. Y., & Johnston, L. J. (2018). Characterization challenges for a cellulose nanocrystal reference material: Dispersion and particle size distributions. *Journal of Nanoparticle Research*, *20*(4), 98. https://doi.org/10.1007/s11051-018-4194-6

Lengowski, E. C., Muñiz, G. I. B. de, Andrade, A. S. de, Simon, L. C., & Nisgoski, S. (2018). Morphological, physical and thermal characterization of microfibrillated cellulose. *Revista Árvore*, *42*(1), e420113. https://doi.org/10.1590/1806-90882018000100013

Melo, R. R., Stangerlin, D. M., Santana, R. R. C., Pedrosa, T. D., & Tomazello Filho, M. (2018). Caracterização morfológica, física e térmica de celuloses microfibriladas. *Revista Árvore*, *42*(1). https://doi.org/10.1590/1806-90882018000100013

Qin, Y., Qiu, X., & Zhu, J. Y. (2016). Understanding longitudinal wood fiber ultra-structure for producing cellulose nanofibrils using disk milling with diluted acid prehydrolysis. *Scientific Reports*, *6*, 35602. https://doi.org/10.1038/srep35602

Zhang, J., & Zou, W. (2019). A novel method for isolating nanocrystalline cellulose from eucalyptus hardwood. *Journal of Analytical Sciences, Methods and Instrumentation*, *9*(3), 51–62. https://doi.org/10.4236/jasmi.2019.93006

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Influência da pirólise nas propriedades químicas e estocagem de carbono do biochar de *Hevea brasiliensis*

Vitoria Cristina Avelino Faria[1]; Raquel Julia Cipriano dos Santos[1]; Isabella Santana Sampaio[1]; Braulio da Silva de Oliveira[1]; Renata Pereira Lopes Moreira[1]; Kleryton Luiz Alves de Oliveira[1]; Antônio de Pádua Alvarenga[1]; Fernanda Jorge de Jesus[1]

[1] Universidade Federal de Viçosa

Resumo: A biomassa residual de *Hevea brasiliensis* pode ser utilizada na produção de biochar para estocagem de carbono. Este estudo avaliou a influência da temperatura de pirólise e do tempo de residência nas propriedades químicas e no potencial de estocagem de carbono do biochar de seringueira. A elevação da temperatura reduziu os teores de materiais voláteis, hidrogênio, oxigênio e as razões H/C e O/C, enquanto aumentou o carbono fixo e o teor de carbono, indicando maior grau de carbonização, aromaticidade e estabilidade química. Como consequência, houve aumento da estocagem líquida, atingindo 2,52 tCO_2e no tratamento de 650 °C por 45 minutos, sem diferença estatística em relação a 60 minutos. Conclui-se que a temperatura de pirólise é o principal fator responsável pelo aumento da estabilidade química e do potencial de estocagem de carbono, sendo 650 °C por 45 minutos a condição mais adequada por proporcionar elevada estocagem líquida com menor tempo de processamento.

Palavras-chave: Biomassa Residual; Sequestro de Carbono; Mudanças Climáticas.

Influence of Pyrolysis on the Chemical Properties and Carbon Storage Potential of *Hevea brasiliensis* Biochar

Abstract: Residual biomass from *Hevea brasiliensis* can be used for biochar production aimed at carbon storage. This study evaluated the influence of pyrolysis temperature and residence time on the chemical properties and carbon storage potential of rubberwood biochar. Increasing the pyrolysis temperature reduced the contents of volatile matter, hydrogen, oxygen, and the H/C and O/C ratios, while increasing fixed carbon and elemental carbon contents, indicating a higher degree of carbonization, aromaticity, and chemical stability. Consequently, net carbon storage increased, reaching 2.52 tCO_2e for the treatment at 650 °C for 45 min, with no statistically significant difference compared to 60 min. It was concluded that pyrolysis temperature is the main factor responsible for enhancing the chemical stability and carbon storage potential of the biochar, with 650 °C for 45 min being the most suitable condition due to its high net carbon storage and shorter processing time.

Keywords: Residual Biomass; Carbon Sequestration; Climate Change.

1. Introdução

As mudanças climáticas representam um dos principais desafios ambientais da atualidade e estão diretamente relacionadas ao aumento da concentração atmosférica de gases de efeito estufa (GEE), especialmente do dióxido de carbono (CO_2), proveniente da queima de combustíveis fósseis, das mudanças no uso da terra e de processos industriais (IPCC, 2023). Nesse contexto, estratégias voltadas à remoção e à estocagem de carbono têm recebido crescente atenção, destacando-se a produção de biochar a partir da pirólise de biomassas lignocelulósicas. Devido à elevada estabilidade química adquirida durante a carbonização, o biochar apresenta potencial para atuar como sumidouro de carbono por longos períodos, além de promover melhorias nas propriedades físicas, químicas e biológicas do solo (Senadheera *et al*., 2024; Joseph *et al*., 2021).

E entre as biomassas com potencial para essa aplicação destaca-se a madeira de seringueira (*Hevea brasiliensis*). Após o ciclo de produção de látex, a renovação dos plantios gera grande volume de resíduos lignocelulósicos, como serragem, aparas, costaneiras e maravalhas (Jawjit *et al*., 2024). Além da ampla disponibilidade, essa biomassa apresenta elevado teor de lignina, favorecendo a formação de biochars com maior aromaticidade e estabilidade química durante a pirólise, características diretamente relacionadas ao potencial de estocagem de carbono no solo (Wang *et al*., 2024).

A conversão desses resíduos em biochar representa uma alternativa sustentável para agregar valor à biomassa residual, reduzir impactos ambientais associados ao seu descarte e ampliar o potencial de estocagem de carbono, contribuindo para a bioeconomia circular e a mitigação das mudanças climáticas (Lehmann *et al*., 2021). Diante desse contexto, este estudo teve como objetivo avaliar a influência dos parâmetros de pirólise sobre as propriedades químicas do biochar produzido a partir da madeira de seringueira (*Hevea brasiliensis*), por meio da composição química imediata, elementar e da estimativa do potencial de estocagem de carbono no solo.

2. Material e métodos

O estudo foi conduzido no Laboratório de Painéis e Energia da Madeira (LAPEM) da Universidade Federal de Viçosa (DEF/UFV), em Viçosa, Minas Gerais. A biomassa residual de *Hevea brasiliensis*, com granulometria predominantemente entre 8 e 16 mm, foi seca em estufa a 103 ± 2 °C até atingir umidade aproximada de 5%. Para a pirólise, amostras de 0,700 kg foram acondicionadas em recipiente metálico (0,011 m³) e submetidas ao tratamento térmico em reator

elétrico tipo mufla (GP Científica–2000), equipado com sistema de condensação para recuperação da fração líquida e queima controlada dos gases não condensáveis. Após o processo, o recipiente foi mantido em temperatura ambiente com auxílio de manta umedecida para resfriamento gradual. Atingida a estabilidade térmica, o biochar foi removido e encaminhado para a caracterização.

A composição química imediata foi determinada conforme a ASTM D1762-84 (ASTM, 2021). A composição elementar foi analisada em equipamento CHNS (Vario Micro Cube, Elementar®), sendo os teores de carbono, hidrogênio e nitrogênio determinados conforme a ISO 16948 (2015), e o teor de enxofre, segundo a ISO 16994 (2016). O teor de oxigênio foi calculado por diferença, subtraindo-se de 100 a soma dos teores de carbono, hidrogênio, nitrogênio, enxofre e cinzas. As razões atômicas H/C e O/C foram calculadas com base nos teores elementares e nas massas molares dos respectivos elementos.

A estocagem de carbono foi estimada conforme a *Puro Standard: Biochar Methodology* – Version 4.1 (Puro.earth, 2025). Considerando que o biochar foi produzido a partir de biomassa lenhosa, adotou-se o valor padrão de 0,5% de carbono inorgânico (Cinorg), conforme recomendado pela metodologia. O teor de carbono orgânico (Corg) foi obtido pela diferença entre o carbono total (Ctot), determinado na análise elementar, e o carbono inorgânico (Cinorg). A quantidade bruta de CO_2 equivalente estocada foi calculada por tonelada de biochar:

$$Cstored = Qbioc\,h\,ar\,x\left(\left(\frac{Corg}{100}\right)x\frac{44}{12}\right) \qquad \text{Equação 1}$$

Onde:

C_{stored} = Quantidade de carbono armazenado em biochar (tCO_2e)

$Q_{biochar}$ = quantidade de produção de biochar (t) = 1t

C_{org} = Teor de carbono orgânico do biochar (%)

$\frac{44}{12}$ = Razão entre as massas molares do dióxido de carbono e do carbono

As perdas de carbono do biochar (Closs) foram calculadas conforme a Equação 2. A fração de permanência do carbono foi calculada de acordo com a Equação 3.

$$C_{loss} = C_{stored}\,x\left(\frac{(100 - PF)}{100}\right) \qquad \text{Equação 2}$$

Onde:

C_{loss} = Quantidade de perda de CO_2 (tCO_{2e})

PF = fator de permanência do carbono orgânico de biochar ao longo de 200 anos em um determinado solo à temperatura TS (%)

$$PF = m - (\alpha \, x \frac{H}{C_{org}}) \qquad \text{Equação 3}$$

Onde:

M e α = coeficiente de regressão

H/Corg (molar) = razão molar entre hidrogênio e carbono orgânico, utilizada como indicador do grau de aromaticidade e estabilidade do biochar.

Para a estimativa do fator de permanência, adotou-se temperatura de referência de 20°C, obtida das Normais Climatológicas 1991–2020 da estação meteorológica convencional do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), representativa das condições climáticas da Zona da Mata Mineira, utilizando-se os coeficientes M = 89,87 e α = 35,29, conforme a Puro.earth (2025). A estocagem líquida foi obtida pela diferença (equação 4).

$$C_{net} = C_{stored} - C_{loss} \qquad \text{Equação 4}$$

O experimento foi instalado segundo um delineamento inteiramente casualizado (DIC), em esquema fatorial 3 x 3, com três temperaturas de pirólise (450, 550 e 650 °C) e três tempos de residência (30, 45 e 60 min), em três repetições, totalizando 27 unidades amostrais. Os dados foram submetidos aos testes de Shapiro-Wilk (normalidade) e Bartlett (homogeneidade de variâncias). Atendidos os pressupostos, aplicou-se a análise de variância (ANOVA) e as médias foram comparadas pelo teste de Tukey a 5% de significância. Os resultados da composição química elementar foram apresentados por meio de estatística descritiva (média ± desvio-padrão). Os dados foram processados e analisados nos softwares Microsoft Excel e R (RStudio).

3. Resultados e discussão

Na Tabela 1 são apresentados os resultados da composição química imediata dos biochars. Observou-se efeito significativo da temperatura de pirólise e do tempo de residência sobre os teores de materiais voláteis e carbono fixo, enquanto o teor de cinzas não foi influenciado significativamente.

Tabela 1. Valores médios da composição química imediata do biochar de seringueira em função da temperatura de pirólise e do tempo de residência

Temperatura (°C)	Tempo (minutos)			
	30	**45**	**60**	**Média**
	Voláteis (%)			
450	29,23	28,45	27,75	28,48 a
550	20,5	18,97	15,09	18,19 b
650	12,32	11,98	10,44	11,58 c
Média	20,68 A	19,80 A	17,76 B	
	Carbono Fixo (%)			
450	63,83	64,45	64,74	64,34 c
550	72,52	74,32	78,82	75,22 b
650	79,78	80,97	82,77	81,17 a
Média	72,04 B	73,25 AB	75,44 A	
	Cinzas (%)			
450	6,94	7,1	7,51	7,18
550	6,98	6,7	6,08	6,59
650	7,91	7,05	6,79	7,25
Média	7,27	6,95	6,79	

Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey, considerando o nível de 5% de significância. Letras minúsculas representam as temperaturas de pirólise e letras maiúsculas os tempos de residência. Para o teor de cinzas, não houve efeito significativo dos fatores avaliados.

A elevação da temperatura de pirólise e do tempo de residência intensificou a degradação térmica dos constituintes lignocelulósicos, principalmente hemicelulose e celulose, promovendo a liberação de gases condensáveis e não condensáveis e, consequentemente, reduzindo o teor de materiais voláteis do biochar (Tomczyk *et al*., 2020). Como consequência, ocorreu o enriquecimento da matriz carbonosa e o aumento do grau de carbonização, tornando o material mais estável e menos suscetível à decomposição após sua aplicação ao solo (Wang *et al*., 2024). Esse processo refletiu no aumento significativo do teor de carbono fixo, que atingiu valor médio de 81,17% nos biochars produzidos a 650 °C. Além disso, a maior resistência térmica da lignina favoreceu a permanência do carbono na fase sólida, contribuindo para a formação de biochars com maior teor de carbono fixo (Wang *et al*., 2024).

O teor de cinzas variou de 6,08 a 7,91%, sem influência significativa da temperatura de pirólise ou do tempo de residência. Embora não tenham sido observadas diferenças entre os tratamentos, essa fração mineral pode contribuir para o aporte de nutrientes, como cálcio, magnésio, potássio e fósforo, além de favorecer a correção da acidez e a melhoria da fertilidade do solo (Ippolito *et al*., 2020). Assim, os baixos teores de cinzas associados aos elevados teores de carbono fixo indicam um material com potencial tanto para melhoria da qualidade do solo quanto para a estocagem de carbono.

Na Tabela 2 são apresentados os resultados da composição elementar e as razões atômicas dos biochars produzidos sob diferentes temperaturas de pirólise e tempos de residência. Os resultados são apresentados como média ± desvio-padrão, permitindo comparar a variação das propriedades químicas entre os tratamentos.

Tabela 2 – Valores médios da composição elementar e razões atômicas H/C e O/C do biochar de seringueira

Parâmetros de pirólise	**Composição Elementar**					**Razão Atômica**	
	C (%)	**H (%)**	**N (%)**	**S (%)**	**O (%)**	**H/C**	**O/C**
450 °C / 30 min	73,80 ± 0,28	3,50 ± 0,02	0,288 ± 0,009	0,084 ± 0,001	22,33 ± 0,31	0,57 ± 0,01	0,227 ± 0,004
450 °C / 45 min	73,55 ± 0,35	3,28 ± 0,06	0,303 ± 0,010	0,089 ± 0,002	22,78 ± 0,30	0,53 ± 0,01	0,233 ± 0,004
450 °C / 60 min	75,40 ± 0,28	3,27 ± 0,04	0,322 ± 0,004	0,107 ± 0,006	20,90 ± 0,33	0,52 ± 0,01	0,208 ± 0,004
550 °C / 30 min	80,05 ± 0,35	2,91 ± 0,00	0,370 ± 0,002	0,099 ± 0,014	16,57 ± 0,37	0,43 ± 0,00	0,155 ± 0,004
550 °C / 45 min	82,35 ± 0,21	2,88 ± 0,01	0,346 ± 0,000	0,128 ± 0,001	14,30 ± 0,22	0,42 ± 0,00	0,130 ± 0,002
550 °C / 60 min	80,45 ± 0,21	2,70 ± 0,04	0,304 ± 0,021	0,121 ± 0,001	16,42 ± 0,23	0,40 ± 0,00	0,153 ± 0,003
650 °C / 30 min	85,40 ± 0,00	2,45 ± 0,06	0,313 ± 0,006	0,130 ± 0,005	11,71 ± 0,07	0,35 ± 0,01	0,103 ± 0,001
650 °C / 45 min	86,00 ± 0,00	2,11 ± 0,01	0,285 ± 0,004	0,114 ± 0,002	11,49 ± 0,02	0,29 ± 0,00	0,100 ± 0,000
650 °C / 60 min	85,45 ± 0,07	2,04 ± 0,06	0,275 ± 0,003	0,117 ± 0,003	12,12 ± 0,01	0,29 ± 0,01	0,106 ± 0,000

C = carbono; H = hidrogênio; N = nitrogênio; S = enxofre; O = oxigênio. As razões atômicas H/C e O/C foram calculadas com base na composição elementar. Os valores são apresentados como média ± desvio-padrão (n = 2).

Observa-se que o teor de carbono aumentou com a elevação da temperatura de pirólise, passando de 73,55–75,40% a 450 °C para valores superiores a 85% a 650 °C. Em contrapartida, os teores de hidrogênio e oxigênio diminuíram, enquanto nitrogênio e enxofre apresentaram pequenas variações entre os tratamentos. Esse comportamento resulta da intensificação das reações de desidratação, descarboxilação e descarbonilação, que promovem a eliminação de compostos ricos em hidrogênio e oxigênio e concentram carbono na estrutura do biochar, aumentando sua aromaticidade e estabilidade química (Abdullah *et al*., 2022; Wang *et al*., 2019).

As razões atômicas H/C e O/C também reduziram com o aumento da temperatura, passando de 0,57 e 0,227 (450 °C/30 min) para 0,29 e 0,100 (650 °C/45 min), refletindo o avanço da carbonização e a formação de estruturas mais aromáticas e recalcitrantes (Wang *et al*., 2019). Menores valores de H/C indicam maior aromaticidade, enquanto menores razões O/C estão associadas à redução de grupos funcionais oxigenados e da reatividade superficial do biochar (Ippolito *et al*., 2020). Todos os biochars atenderam aos critérios de estabilidade estabelecidos pelo *European Biochar Certificate* (2024) e pela Puro.earth (2025), com H/Corg < 0,7 e O/Corg < 0,4, sendo os produzidos a 550 e 650 °C os mais estáveis (Petersen & Sanei, 2025).

Na Tabela 3 são apresentados os valores de carbono estocado, carbono perdido no solo e carbono estocado líquido dos biochars produzidos sob diferentes temperaturas de pirólise e tempos de residência. Os resultados evidenciam efeito significativo dos parâmetros de pirólise sobre as variáveis avaliadas.

Tabela 3 – Valores médios do potencial de estocagem de carbono do biochar de seringueira em função da temperatura de pirólise e do tempo de residência

Temperatura (°C)	**Tempo (minutos)**			
	30	**45**	**60**	**Média**
	Carbono estocado (tCO_2e)			
450	2,69 Cb	2,68 Cc	2,75 Ac	2,7
550	2,92 Bb	3,00 Ab	2,93 Bb	2,95
650	3,11 Aa	3,14 Aa	3,11 Aa	3,12
Média	2,91	2,94	2,93	
	Carbono perdido (tCO_2e)			
450	0,77 Aa	0,74 Ba	0,74 Ba	0,75
550	0,71 Ab	0,72 Aa	0,69 Bb	0,71
650	0,66 Ac	0,62 Bc	0,61 Bc	0,63

Média	0,72	0,69	0,68	
	Carbono estocado líquido (tCO_2e)			
450	1,91 Cb	1,94 Bc	2,00 Ac	1,95
550	2,20 Cb	2,28 Ab	2,24 Bb	2,24
650	2,45 Ba	2,52 Aa	2,51 Aa	2,49
Média	2,19	2,25	2,25	

Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey, considerando o nível de 5% de significância. Letras minúsculas referem-se às temperaturas de pirólise e letras maiúsculas aos tempos de residência. Para carbono estocado e carbono estocado líquido, as letras representam o desdobramento da interação significativa entre os fatores.

O carbono estocado aumentou com a elevação da temperatura de pirólise, passando de média de 2,70 tCO_2e a 450 °C para 3,12 tCO_2e a 650 °C. Esse comportamento está diretamente relacionado ao aumento do teor de carbono elementar e à redução das razões H/C e O/C observadas anteriormente, que refletem maior grau de carbonização e maior estabilidade química do biochar (Ippolito *et al.*, 2020). O efeito do tempo de residência foi mais evidente a 450 e 550 °C, enquanto, a 650 °C, não houve diferença significativa entre os tempos avaliados, indicando que 30 minutos foram suficientes para maximizar o potencial de estocagem de carbono.

As estimativas de carbono perdido diminuíram com o aumento da temperatura de pirólise, reduzindo de média de 0,75 tCO_2e a 450 °C para 0,63 tCO_2e a 650 °C. Essa variável representa a fração de carbono passível de mineralização após a aplicação do biochar ao solo, sendo influenciada pela estabilidade química do material e pelas condições de temperatura do solo, que regulam a atividade microbiana e a velocidade de decomposição da matéria orgânica (Han *et al.*, 2020). Dessa forma, biochars produzidos em temperaturas mais elevadas apresentam maior persistência no solo e menor perda estimada de carbono ao longo do tempo. Consequentemente, o carbono estocado líquido aumentou significativamente com a temperatura, alcançando os maiores valores nos biochars produzidos a 650 °C por 45 e 60 minutos (2,52 e 2,51 tCO_2e, respectivamente), tratamentos que não diferiram estatisticamente entre si.

Considerando a equivalência estatística entre os tempos de 45 e 60 minutos, o tratamento de 650 °C por 45 minutos mostrou-se o mais adequado entre as condições avaliadas, por proporcionar a maior estocagem líquida de carbono (2,52 tCO_2e) sem necessidade de prolongar o tempo de residência. Os resultados obtidos são consistentes com estudos

conduzidos com biochars de outras biomassas lignocelulósicas, como bagaço de cana-de-açúcar, nos quais o aumento da temperatura de pirólise promoveu maior teor de carbono, redução das razões H/C e O/C e, consequentemente, maior potencial de estocagem de carbono e persistência no solo (Ippolito *et al.*, 2020). Assim, os resultados demonstram que a temperatura de pirólise é o principal fator responsável pelo aumento do potencial de remoção de CO_2 atmosférico e estocagem de carbono em longo prazo, enquanto o tempo de residência exerce efeito complementar, tornando-se pouco expressivo após 45 minutos na temperatura de 650 °C.

4. Conclusões

Os resultados demonstraram que os parâmetros de pirólise, especialmente a temperatura, influenciam significativamente a composição química imediata e elementar do biochar de *Hevea brasiliensis*, refletindo diretamente em sua estabilidade química e no potencial de estocagem de carbono. O tratamento de 650 °C por 45 minutos mostrou-se o mais adequado entre os avaliados, por proporcionar elevada estocagem líquida de carbono e estabilidade química, sem diferir estatisticamente do tratamento de 650 °C por 60 minutos, permitindo reduzir o tempo de residência do processo. Assim, a madeira de seringueira apresenta elevado potencial como matéria-prima para a produção de biochar, constituindo uma estratégia promissora para a remoção e o armazenamento de CO_2 atmosférico e para a mitigação das mudanças climáticas.

5. Agradecimentos

Ao Departamento de Engenharia Florestal (DEF), ao Laboratório de Painéis e Energia da Madeira (LAPEM) e à Universidade Federal de Viçosa (UFV) pela infraestrutura e suporte concedidos. O reconhecimento estende-se à Sociedade de Investigações Florestais e à EMBRAPII Unidade Fibras Florestais. Esta pesquisa contou com o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES), sendo viabilizada, em parte, com recursos da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG – Projetos APQ-05311-24 e APQ-04599-25) e do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq – Processo nº 444395/2024-5).

6. Referências bibliográficas

American Society for Testing and Materials. (2021). *ASTM D1762-84(2021): Standard test method for chemical analysis of wood charcoal*. ASTM International.

Bekchanova, M., Kuppens, T., Cuypers, A., Jozefczak, M., & Malina, R. (2024). *Biochar's effect on the soil carbon cycle: A rapid review and meta-analysis*. *Biochar, 6*, 88. https://doi.org/10.1007/s42773-024-00381-8

European Biochar Certificate. (2024). *European Biochar Certificate: Guidelines for a sustainable production of biochar* (Version 10.4E). Carbon Standards International. https://www.european-biochar.org

Han, L., Sun, K., Yang, Y., Xia, X., Li, F., Yang, Z., & Xing, B. (2020). *Biochar's stability and effect on the content, composition and turnover of soil organic carbon*. *Geoderma, 364*, 114184. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114184

Instituto Nacional de Meteorologia. (2022). *Normais climatológicas do Brasil: Período 1991–2020*. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. https://portal.inmet.gov.br/uploads/normais/NORMAISCLIMATOLOGICAS.pdf

Intergovernmental Panel on Climate Change. (2023). *Climate change 2023: Synthesis report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (Core Writing Team, H. Lee, & J. Romero, Eds.). IPCC. https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647

International Organization for Standardization. (2015). *ISO 16948:2015: Solid biofuels —Determination of total content of carbon, hydrogen and nitrogen*. ISO.

International Organization for Standardization. (2016). *ISO 16994:2016: Solid biofuels —Determination of total content of sulfur and chlorine*. ISO.

Ippolito, J. A., Cui, L., Kammann, C., Wrage-Mönnig, N., Estavillo, J. M., Fuertes-Mendizábal, T., Cayuela, M. L., Sigua, G., Novak, J., Spokas, K., & Borchard, N. (2020). *Feedstock choice, pyrolysis temperature and type influence biochar characteristics: A comprehensive meta-data analysis review*. *Biochar, 2*, 421–438. https://doi.org/10.1007/s42773-020-00067-x

Jawjit, S., Jawjit, W., Pibul, P., Wongcharee, S., & Suwannahong, K. (2024). *Enhancing the sustainability of the sawn rubberwood industry through resource-efficient and cleaner production approaches*. *Journal of Cleaner Production, 479*, 143913. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.143913

Joseph, S., Cowie, A. L., Van Zwieten, L., Bolan, N., Budai, A., Buss, W., Cayuela, M. L., Graber, E. R., Ippolito, J. A., Kuzyakov, Y., Luo, Y., Ok, Y. S., Palansooriya, K. N., Shepherd, J., Stephens, S., Weng, Z., & Lehmann, J. (2021). *How biochar works, and when it doesn't: A review of mechanisms controlling soil and plant responses to biochar*. *GCB Bioenergy, 13*(11), 1731–1764. https://doi.org/10.1111/gcbb.12885

Lehmann, J., Cowie, A., Masiello, C. A., Kammann, C., Woolf, D., Amonette, J. E., Cayuela, M. L., Camps-Arbestain, M., & Whitman, T. (2021). *Biochar in climate change mitigation*. *Nature Geoscience, 14*, 883–892. https://doi.org/10.1038/s41561-021-00852-8

Leng, L., Huang, H., Li, H., Li, J., & Zhou, W. (2019). *Biochar stability assessment methods: A review*. *Science of the Total Environment, 647*, 210–222. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.07.402

Puro.earth. (2025). *Puro Standard: Biochar Methodology* (Version 4.1). Puro.earth. https://puro.earth/methodologies/biochar/

Tomczyk, A., Sokołowska, Z., & Boguta, P. (2020). *Biochar physicochemical properties: Pyrolysis temperature and feedstock kind effects*. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology, 19*, 191–215. https://doi.org/10.1007/s11157-020-09523-3

Wang, K., Remón, J., Jiang, Z., & Ding, W. (2024). *Recent advances in the preparation and application of biochar derived from lignocellulosic biomass: A mini review*. *Polymers, 16*(6), 851. https://doi.org/10.3390/polym16060851

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Influência da pirólise no pH e condutividade elétrica de biochar de frutos e sementes

Vanessa Vitória Soares de Almeida[1]; Angélica de Cássia Oliveira Carneiro[1]; Lausanne Soraya de Almeida[1]; Bráulio da Silva de Oliveira[1]; Geisianne de Carvalho Almeida[1]; Raquel Júlia Cipriano dos Santos[1]; Victória Oliveira Lopes Mendes[2]

[1] Universidade Federal de Viçosa
[2] Universidade Federal de Ouro Preto

Resumo: Este trabalho avaliou o efeito da temperatura e do tempo de pirólise sobre o teor de cinzas, pH e condutividade elétrica de biochars obtidos a partir de resíduos de frutos e sementes, pirolisados sob três temperaturas (650, 700 e 750°C) e três tempos de residência (60, 75 e 90 min) em forno tipo mufla. A pirólise promoveu a concentração da fração mineral, elevando o teor de cinzas de 3,64% na biomassa *in natura* para a faixa de 10,66 a 11,78% no biochar. Os biochars apresentaram forte alcalinidade, com pH entre 9,7 e 10,5 e condutividade elétrica entre 2,09 e 4,75 mS cm^{-1}, sendo influenciado pela temperatura final de pirólise. O tempo de residência apresentou efeito significativo, influenciando o pH e a condutividade elétrica de forma dependente da temperatura. A condição de 750°C combinada aos tempos de 75 e 90 minutos destacou-se por gerar os maiores valores de pH e condutividade elétrica, sendo a mais indicada para produção de biochars com potencial de uso como corretivo de acidez e condicionador de solo.

Palavras-chave: Biomassa Residual; Condicionador de Solo; Correção de Acidez.

Influence of pyrolysis on the pH and electrical conductivity of biochar from fruit and seeds

Abstract: This study evaluated the effect of pyrolysis temperature and time on the ash content, pH, and electrical conductivity of biochars obtained from fruit and seed residues, pyrolyzed under three temperatures (650, 700, and 750°C) and three residence times (60, 75, and 90 min) in a muffle furnace. Pyrolysis promoted the concentration of the mineral fraction, increasing the ash content from 3.64% in the raw biomass to a range of 10.66 to 11.78% in the biochar. The biochars exhibited strong alkalinity, with pH between 9.7 and 10.5 and electrical conductivity between 2.09 and 4.75 mS cm^{-1}, both influenced by the final pyrolysis temperature. Residence time showed a significant effect, influencing pH and electrical conductivity in a temperature-dependent manner. The condition of 750°C combined with residence times of 75 and 90 minutes stood out for generating the highest pH and electrical conductivity values, being the most suitable for producing biochars with potential use as a soil acidity amendment and conditioner.

Keywords: Residual Biomass; Soil Conditioner; Acidity Correction.

1. Introdução

As atividades agrícolas e florestais geram, ao longo de toda a cadeia produtiva, grandes volumes de biomassa residual, como restos de poda, cascas, sementes e bagaços. Quando descartados de forma inadequada, esses resíduos podem levar a diversos problemas ambientais, como a emissão de gases de efeito estufa decorrente da queima ou decomposição no campo, além da contaminação do solo e de corpos d'água (Lackner e Besharati, 2025).

Espécies utilizadas nesse estudo, como pau-ferro, cutieira, ipê, pitanga, jatobá, sapucaia, braúna, aroeira-do-sertão, cássia-rosa, jerivá, urucum e paineira, são amplamente utilizadas em programas de restauração florestal e produção de mudas, cadeia que, segundo estimativas, deve demandar entre 2,6 e 25,5 mil toneladas de sementes nativas para cumprir a meta brasileira estabelecida no Plano Nacional de Recuperação da Vegetação Nativa (Planaveg) de restaurar 12 milhões de hectares até 2030 (Urzedo et al., 2020), e geram ao longo da cadeia de beneficiamento de suas sementes e frutos um expressivo volume de resíduos que ainda são pouco aproveitados. Neste contexto, a pirólise desses resíduos para a produção de biochar representa uma das estratégias mais promissoras, unindo destinação ambientalmente adequada à geração de um material com aplicação agronômica (Cvitan et al., 2026).

O biochar, também chamado de biocarvão, é um material sólido e rico em carbono obtido por meio da pirólise, um processo de degradação térmica da biomassa realizado em ambiente com restrição ou total ausência de oxigênio, e quando incorporado ao solo, contribui para a melhoria de suas propriedades físicas e químicas (Lehmann et al., 2006; Pandian et al., 2024).

Entre as propriedades do biochar, o teor de cinzas, o pH e a condutividade elétrica exercem influência direta sobre o solo quando o material é aplicado como condicionador. O teor de cinzas reflete a fração mineral inorgânica remanescente do material, estando diretamente relacionada à sua capacidade de fornecer macro e micronutrientes ao solo, embora teores elevados devam ser avaliados conforme a finalidade de uso do biochar, uma vez que influenciam suas propriedades químicas e agronômicas (Zhai et al., 2022; Demissie et al., 2023).

O pH do biochar, geralmente alcalino, contribui para a correção de solos ácidos, reduzindo a toxidez por alumínio e melhorando a disponibilidade de nutrientes às plantas (Cvitan et al., 2026). A condutividade elétrica constitui um indicador da concentração de íons solúveis presentes no biochar, permitindo inferir seu potencial de fornecimento de nutrientes; contudo, salienta que valores excessivamente elevados podem representar risco de salinização quando o biochar é aplicado em grandes quantidades (Sharma et al., 2022).

A acidez do solo é um dos principais fatores limitantes à produtividade agrícola, associada à toxidez por alumínio e à baixa disponibilidade de nutrientes essenciais às plantas (Ur Rahman et al., 2024). Embora a calagem seja o método convencional mais utilizado para corrigir essa limitação, o biochar apresenta um efeito semelhante por seu caráter alcalino e potencial de neutralização da acidez do solo (Bolan et al., 2023).

Neste contexto, visando à destinação eficiente e à geração de valor aos resíduos de fruto e sementes, o objetivo deste trabalho foi avaliar o efeito da temperatura e do tempo de pirólise sobre os teores de cinzas, pH e condutividade elétrica de biochars produzidos a partir desses resíduos, compreendendo seu potencial agronômico na correção da acidez do solo.

2. Material e métodos

A pesquisa foi conduzida no Laboratório de Painéis e Energia da Madeira (LAPEM) em parceria com o Laboratório de Análises de Sementes Florestais (LASF), ambos vinculados ao Departamento de Engenharia Florestal da Universidade Federal de Viçosa (DEF/UFV), em Viçosa, Minas Gerais. Foram utilizados resíduos de frutos e sementes de cerca de 25 espécies florestais como matéria-prima para a produção do biochar. Parte do material foi obtida junto ao LASF, constituindo resíduos provenientes de aulas práticas e atividades de pesquisa, e o restante de doação de beneficiadores de sementes.

Após a coleta, o material foi triturado com o objetivo de reduzir sua granulometria e depois misturado para sua melhor homogeneização. Em seguida, o material triturado, com granulometria de < 1 mm a 8 mm, foi submetido ao processo de quarteamento, de modo a assegurar a representatividade e a homogeneidade das amostras a serem utilizadas na produção do biochar.

As pirólises foram realizadas em reator elétrico de bancada do tipo mufla (GP Científica – 2000), equipado com controlador digital de temperatura (termostato), que permitiu o monitoramento e o ajuste das condições térmicas do processo, em condição de ausência ou baixa disponibilidade de oxigênio. Cada ensaio de pirólise foi realizado com 1,100 kg de biomassa. Os experimentos foram conduzidos em três temperaturas distintas: 650°C, 700°C e 750°C, com três tempos de residência definidos em 60, 75 e 90 minutos. Ao final do ciclo de pirólise, o container foi retirado da mufla para resfriamento do biochar produzido.

Após a produção do biochar, o teor de cinzas foi determinado de acordo com a norma ASTM D1762-84 (ASTM, 2021). O pH e condutividade elétrica dos biochars foram

determinados conforme a metodologia adaptada de Singh et al. (2017) utilizando pHmetro digital previamente calibrado, e a condutividade elétrica foi medida com auxílio de condutivímetro Tecnal, modelo TEC-4MP.

Os dados que atenderam aos pressupostos de normalidade (Shapiro–Wilk) e homogeneidade de variâncias (Bartlett) foram submetidos à análise de variância (ANOVA) e quando estabelecido efeito significativo aplicou-se o teste de Tukey ($p \leq 0,05$). Para as variáveis que não atenderam a esses pressupostos, foram apresentadas estatísticas descritivas (média ± desvio-padrão). Todas as análises estatísticas foram realizadas no software R, em ambiente RStudio.

478. Resultados e discussão

Na Figura 1 são apresentados os valores médios do teor de cinzas dos biochars produzidos a partir dos resíduos de frutos e sementes. De acordo com a análise estatística, não houve efeito significativo da interação e também não houve efeito isolado da temperatura e tempo de residência no teor de cinzas dos biochars.

Figura 1. Valores médios de cinzas (± desvio-padrão) dos biochars produzidos em diferentes temperaturas e tempos de pirólise.

O teor de cinzas da biomassa residual de frutos e sementes *in natura* foi de 3,64%. Após as pirólises o teor de cinzas dos biochars elevou-se a valores superiores a 10%. Esse aumento ocorre porque durante a pirólise há degradação dos componentes da biomassa, principalmente extrativos, hemiceluloses e celulose, além de parte da lignina, ou seja, da fração orgânica da biomassa, concentrando os minerais e carbono fixo (Loc e Phuong, 2025).

Nas condições avaliadas, o teor de cinzas permaneceu estável, sem variações significativas em função da temperatura ou do tempo de residência. Embora se note uma tendência de aumento nas temperaturas mais altas, esse comportamento difere do padrão mais comum na literatura, em que o incremento térmico aumenta a fração mineral devido à maior perda de massa orgânica (Tomczyk et al., 2020). Isso se deve as temperaturas de pirólise utilizada no experimento, pois provavelmente grande parte da degradação térmica da fração orgânica tenha ocorrido já a 650°C, promovendo a concentração da fração mineral nas menores temperaturas testadas (Awad et al., 2024).

Os teores de cinzas obtidos (10,66–11,78%) indicam que os biochars apresentam elevadas concentrações de inorgânicos potencialmente disponíveis para o solo. Esses

constituintes podem contribuir para o aumento do pH e da condutividade elétrica observados, além de favorecer o fornecimento de nutrientes e o potencial de utilização do biochar como condicionador de solo, especialmente em áreas com elevada acidez (Bolan et al., 2023).

Na Figura 2 são apresentados os valores médios de pH dos biochars de resíduos de frutos e sementes em função da temperatura e tempo de pirólise. De acordo com a análise de variância não houve efeito dos tratamentos sobre o pH dos biochars.

Figura 2. Valores médios de pH (± desvio-padrão) dos biochars produzidos em diferentes temperaturas e tempos de pirólise.

Os valores médios de pH dos biochars variaram de 9,71 a 10,49, caracterizando-os como materiais alcalino em todas as condições de pirólise avaliadas. Apesar de não ocorrer efeito significativo, observa-se uma tendência de aumento do pH com a elevação da temperatura de pirólise, enquanto o tempo de residência exerceu menor influência sobre essa variável. De modo geral, os maiores valores de pH foram observados nos biochars produzidos a 750°C, independentemente do tempo de residência.

Em relação ao pH, as temperaturas mais elevadas favorecem a degradação dos grupos funcionais ácidos originais da biomassa e promovem a concentração da fração mineral resultante do processo térmico (Sathyabama e Firdous, 2025). Esses processos contribuem para a formação de carbonatos e óxidos minerais, responsáveis pela elevação da alcalinidade do biochar (Cvitan et al., 2026).

Vale salientar que o valor de calagem do biochar deriva especificamente dos carbonatos e hidróxidos presentes na fração de cinzas, atuando na correção de solos ácidos por meio do fornecimento de cátions básicos e da redução da toxidez por alumínio (Sathyabama e Firdous, 2025). Dessa forma, os elevados valores de pH obtidos nos biochars de frutos e sementes, independente dos parâmetros de pirólise, indicam potencial para utilização como condicionador de solo, especialmente em áreas com elevada acidez, contribuindo para a correção e para a melhoria da disponibilidade de nutrientes às plantas (Bolan et al., 2023).

Na Figura 3 são apresentados os valores médios de condutividade elétrica (CE) dos biochars de resíduos de frutos e sementes. De acordo com a análise de variância houve efeito significativo da interação tempo e temperatura de pirólise. A condutividade elétrica (CE) dos biochars variou de 2,09 a 4,75 mS cm^{-1}, apresentando tendência de aumento com incremento da temperatura de pirólise. De modo geral, os maiores valores de CE foram observados nos biochars produzidos a 750°C, independentemente do tempo de residência. O efeito do tempo,

por sua vez, foi menos evidente, porém aumentou de acordo com o incremento da temperatura de pirólise.

Figura 3. Condutividade elétrica (CE) média (± desvio-padrão) de biochars produzidos em diferentes temperaturas e tempos de pirólise. Médias seguidas pela mesma letra maiúscula (temperatura) e minúscula (tempo) não diferem significativamente entre si pelo teste de Tukey a 95% de probabilidade.

Não houve efeito do tempo de residência sobre a CE dos biochars, independentemente da temperatura de pirólise, exceto para os produzidos a 750°C por 60 minutos. Por outro lado, de modo geral, houve incremento da condutividade elétrica com o aumento da temperatura de pirólise, sendo que os biochars produzidos a 750°C apresentaram os maiores valores, diferindo significativamente dos produzidos a 650°C. Não houve diferença significativa entre os biochars produzidos a 700°C e os demais quanto à condutividade elétrica.

O aumento da condutividade elétrica com a elevação da temperatura está associado à degradação da fração orgânica da biomassa durante a pirólise, promovendo a concentração proporcional de minerais e íons solúveis remanescentes, como K, Ca, Mg e Na, na matriz carbonizada (Oliveira Paiva et al., 2024; Lataf et al., 2022). Esses constituintes elevam a condutividade elétrica do biochar e estão diretamente relacionados ao seu potencial de fornecimento de nutrientes ao solo (Sharma et al., 2022).

Essa dinâmica de degradação é um padrão também relatado em outros estudos que avaliam conjuntamente temperatura e tempo de residência na pirólise, nos quais o efeito do tempo sobre as propriedades do biochar mostra-se dependente da temperatura empregada (Cárdenas-Aguiar et al., 2024; Halalsheh et al., 2024). Nas temperaturas menores (650 e 700°C), a energia térmica fornecida foi suficiente para completar a maior parte da degradação da fração orgânica nos primeiros minutos de exposição. Esse comportamento também é descrito na literatura, indicando que o prolongamento do processo produz pouco efeito adicional sobre a concentração mineral quando o platô de degradação térmica é atingido (Tomczyk et al., 2020). Já a 750°C, a maior intensidade térmica permite que as reações de degradação da matriz carbônica continuem ocorrendo de forma gradual ao longo do tempo, mesmo em menores taxas de perda de massa. Isso favorece a liberação progressiva dos compostos voláteis remanescentes, resultando em uma maior concentração de sais solúveis na fração mineral nos tempos mais longos (Pariyar et al.; 2020).

Dessa forma, os elevados valores de pH e condutividade elétrica obtidos, associados aos teores de cinzas observados, indicam que os biochars produzidos a partir de resíduos de frutos e sementes apresentam características favoráveis ao uso agronômico, especialmente em

aplicações voltadas à correção da acidez do solo. Esses resultados estão de acordo com estudos que relacionam a concentração de minerais alcalinos durante a pirólise ao potencial do biochar como condicionador de solo (Neogi et al., 2022).

4. Conclusões

Os resultados das análises dos biochars produzidos a partir de resíduos de frutos e sementes evidenciaram que a temperatura de pirólise foi o fator determinante no aumento do pH e da condutividade elétrica dos biochars, enquanto o teor de cinzas manteve-se estável em todas as condições avaliadas, refletindo a concentração da fração mineral promovida pela pirólise independente da temperatura e do tempo empregados. O tempo de residência exerceu efeito significativo sobre o pH e a condutividade elétrica de forma dependente da temperatura, com os maiores valores obtidos a 750 °C nos tempos de 75 e 90 minutos. Dessa forma, o emprego de maior temperatura associado ao maior tempo de residência maximiza a alcalinidade e a liberação de íons solúveis dos biochars. Essas características demonstram viabilidade técnica da conversão desse resíduo em um insumo de qualidade para uso agronômico, pois reúne características favoráveis à sua aplicação como condicionador de solo, principalmente pela capacidade de atuar na correção de acidez e pelo aporte de nutrientes solúveis.

5. Agradecimentos

Ao Departamento de Engenharia Florestal (DEF), ao Laboratório de Painéis e Energia da Madeira (LAPEM), ao Laboratório de Análises de Sementes Florestais (LASF) e à Universidade Federal de Viçosa (UFV) pela infraestrutura e suporte concedidos. Este trabalho foi viabilizado, em parte, pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG - Projetos APQ-05311-24 e APQ-04599-25) e pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq – Processo nº 444395/2024-5).

6. Referências bibliográficas

American Society for Testing and Materials. (2021). *Standard test method for chemical analysis of wood charcoal* (ASTM D1762-84). ASTM International.

Awad, M. I., Makkawi, Y., & Hassan, N. M. (2024). Yield and energy modeling for biochar and bio-oil using pyrolysis temperature and biomass constituents. *ACS Omega, 9*(16), 18654–18667. https://doi.org/10.1021/acsomega.4c01646

Bolan, N., Sarmah, A. K., Bordoloi, S., Bolan, S., Padhye, L. P., Van Zwieten, L., Sooriyakumar, P., Khan, B. A., Ahmad, M., Solaiman, Z. M., Rinklebe, J., Wang, H., Singh, B. P., & Siddique, K. H.

M. (2023). Soil acidification and the liming potential of biochar. *Environmental Pollution, 317*, 120632. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.120632

Brasil. (2017). Plano Nacional de Recuperação da Vegetação Nativa - PLANAVEG (Decreto nº 8.972, de 23 de janeiro de 2017). https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2015-2018/2017/decreto/d8972.htm

Cárdenas-Aguiar, E., Méndez, A., Gascó, G., Lado, M., & Paz-González, A. (2024). The effects of feedstock, pyrolysis temperature, and residence time on the properties and uses of biochar from broom and gorse wastes. *Applied Sciences, 14*(10), Artigo 4283. https://doi.org/10.3390/app14104283

Cvitan, D., et al. (2026). Physicochemical properties of biochar produced from grapevine-pruning residues of 12 cultivars. *Horticulturae, 12*(1), 4. https://doi.org/10.3390/horticulturae12010004

de Urzedo, D. I., Piña-Rodrigues, F. C. M., Feltran-Barbieri, R., Junqueira, R. G. P., & Fisher, R. (2020). Seed networks for upscaling forest landscape restoration: Is it possible to expand native plant sources in Brazil? *Forests, 11*(3), 259. https://doi.org/10.3390/f11030259

de Oliveira Paiva, I., de Morais, E. G., Jindo, K., & Silva, C. A. (2024). Biochar N content, pools and aromaticity as affected by feedstock and pyrolysis temperature. Waste and Biomass Valorization, 15(6), 3599–3619. https://doi.org/10.1007/s12649-023-02415-x

Demissie, E. G., et al. (2023). Agronomic potential of avocado-seed biochar in comparison with other locally available biochar types: A first-hand report from Ethiopia. *Applied and Environmental Soil Science, 2023*, Artigo 7531228. https://doi.org/10.1155/2023/7531228

Halalsheh, M., Shatanawi, K., Shawabkeh, R., Kassab, G., Mohammad, H., Adawi, M., Ababneh, S., Abdullah, A., Ghantous, N., Balah, N., & Almomani, S. (2024). Impact of temperature and residence time on sewage sludge pyrolysis for combined carbon sequestration and energy production. *Heliyon, 10*, Artigo e28030. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e28030

Lackner, M., & Besharati, M. (2025). Agricultural waste: Challenges and solutions, a review. *Waste, 3*(2), Artigo 18. https://doi.org/10.3390/waste3020018

Lataf, A., Jozefczak, M., Vandecasteele, B., Viaene, J., Schreurs, S., Carleer, R., Yperman, J., Marchal, W., Cuypers, A., & Vandamme, D. (2022). The effect of pyrolysis temperature and feedstock on biochar agronomic properties. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 168*, Artigo 105728. https://doi.org/10.1016/j.jaap.2022.105728

Lehmann, J., Gaunt, J., & Rondon, M. (2006). Bio-char sequestration in terrestrial ecosystems – A review. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change, 11*, 403–427. https://doi.org/10.1007/s11027-005-9006-5

Loc, N. X., & Phuong, D. T. M. (2025). Optimizing biochar production: A review of recent progress in lignocellulosic biomass pyrolysis. *Frontiers of Agricultural Science and Engineering, 12*(1), 148–172. https://doi.org/10.15302/J-FASE-2024597

Neogi, S., Sharma, V., Khan, N., Chaurasia, D., Ahmad, A., Chauhan, S., Singh, A., You, S., Pandey, A., & Bhargava, P. C. (2022). Sustainable biochar: A facile strategy for soil and environmental restoration, energy generation, mitigation of global climate change and circular bioeconomy. *Chemosphere, 293*, 133474. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.133474

Pandian, K., et al. (2024). Biochar – A sustainable soil conditioner for improving soil health, crop production and environment under changing climate: A review. *Frontiers in Soil Science, 4*. https://doi.org/10.3389/fsoil.2024.1376159

Pariyar, P., Kumari, K., Jain, M. K., & Jadhao, P. S. (2020). Evaluation of biochar production parameter effects on soil plant nutrient availability and biological properties: A review. Science of The Total Environment, 728, 138781. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138781

Sathyabama, K., & Firdous, S. (2025). Effect of pyrolysis temperature on the physicochemical properties and structural characteristics of agricultural wastes-derived biochar. *ACS Omega, 10*(33), 37013–37024. https://doi.org/10.1021/acsomega.5c00120

Sharma, S., et al. (2022). Biochar from fruit crops waste and its potential impact on fruit crops. *Scientia Horticulturae, 299*, 111052. https://doi.org/10.1016/j.scienta.2022.111052

Singh, B., Dolk, M. M., Shen, Q., & Camps-Arbestain, M. (2017). Biochar pH, electrical conductivity and liming potential. Em B. Singh, M. Camps-Arbestain, & J. Lehmann (Eds.), *Biochar: A guide to analytical methods* (pp. 23–38). CRC Press. https://doi.org/10.1071/9781486305100

Tomczyk, A., Sokołowska, Z., & Boguta, P. (2020). Biochar physicochemical properties: Pyrolysis temperature and feedstock kind effects. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology, 19*(1), 191–215. https://doi.org/10.1007/s11157-020-09523-3

Ur Rahman, S., Han, J.-C., Ahmad, M., Ashraf, M. N., Khaliq, M. A., Yousaf, M., Wang, Y., Yasin, G., Nawaz, M. F., Khan, K. A., & Du, Z. (2024). Aluminum phytotoxicity in acidic environments: A comprehensive review of plant tolerance and adaptation strategies. *Ecotoxicology and Environmental Safety, 269*, Artigo 115791. https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2023.115791

Zhai, P., Zhao, Y., Yang, S., et al. (2022). Comparison of yield and physicochemical characteristics of tropical crop residue biochar under different pyrolysis temperatures. Biomass Conversion and Biorefinery, 14, 8843–8855. https://doi.org/10.1007/s13399-022-03058-z

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Influência do tempo de extração no rendimento e qualidade dos taninos da casca de *Eucalyptus cloeziana*

Maria Eduarda Grigolate Campos[1]; Luís Henrique Cabral Barral[1]; Kézia Ellen Souza Bomfim[1]; Camila da Silva Bonjour[1]; Lucas José de Oliveira Valente[1]; Lara Luisa Mendes Nascimento[1]; Eric Rodrigues de Araújo[1]; João Gilberto Meza Ucella Filho[1]

[1] Universidade Federal de Viçosa

Resumo: A casca de *Eucalyptus cloeziana* é uma biomassa residual abundante com alto potencial para a biorrefinaria, destacando-se como fonte sustentável de taninos condensados. Sob esse contexto, este estudo investigou a extração desses compostos, avaliando o efeito do tempo no rendimento e na qualidade do extrato. A metodologia consistiu na extração aquosa da casca sob três tempos diferentes: 1, 2 e 3 horas. Em seguida, foram determinados o teor de sólidos totais (TST), o índice de Stiasny (IS) e o teor de taninos condensados (TTC) dos extratos. Os resultados obtidos indicaram que o rendimento aumenta com o tempo de contato entre a casca e o solvente, com o TST crescendo de 3,81% (1 hora) para 4,61% (3 horas). O TTC também apresentou crescimento atingindo 4,29% (3 horas). No entanto, a maior pureza dos taninos foi observada no tempo de 1 hora, para um IS de 99,62%. Portanto, tempos maiores de extração maximizam o teor de taninos mas reduzem a pureza do extrato.

Palavras-chave: Biorrefinaria; Taninos condensados; Biomassa residual;

Influence of extraction time on yield and quality from *Eucalyptus cloeziana* bark

Abstract: This study investigated the extraction of tannins from *Eucalyptus cloeziana* bark, evaluating the effect of time on the yield and quality of the extract. The methodology consisted of the aqueous extraction of the bark under three different times: 1, 2, and 3 hours. Subsequently, the total solids content (TST), Stiasny index (IS), and condensed tannin content (TTC) of the extracts were determined. The obtained results indicated that the yield increases with the contact time between the bark and the solvent, with the TST growing from 70.07% (1 hour) to 91.58% (3 hours). The TTC also showed growth, reaching 86.99% (3 hours). However, the highest purity of the tannins was observed at the 1-hour time, for an IS of 99.88%. It was concluded, therefore, that longer extraction times maximize the tannin content but reduce the purity of the extract.

Keywords: Biorefinery; Condensed tannins; Residual biomass;

1. Introdução

A escolha tradicional de disposição de cascas, resíduos provenientes da indústria florestal, ainda hoje continua sendo frequentemente a queima, aterros sanitários e geração de energia de baixo valor agregado (CAMBERO et al., 2015). Além de contribuir para emissões de carbono ou desperdiçar um material com potencial de aproveitamento, essa prática não considera que a casca corresponde a aproximadamente 10–20% do volume do tronco e constitui uma importante fonte de compostos químicos de interesse para biorrefinarias e produtos florestais não madeireiros (AJAO et al., 2021). Os subprodutos de mais interesse presentes são os taninos, lignina e celulose que estão presentes, normalmente, em quantidade significativa na casca.

Os taninos são compostos de valor agregado presentes na casca, de natureza polifenólica classificados como metabólitos secundários, funcionando como uma barreira de defesa contra microrganismos, herbívoros e patógenos. Além da atuação natural, possuem diferentes aplicação industrial, sendo o maior destaque a de curtimento de couro, que historicamente deu origem ao termo “tanino” (HOQUE et al., 2025). Possuem estruturas diversificadas que se dividem em dois grupos: condensados e hidrolisáveis. Os taninos condensados são os mais abundantes na natureza, correspondendo a uma porcentagem de cerca de 90% dos taninos comercializados (HOQUE et al., 2025).

A concentração de taninos pode variar nas cascas de diferentes espécies de árvores, o que influencia na viabilidade econômica na escolha da matéria prima. Nesse contexto, o *E. cloeziana* se destaca por apresentar o maior teor de taninos entre as espécies testadas, chegando a cerca de 31%, reforçando seu potencial como uma fonte tanífera (TRUGILHO et al., 2003). Portanto, o *E. cloeziana* representa uma espécie promissora para investigar o potencial químico de seus taninos. Essa espécie é amplamente utilizada na indústria florestal, principalmente pela qualidade e durabilidade de sua madeira (REIS et al., 2017), além de gerar grande quantidades de resíduos, como as cascas, que correspondem a uma margem de 9 a 18% do volume comercial do tronco (SANTIAGO et al., 2019).

A extração aquosa, frequentemente associada ao uso de sulfito de sódio, é o método mais empregado para obtenção de taninos a partir da casca de eucalipto (SANTIAGO et al., 2019). Além disso, é válida a comparação entre solventes como água quente e etanol, para identificar as diferenças entre os rendimentos conforme o método e o solvente utilizado

(TRUGILHO et al., 2003). Porém não são apenas esses parâmetros considerados relevantes: o tempo e a temperatura de extração também são variáveis que valem a pena ser consideradas, pois temperaturas mais altas podem aumentar a solubilidade, mas o calor excessivo pode degradar estruturas inerentes do tanino, comprometendo a qualidade (HOQUE et al., 2025).

Quanto ao tempo, o rendimento tende a aumentar com um maior contato entre o solvente e o material, como observado por Lopes et al. (2015), que obtiveram o melhor rendimento de taninos condensados ao testar 3 horas de extração, em comparação com 1 e 2 horas. No entanto, a exposição prolongada pode causar oxidação e degradação dos taninos reduzindo sua estabilidade estrutural, assim como ocorre em altas temperaturas (HOQUE et al., 2025). Dessa forma, compreender a influência do tempo de extração torna-se importante para otimizar o aproveitamento desse resíduo florestal. Assim, objetivamos investigar os efeitos da variação do tempo no rendimento, medido pelo teor de sólidos totais, e na qualidade, avaliada pelo índice de Stiasny e pelo teor de taninos condensados, dos taninos extraídos da casca de *E. cloeziana*.

2. Material e métodos

A biomassa residual de *Eucalyptus cloeziana* foi obtida em parceria com uma empresa do setor florestal, proveniente da exploração madeireira. O material foi seco e posteriormente moído, e classificado granulometricamente por meio de um conjunto de peneiras avaliando o material entre 0,25 mm e 1,00 mm, padronizando o material para as análises. As extrações foram conduzidas em sistema fechado visando impedir a perda de solvente por evaporação. Para cada extração, foram pesados 22 g de casca moída e transferidos para balões volumétricos de fundo arredondado de 500 mL, adicionando 300 mL de água destilada, sem adição de sal inorgânico. Os balões foram acoplados a condensadores e colocados em mantas aquecedoras com controle térmico. Os testes foram realizados variando o tempo em três condições: 60, 120 e 180 minutos; permitindo avaliar a influência dessa variável sobre o rendimento e a qualidade dos extratos obtidos em triplicata.

Após a extração, o sistema foi resfriado à temperatura ambiente para ser filtrado em um tecido tipo flanela e realizar a separação do resíduo sólido e o extrato líquido. Após a filtragem inicial bruta, o líquido foi submetido a uma filtração a vácuo para retenção de partículas finas que podem ter permanecido. O extrato resultante foi então concentrado até um volume de cerca de 100 mL em uma chapa aquecedora para padronizar as análises posteriores. Em seguida, foram determinados o teor de sólidos totais (TST), o índice de Stiasny (IS) e o teor de taninos condensados (TTC).

Para a determinação do TST, secou-se uma alíquota de 20 mL pipetados do extrato em estufa a 103 ± 2 °C por 24 horas, sendo resfriadas em dessecador até atingir massa constante. O cálculo foi realizado pela seguinte equação: $TST\,(\%) = \left(\frac{massa\ seca\ do\ extrato}{massa\ seca\ da\ amostra}\right) \times 100$. O IS, que representa a pureza do extrato em relação aos taninos condensados, foi avaliado segundo o método proposto por Guangcheng et al. (1991). Para isso, adicionaram-se 4 mL de formaldeído e 1 mL de ácido clorídrico (HCl) concentrado a alíquotas de 20 mL do extrato. A mistura foi aquecida por 35 minutos, filtrada a vácuo, e o precipitado resultante foi seco em estufa a 103 ± 2 °C. O IS foi calculado pela fórmula: $IS\,(\%) = \left(\frac{massa\ do\ precipitado\ seco}{massa\ seca\ dos\ sólidos\ na\ alíquota}\right) \times 100$. Por fim, o TTC, representativo do rendimento real de taninos extraídos, foi obtido a partir da relação: $TTC\,(\%) = \frac{TST \times IS}{100}$.

Os dados foram compilados em planilhas no *software* Microsoft Excel, separados por tempo de extração e suas repetições em triplicata. Para cada condição experimental, os valores de massa pesados foram inseridos nas planilhas e processados por meio das fórmulas apresentadas anteriormente para as análises especificadas. A partir dos valores obtidos em triplicata, foram calculadas as médias para cada tempo de extração, e posteriormente organizadas para construção dos gráficos apresentados na seção de resultados e discussão para melhor compreensão.

3. Resultados e discussão

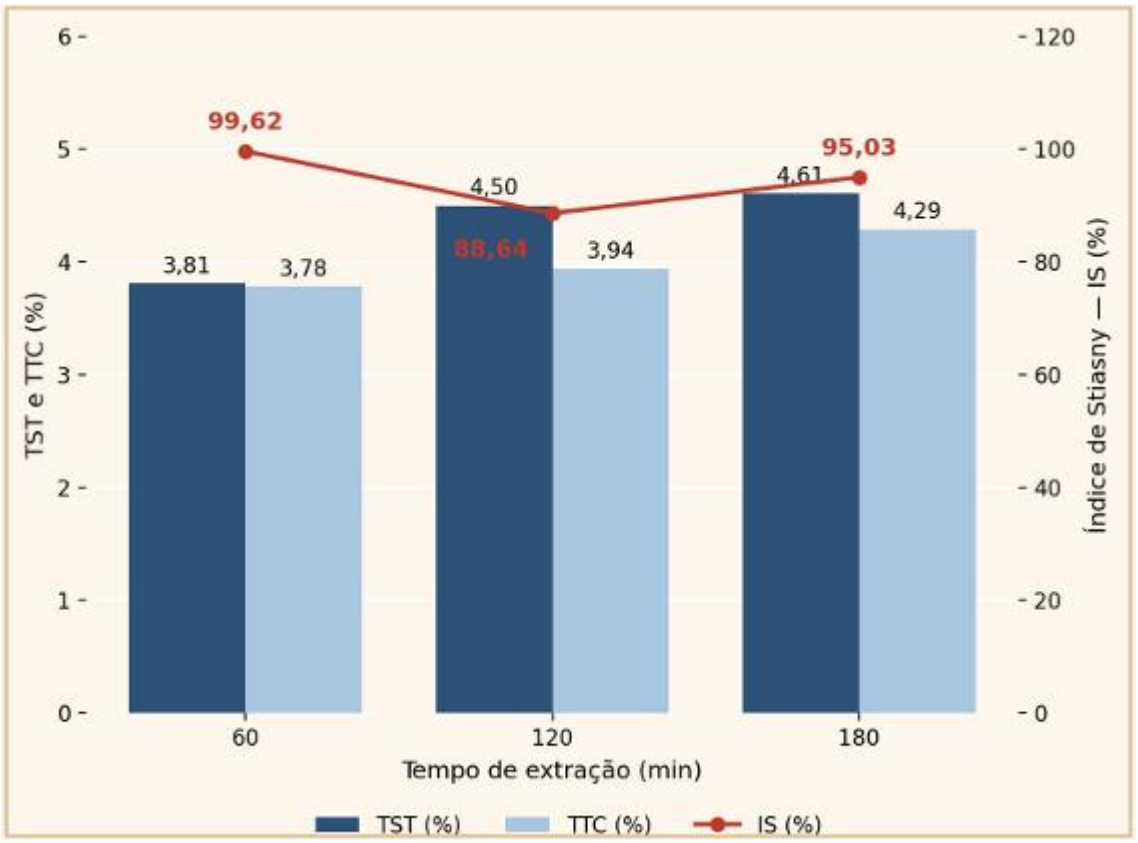
A Figura 1 apresenta os valores percentuais obtidos para cada análise realizada com a casca de *Eucalyptus cloeziana*. Os resultados mostram um aumento significativo no teor de sólidos totais (TST) de 3,81% para 4,50% de 60 a 120 minutos, porém um leve aumento para 4,61% entre 120 e 180 minutos. Esse crescimento sugere que haja estabilização do rendimento com o passar do tempo. Portanto, esse resultado indica que maior tempo de contato entre a casca e o solvente resulta em maiores valores de sólidos totais (LOPES et al., 2015) e concorda em conjunto com a dinâmica de transferência de massa descrita por Minini et al. (2017).

Já o índice de Stiasny (IS), não apresentou um comportamento linear ao se reduzir de 99,62% para 88,64% dos 60 aos 120 minutos, e depois aumentar para 95,03% aos 180 minutos. Segundo Hoque et al. (2015), a variação do tempo de contato entre o solvente e o material pode favorecer a extração de compostos não tânicos ou promover alterações estruturais nos taninos, que pode explicar a oscilação observada no IS entre 1 e 2 horas de extração. No entanto, a recuperação em 180 minutos sugere que a relação entre o tempo de exposição e a pureza não se comporta linearmente, podendo envolver cinéticas de extração distintas entre os taninos e outros grupos de compostos.

O rendimento de teor de taninos condensados é o resultado do produto entre TST e IS, seu comportamento acompanhou o crescimento do rendimento, aumentando de maneira consistente ao longo do tempo analisado. Esse resultado indica que 180 minutos proporciona maior recuperação de taninos condensados na casca de *E. cloeziana*, ainda que o extrato obtido em 60 minutos apresente maior pureza.

É possível observar visualmente na Figura 1 o que foi discutido anteriormente, enquanto o TST e o TTC apresentaram tendência de crescimento ao longo do tempo, o índice de Stiasny exibiu comportamento não linear, com redução em 120 minutos seguida de um aumento em 180 minutos.

Figura 1 – Teor de sólidos totais (TST), teor de taninos condensados (TTC) e índice de Stiasny (IS) da casca de *Eucalyptus cloeziana* em função do tempo de extração.



Os resultados obtidos mostram um comportamento que varia entre rendimento e pureza ao longo dos tempos de extração. Enquanto o TTC apresentou um crescimento contínuo, indicando que exposições maiores favorecem a maior porcentagem de taninos, o IS comprovou que a pureza do extrato não acompanhou esse aumento.

É importante considerar a aplicação pretendida na escolha do tempo de extração ideal para um processo industrial, como por exemplo, a produção de adesivos para madeira. Como visto por Dababi et al. (2020), é preferível que extratos com maior IS sejam escolhidos para a produção dos adesivos, visto que é um indicativo da pureza polifenólica e da reatividade dos taninos. Conforme os autores destacam, uma menor pureza é sinal de maior teor de compostos não-tânicos e impacta negativamente a resistência à umidade do adesivo, o que não é visado no produto final.

Já para processos que priorizam o rendimento total além da pureza, como a indústria de curtimento de couro, a tendência é se beneficiar com os tempos de extração mais longos. Onem et al. (2014) demonstraram que o prolongamento do tempo de extração resultou em um

aumento no rendimento global e na massa extraída, apesar de observar uma redução na pureza do extrato. Para a indústria de couro, essa maior obtenção dos sólidos é bastante vantajosa pois preenche as fibras do couro, agregando peso e consequentemente, um maior valor comercial ao produto.

4. Conclusões

Diante das observações, a casca de *E. cloeziana* se mostra uma matéria-prima promissora para a extração de taninos, alinhada aos princípios de valorização de resíduos florestais e economia circular, sendo necessário o ajuste do tempo de extração conforme o produto final desejado para um direcionamento estratégico. Dessa maneira, o controle do tempo de extração não se comporta apenas como um parâmetro laboratorial mas sim como uma variável importante para tomada de decisões visando maior rendimento industrial.

5. Agradecimentos

Os autores agradecem a Universidade Federal de Viçosa, o Departamento de Engenharia Florestal (DEF) e ao Laboratório de Resíduos da Indústria Florestal (LABRIF) pelo suporte acadêmico e estrutura institucional concedida. Além dessas instituições, agradecem também à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG), ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

6. Referências bibliográficas

Ajao, O., Benali, M., Faye, A., Li, H., Maillard, D., & Ton-That, M. T. (2021). Multi-product biorefinery system for wood-barks valorization into tannins extracts, lignin-based polyurethane foam and cellulose-based composites: Techno-economic evaluation. *Industrial Crops and Products*. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0926669021001990

Carneiro, A. C. O., Vital, B. R., Pimenta, A. S., & Mori, F. A. (2001). Reatividade dos taninos da casca de *Eucalyptus grandis* para produção de adesivos. *Cerne*, *7*(1), 1–9. https://www.redalyc.org/pdf/744/74470101.pdf

Dababi, I., Gimello, O., Elaloui, E., & Brosse, N. (2020). Water extraction of tannins from Aleppo pine bark and sumac root for the production of green wood adhesives. *Molecules*, *25*(21), Artigo 5041. https://doi.org/10.3390/molecules25215041

Dasiewicz, J., Wronka, A., & Kowaluk, G. (2025). From extraction to valorization: Unlocking the potential of bark-derived extraction residues for sustainable material development. *Molecules*. https://doi.org/10.3390/molecules30234537

Fernández Sosa, E. I., Felissia, F. E., Chaves, M. G., & Area, M. C. (2026). Optimization of condensed tannin extraction from Pinus taeda bark for sustainable wood adhesives. *Biomass Conversion and Biorefinery*. https://www.researchgate.net/publication/404691643_Optimization_of_condensed_tannin_extraction_from_Pinus_taeda_bark_for_sustainable_wood_adhesives

Guangcheng, Z., Yunlu, L., & Yazaki, Y. (1991). Extractive yields, Stiasny values and polyflavonoid content in barks from six acacia species in Australia. *Australian Forestry, 54*, 154-156.

Hoque, M. B., Ayman, U., Sheikh, M. S., Hannan, M. A., Haque, P., Baria, B., Rahman, M. M., Jalil, M. A., & Das, D. (2025). An in-depth review on tannin sources, extraction methods, and industrial applications. *Discover Food*, 5(401). https://doi.org/10.1007/s44187-025-00689-9

Lopes, P. J. G., Calegari, L., Calegari, C. C. A., Oliveira, E., Stangerlin, D. M., & Gatto, D. A. (2015). Produtividade em casca e taninos condensados de jurema-preta. *Nativa*, 3(2), 95-101. https://doi.org/10.31413/nativa.v3i2.2015

Minini, D., Gonçalves, F. G., Segundinho, P. G. d. A., Felberg, M. J. K. F. S., & Tinti, V. P. (2017). Resíduo de madeira de eucalipto e adesivo tânico em painéis aglomerados. *Revista Ciência da Madeira - RCM*, 8(2), 101-113.

Mori, F. A., Mori, C. L. S. de O., Mendes, L. M., Silva, J. R. M. da, & Melo, V. M. de. (2003). Influência do sulfito e hidróxido de sódio na quantificação em taninos da casca de barbatimão (Stryphnodendron adstringens). *Floresta e Ambiente*, *10*(1), 86–92.

Onem, E., Gulumser, G., Akay, S., & Yesil-Celiktas, O. (2014). Optimization of tannin isolation from acorn and application in leather processing. *Industrial Crops and Products*, *53*, 16–22. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2013.12.014

Paiva, K. L. B., Nascimento, P. E. P., Souza, D. S., Azevêdo, T. K. B., Silva, E. C. A., Marques Junior, S., Canto, J. L., Pimenta, A. S., & Silva, L. C. (2024). Viabilidade técnica de uma nova metodologia para o processo de extração de taninos condensados. *Científica Digital*. https://doi.org/10.37885/978-65-5360-771-2

Reis, C. F., Assis, T. F. de, Melo, L. A. de, & Santos, A. M. (2017). *Eucalyptus cloeziana:* Estado da arte de pesquisas no Brasil. Embrapa Florestas.

Santiago, S. B., Gonçalves, F. G., Paes, J. B., Lelis, R. C. C., Vidaurre, G. B., & Arantes, M. D. C. (2019). Condensed tannins extracted from eucalyptus bark waste. *Floresta*, 49(1), 49-56. https://doi.org/10.5380/rf.v49i1.56141

Trugilho, P. F., Lima, J. T., Mendes, L. M., & Pereira, D. C. (2003). Determinação do teor de taninos na casca de Eucalyptus spp. *Cerne*, 9(2), 246-254. https://www.researchgate.net/publication/237039523_Determinacao_do_teor_de_taninos_na_casca_de_Eucalyptus_spp

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Lignina fracionada como reforço sustentável para filmes de PLA

Matheus Fernandes de Carvalho Reis[1]; Laís Gomes Gasparoni[1]; Gabriela de Oliveira Machado[2]; Iara Fontes Demuner[1]; Luísa Guimarães[1]; Angélica de Cássia Oliveira Carneiro[1]; Taíla Veloso de Oliveira[2]

[1] Departamento de Engenharia Florestal, Universidade Federal de Viçosa
[2] Departamento de Tecnologia de Alimentos, Universidade Federal de Viçosa

Resumo: O poli (ácido lático) (PLA) é um biopolímero promissor, mas sua rigidez e fragilidade restringem certas aplicações. Para superar isso, a incorporação de lignina surge como alternativa, embora sua heterogeneidade exija um fracionamento prévio para melhorar a compatibilidade com a matriz polimérica. Este estudo objetivou avaliar o impacto da adição de lignina kraft fracionada (FL) com acetato de etila nas propriedades mecânicas e ópticas de filmes sustentáveis de PLA. Os filmes foram produzidos pelo método de casting, incorporando FL nas concentrações de 0%, 2%, 4%, 6%, 8% e 10% em massa. Foram realizados ensaios de tração e análises colorimétricas e de transmitância de luz. Os resultados demonstraram que a adição de FL melhorou o desempenho mecânico dos filmes. A resistência à tração aumentou, atingindo valor máximo com 6% de FL, indicando melhor alinhamento das cadeias poliméricas. Houve também a transição do modo de falha de frágil para dúctil. Em concentrações mais altas (10%), observou-se leve declínio na resistência devido à aglomeração da lignina. Opticamente, a luminosidade dos filmes diminuiu, adquirindo tons mais escuros e avermelhados, o que conferiu aos compósitos uma excelente propriedade de barreira contra a radiação ultravioleta (UV) devido aos grupos cromóforos da lignina. Conclui-se que a lignina fracionada é um aditivo biológico promissor. Sua interação com o PLA melhora a resistência mecânica e agrega funcionalidades fotoprotetoras, evidenciando seu elevado potencial para o desenvolvimento de embalagens sustentáveis de alta performance.

Palavras-chave: Biopolímeros; Compósitos; Barreira UV

Fractionated Lignin as a Sustainable Reinforcement for PLA Films

Abstract: Poly (lactic acid) (PLA) is a promising biopolymer, but its high stiffness and brittleness restrict certain applications. To overcome these limitations, incorporating lignin emerges as a viable alternative; however, its structural heterogeneity requires prior fractionation to improve compatibility with the polymer matrix. This study aimed to evaluate the impact of adding kraft lignin fractionated (FL) with ethyl acetate on the mechanical and optical properties of sustainable PLA films. The films were produced by the casting method, incorporating FL at mass concentrations of 0%, 2%, 4%, 6%, 8%, and 10%. Tensile tests, as well as colorimetric and light transmittance analyses, were conducted. The results demonstrated that the addition of FL improved the mechanical performance of the films. Tensile strength increased, reaching a maximum value at 6% FL, suggesting better alignment of the polymer chains. The failure mode also transitioned from brittle to ductile. At higher concentrations (10%), a slight decline in strength was observed possibly due to lignin agglomeration. Optically, the luminosity of the films decreased as they acquired darker and reddish tones, which provided the composites with excellent ultraviolet (UV) barrier properties due to the chromophore groups present in lignin. In conclusion, fractionated lignin is a promising bio-based additive. Its interaction with PLA

enhances mechanical resistance and adds photoprotective functionalities, highlighting its high potential for the development of high-performance sustainable packaging.

Keywords: Biopolymers; Composites; UV Barrier

1. Introdução

A transição para uma economia circular mais sustentável tem estimulado a substituição de plásticos de origem petroquímica por polímeros renováveis **Erro! Nome de arquivo não válido.**Entre as alternativas disponíveis, o poli (ácido lático) (PLA) destaca-se consideravelmente devido à sua síntese a partir de recursos biológicos renováveis, como o amido de milho e a cana-de-açúcar, além de apresentar características cruciais como a biocompatibilidade e a viabilidade de reinserção em cadeias produtivas circulares (Balla et al., 2021). Embora o PLA se destaque como um dos biopolímeros mais estudados para essa finalidade, sua alta rigidez e fragilidade restringem certas aplicações industriais (Khouri et al., 2024). Uma alternativa viável para superar essas limitações é a adição de compostos naturais ao PLA, como por exemplo a lignina (Beniwal, Guliani, & Toor, 2024).

A lignina representa um dos biopolímeros aromáticos mais abundantes no planeta, sendo gerada em volumes massivos como um coproduto subutilizado pelas indústrias de polpação e fabricação de celulose (Beniwal et al., 2024; Ye, You, Nawaz, & Xu, 2024). Sob a ótica do desenvolvimento de materiais, a inserção da lignina em matrizes de PLA possui o potencial não apenas de atuar como um reforço mecânico e térmico, mas também de agregar propriedades funcionais ativas (Ainali et al., 2021; Črešnar et al., 2021; Črešnar, Zamboulis, Bikiaris, Aulova, & Zemljič, 2022). Devido à sua rica composição fenólica, a lignina confere propriedades intrínsecas antioxidantes e bactericidas aos compósitos poliméricos, além de viabilizar a formação de interações químicas favoráveis, como pontes de hidrogênio com as cadeias do PLA, desde que haja compatibilidade interfacial adequada (Martínková, Grulich, Pátek, Křístková, & Winkler, 2023).

No entanto, como a lignina kraft bruta apresenta elevada heterogeneidade estrutural, o fracionamento com solventes orgânicos (como o acetato de etila) surge como um método eficiente para obter frações de maior pureza e compatibilidade com matrizes poliméricas (Song, Shi, Yang, Zhang, & Tan, 2020; Yan et al., 2022). Diante disso, este trabalho tem como objetivo principal avaliar o impacto da incorporação de lignina fracionada na resistência mecânica à tração e no comportamento óptico (cor e barreira à luz ultravioleta) de filmes sustentáveis de PLA.

2. Material e métodos

A lignina kraft de eucalipto foi submetida a um processo de extração utilizando acetato de etila (na proporção de 0,1 g/mL) sob agitação contínua em temperatura de 25 ± 2 °C por 2h. A porção que se solubilizou no solvente foi separada, seca em estufa e classificada como lignina fracionada (FL).

Os filmes à base de PLA foram obtidos pelo método de casting. Inicialmente, PLA foi dissolvido em 30 mL de diclorometano na proporção de 1:10 (m/v). A mistura foi submetida a agitação magnética a 300 rpm por 24 horas, a uma temperatura de 25 ± 2 °C, baseando-se na versão adaptada do protocolo de (Arruda et al., 2024). Na sequência, a lignina fracionada foi incorporada à dispersão para atingir concentrações finais de 0%, 2%, 4%, 6%, 8% e 10% em massa (em relação à massa do polímero), originando, respectivamente, as amostras FL0, FL2, FL4, FL6, FL8 e FL10. As dispersões poliméricas foram então homogeneizadas, desgaseificadas e vertidas sobre placas de vidro. Por fim, o solvente de todos os tratamentos foi evaporado no interior de uma capela de exaustão química, em temperatura ambiente (≅ 25 ± 2 °C).

As propriedades mecânicas de tração foram determinadas em conformidade com a norma ASTM D882-12 (ASTM, 2012). As amostras de filme foram cortadas em corpos de prova retangulares com dimensões de 175 mm × 25 mm e avaliadas em uma Máquina Universal de Ensaios (modelo 3367, Instron Corporation, Norwood, EUA) equipada com uma célula de carga de 250 N. A distância inicial entre as garras foi ajustada para 125 mm, operando-se a uma velocidade da cruzeta de 50 mm/min. Foram conduzidos três ensaios independentes, totalizando seis repetições para cada formulação.

As propriedades cromáticas dos filmes foram avaliadas por meio da medição das coordenadas de cor L* (luminosidade, variando do preto ao branco), a* (cromaticidade, variando do verde ao vermelho) e b* (cromaticidade, do azul ao amarelo) utilizando um espectrofotômetro ColorQuest® XE (HunterLab, Reston, EUA). O índice de saturação C*) e o ângulo de tonalidade (h*) foram determinados por meio das seguintes equações, respectivamente:

$$C* = \sqrt{a^2 + b^2}$$

$$h^{\circ} = \tan^{-1}\left(\frac{b}{a}\right)$$

A transmitância de luz dos filmes (20 mm × 40 mm) foi determinada utilizando um espectrofotômetro Varian Cary 50 (Agilent, EUA), realizando-se as leituras na faixa de comprimento de onda de 200 a 800 nm.

3. Resultados e discussão

Ensaios de tração foram conduzidos para avaliar como as diferentes concentrações de lignina fracionada (FL) afetaram o desempenho mecânico dos filmes (Figura 1). Todos os filmes contendo FL exibiram maior limite de resistência à tração do que o PLA puro, com o valor máximo alcançado a 6% de FL, o que sugere um melhor alinhamento das cadeias poliméricas e uma maior coesão da matriz nessa concentração (Wu et al., 2024). Na proporção de 10% de FL, a resistência à tração apresentou um leve declínio, possivelmente devido à aglomeração da lignina, que atua desestruturando a matriz (Makri et al., 2022). A tensão na ruptura acompanhou de perto o limite de resistência à tração, indicando alta resistência à falha sem degradação prematura do material.

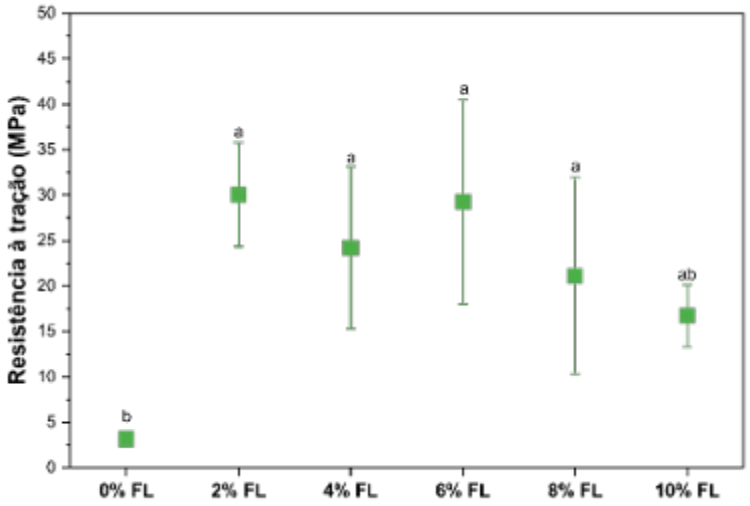


Figura 1 – Resistência à tração dos filmes de PLA com adição de lignina (LF).

A adição de FL também modificou o modo de falha de frágil (característico do PLA puro) para dúctil, refletindo um aumento na tenacidade. (Yang et al., 2020) relataram em estudos prévios que a lignina melhora significativamente a tenacidade de blendas de PLA, resultando em maior alongamento na ruptura. No entanto, no presente trabalho, o alongamento na ruptura não foi modificado pela incorporação da lignina, ao passo que a resistência à tração foi aumentada.

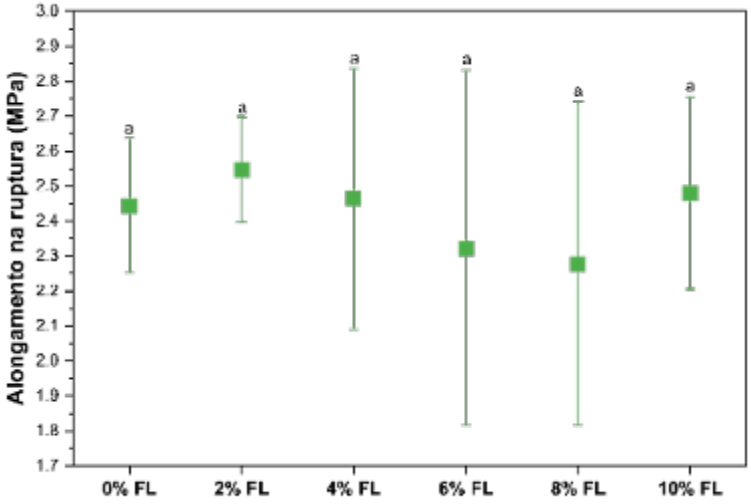


Figura 2 – Alongamento na ruptura dos filmes de PLA com adição de lignina (LF).

De forma geral, a incorporação de lignina aprimorou as propriedades mecânicas e reduziu a fragilidade dos filmes de PLA (Kim et al., 2023). Tais achados fundamentam o uso da lignina fracionada como um excelente aditivo de base biológica para expandir o espectro funcional do PLA.

A análise colorimétrica apresentada na Tabela 1 revelou que a incorporação da lignina alterou significativamente o padrão visual dos filmes.

Tabela 1 – Propriedades de cor dos filmes de PLA com adição de lignina (LF)

Coordenadas	Equação	p-value	R^2
L*	y = -0,2461X + 19,33	<0,01	0,9287
°h	y = -0,4299X + 36,02	<0,01	0,8823
C*	y = 0,5358X – 12,34	<0,01	0,6698

Observou-se uma redução linear na luminosidade (L*) e no ângulo de tonalidade (h*), acompanhada pelo aumento da saturação (C*). Com isso, os filmes transicionaram de uma aparência transparente e incolor (tratamento controle) para tons progressivamente mais escuros e avermelhados. Essa pigmentação é uma característica conferida pelos grupos cromóforos intrínsecos à lignina, com destaque para as quinonas e os grupos fenóxi (Sadeghifar & Ragauskas, 2020; Zhang, Fu, & Chen, 2020). Na Figura 3 é possível observar a avaliação visual dos filmes que confirmou o escurecimento gradativo e evidenciou a formação de agregados nas concentrações mais elevadas (8% e 10%), indicando um limite de dispersão e compatibilidade do aditivo na matriz polimérica sob altas cargas.

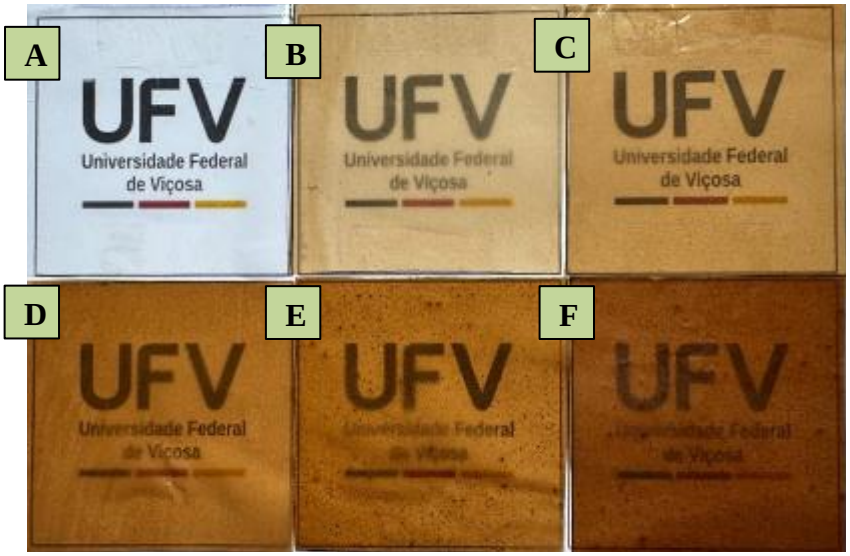


Figura 3 – Imagens fotográficas dos filmes de PLA com adição de lignina (LF). (A) 0 % FL; (B) 2 % FL; (C) 4 % FL; (D) 6 % FL; (E) 8 % FL and (F) 10 % FL.

Apesar dessa aglomeração, a intensa coloração desenvolvida ressalta o excelente potencial da lignina em atuar como uma barreira à luz, agregando valor ao biopolímero para aplicações em embalagens fotoprotetoras e materiais que demandam bloqueio contra a radiação UV (Huang, Zheng, Zhang, & Huang, 2024; Wang, Liu, Wu, & Huang, 2024).

Corroborando os resultados das propriedades cromáticas, observou-se uma redução na transmitância de luz nas regiões de absorção ultravioleta (UV) com a adição de lignina aos filmes compósitos de PLA (Figura 4).

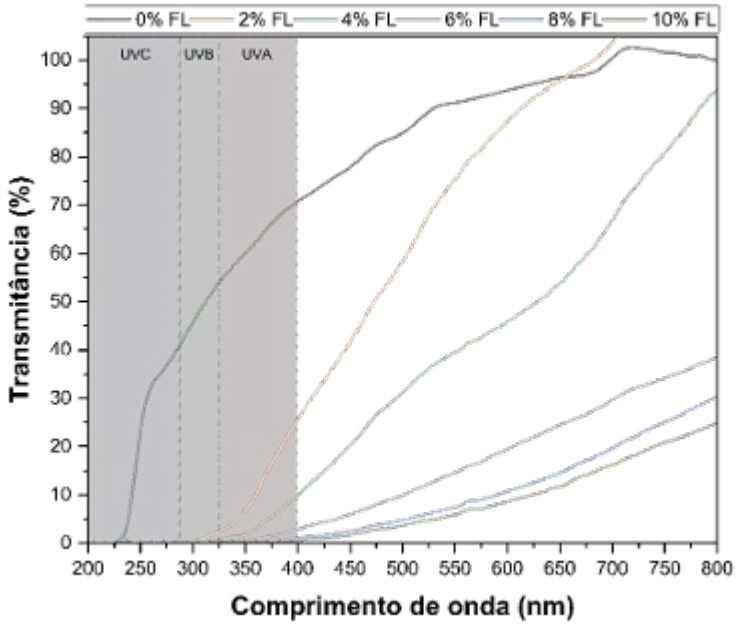


Figura 4 – Transmitância de luz nos filmes de PLA com adição de lignina (LF).

Conforme o teor de lignina aumentou, a transmitância de luz diminuiu proporcionalmente. Durante a polimerização dos monolignóis que compõem a lignina, o grupo vinil localizado na posição para da hidroxila fenólica perde sua ligação eletrônica, resultando na formação de cromóforos UV no sítio de acoplamento. Esses sítios cromóforos presentes nos grupos fenólicos da estrutura da lignina são os responsáveis por conferir à macromolécula suas propriedades intrínsecas de absorção UV. A lignina oriunda do processo de polpação exibe grupos funcionais cromóforos, como quinonas e grupos fenóxi metoxi-substituídos, que podem formar conjugados com ligações duplas ou grupos carbonila. Adicionalmente, a absorção de luz visível está primariamente ligada a estruturas insaturadas — incluindo carbonilas conjugadas, anéis aromáticos e ligações duplas carbono-carbono (C=C) —, que atuam como os principais absorvedores de luz e contribuem para a coloração escura (marrom a preta) característica da lignina (Huang et al., 2024; Sadeghifar & Ragauskas, 2020).

4. Conclusões

A incorporação de lignina fracionada em filmes de poli (ácido lático) (PLA) demonstrou ser uma estratégia promissora para o desenvolvimento de biopolímeros sustentáveis com desempenho funcional otimizado. O fracionamento com acetato de etila garantiu uma interação da lignina com a matriz polimérica, o que resultou em melhorias na resistência mecânica à tração, especialmente em concentrações de até 8%, nas quais observou-se uma distribuição mais homogênea do aditivo. Adicionalmente, as alterações cromáticas dos filmes, promovidas pela presença de grupos cromóforos na estrutura da lignina, resultaram em um material de excelentes propriedades de barreira contra a radiação ultravioleta (UV). A relação entre o reforço mecânico e as funcionalidades ópticas consolida os compósitos de PLA e lignina como alternativas ecológicas viáveis aos plásticos convencionais, evidenciando seu elevado potencial para aplicações em embalagens e materiais de alta performance.

5. Agradecimentos

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES), à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG), à Universidade Federal de Viçosa (UFV), ao Departamento de Engenharia Florestal (DEF/UFV) e à Sociedade de Investigações Florestais (SIF).

6. Referências bibliográficas

Ainali, N. M., Tarani, E., Zamboulis, A., Črešnar, K. P., Zemljič, L. F., Chrissafis, K., … Bikiaris, D. N. (2021). Thermal Stability and Decomposition Mechanism of PLA Nanocomposites with Kraft Lignin and Tannin. *Polymers*, *13*(16), 2818. https://doi.org/10.3390/polym13162818

Arruda, T. R., Marques, C. S., Bittencourt, M. T., Silva, R. R. A., Moraes, A. R. F. E., Bernardes, P. C., … De Fátima Ferreira Soares, N. (2024). Effect of the incorporation of β-acid rich hop extract on degradation in soil of polylactic acid (PLA) sheets. *Reactive and Functional Polymers*, *196*, 105852. https://doi.org/10.1016/j.reactfunctpolym.2024.105852

ASTM, A. S. for T. and M. (2012). *ASTM D882-18: Standard Test Method for Tensile Properties of Thin Plastic Sheeting* (N. ASTM D882-12). West Conshohocken: ASTM International.

Balla, E., Daniilidis, V., Karlioti, G., Kalamas, T., Stefanidou, M., Bikiaris, N. D., … Bikiaris, D. N. (2021). Poly(lactic Acid): A Versatile Biobased Polymer for the Future with Multifunctional Properties—From Monomer Synthesis, Polymerization Techniques and Molecular Weight Increase to PLA Applications. *Polymers*, *13*(11), 1822. https://doi.org/10.3390/polym13111822

Beniwal, P., Guliani, D., & Toor, A. P. (2024). Influence of functionalised lignin on strength and antioxidant properties of polylactic acid films. *Journal of Polymer Research*, *31*(3), 68. https://doi.org/10.1007/s10965-024-03912-w

Črešnar, K. P., Klonos, P. A., Zamboulis, A., Terzopoulou, Z., Xanthopoulou, E., Papadopoulos, L., … Bikiaris, D. N. (2021). Structure-Properties relationships in renewable composites based on polylactide filled with Tannin and Kraft Lignin—Crystallization and molecular mobility. *Thermochimica Acta*, *703*, 178998. https://doi.org/10.1016/j.tca.2021.178998

Črešnar, K. P., Zamboulis, A., Bikiaris, D. N., Aulova, A., & Zemljič, L. F. (2022). Kraft Lignin/Tannin as a Potential Accelerator of Antioxidant and Antibacterial Properties in an Active Thermoplastic Polyester-Based Multifunctional Material. *Polymers*, *14*(8), 1532. https://doi.org/10.3390/polym14081532

Huang, H., Zheng, C., Zhang, Z., & Huang, C. (2024). Adding lignin to bagasse cellulose-based materials increases the wet strength and reduces micro-nano scale wet low-temperature defects. *Industrial Crops and Products*, *222*, 119750. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2024.119750

Khouri, N. G., Bahú, J. O., Blanco-Llamero, C., Severino, P., Concha, V. O. C., & Souto, E. B. (2024). Polylactic acid (PLA): Properties, synthesis, and biomedical applications – A review of the literature. *Journal of Molecular Structure*, *1309*, 138243. https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2024.138243

Kim, D., Kim, J.-C., Kim, J., Cho, Y.-M., Yoon, C.-H., Shin, J.-H., … Choi, I.-G. (2023). Enhancement of elongation at break and UV-protective properties of poly(lactic acid) film with cationic ring opening polymerized (CROP)-lignin. *International Journal of Biological Macromolecules*, *253*, 127293. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.127293

Makri, S. P., Xanthopoulou, E., Klonos, P. A., Grigoropoulos, A., Kyritsis, A., Tsachouridis, K., … Bikiaris, D. N. (2022). Effect of Micro- and Nano-Lignin on the Thermal, Mechanical, and Antioxidant Properties of Biobased PLA–Lignin Composite Films. *Polymers*, *14*(23), 5274. https://doi.org/10.3390/polym14235274

Martínková, L., Grulich, M., Pátek, M., Křístková, B., & Winkler, M. (2023). Bio-Based Valorization of Lignin-Derived Phenolic Compounds: A Review. *Biomolecules*, *13*(5), 717. https://doi.org/10.3390/biom13050717

Sadeghifar, H., & Ragauskas, A. (2020). Lignin as a UV Light Blocker—A Review. *Polymers*, *12*(5), 1134. https://doi.org/10.3390/polym12051134

Song, Y., Shi, X., Yang, X., Zhang, X., & Tan, T. (2020). Successive Organic Solvent Fractionation and Characterization of Heterogeneous Lignin Extracted by *p*- Toluenesulfonic Acid from Hybrid Poplar. *Energy & Fuels*, *34*(1), 557–567. https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.9b03508

Wang, H., Liu, X., Wu, M., & Huang, Y. (2024). Construction of multiple crosslinked networks for the preparation of high-performance lignin-containing cellulose nanofiber reinforced

polyvinyl alcohol films. *International Journal of Biological Macromolecules*, *259*, 129061. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.129061

Wu, H., Li, W., Liang, Z., Gan, T., Hu, H., Huang, Z., … Zhang, Y. (2024). Mechanical activation-enhanced metal-organic coordination strategy to fabricate high-performance starch/polyvinyl alcohol films by extrusion blowing. *Carbohydrate Polymers*, *333*, 121982. https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2024.121982

Yan, Y., Zhang, L., Zhao, X., Zhai, S., Wang, Q., Li, C., & Zhang, X. (2022). *Utilization of lignin upon successive fractionation and esterification in polylactic acid (PLA)/lignin biocomposite*. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2022.01.041

Yang, W., Weng, Y., Puglia, D., Qi, G., Dong, W., Kenny, J. M., & Ma, P. (2020). *Poly(lactic acid)/lignin films with enhanced toughness and anti-oxidation performance for active food packaging*. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2019.12.085

Ye, H., You, T., Nawaz, H., & Xu, F. (2024). A comprehensive review on polylactic acid/lignin composites—Structure, synthesis, performance, compatibilization, and applications. *International Journal of Biological Macromolecules*, *280*, 135886. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.135886

Zhang, H., Fu, S., & Chen, Y. (2020). Basic understanding of the color distinction of lignin and the proper selection of lignin in color-depended utilizations. *International Journal of Biological Macromolecules*, *147*, 607–615. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.01.105

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Método de extração mecânica para produção de taninos da casca de *Anacardium occidentale* L.

Hevelly Ézia Camilo da Silva[1]; Kayo Lucas Batista de Paiva[1]; Paula Evanyn Pessoa do Nascimento[1]; Denys Santos de Souza[1]; Igor Modesto Alves Varella Brasil[1]; Laizy Nascimento dos Santos[1]; Elaine Cristina Alves da Silva[1]; Tatiane Kelly Barbosa de Azevedo[1].

[1] Universidade Federal do Rio Grande do Norte

Resumo: A casca de *Anacardium occidentale L*. apresenta potencial como fonte de taninos condensados com aplicações industriais. Este trabalho objetivou avaliar a eficiência da extração desses compostos por agitação mecânica em comparação ao método de fervura sob refluxo. As cascas foram coletadas, secas, moídas e submetidas aos tratamentos de fervura, agitação a 300 rpm e agitação a 500 rpm. Foram determinados o teor de sólidos totais, o índice de Stiasny e o teor de taninos condensados. Os resultados indicaram ausência de diferenças significativas entre os métodos para teor de sólidos totais e teor de taninos condensados. Entretanto, a agitação a 300 rpm apresentou maior índice de Stiasny, indicando maior pureza dos extratos. Conclui-se que a agitação mecânica é uma alternativa eficiente à fervura, permitindo a obtenção de extratos de qualidade semelhante ou superior.

Palavras-chave: cajueiro; compostos fenólicos; agitação mecânica.

Mechanical Extraction Method for Tannin Production from the Bark of *Anacardium occidentale* L.

Abstract: The bark of *Anacardium occidentale L.* has potential as a source of condensed tannins with industrial applications. This study aimed to evaluate the efficiency of extracting these compounds through mechanical agitation compared to the conventional reflux boiling method. The bark samples were collected, dried, ground, and subjected to the following treatments: boiling, agitation at 300 rpm, and agitation at 500 rpm. Total solids content, Stiasny index, and condensed tannin content were determined. The results indicated no significant differences among the methods regarding total solids content and condensed tannin content. However, agitation at 300 rpm showed a higher Stiasny index, indicating greater extract purity. It was concluded that mechanical agitation is an efficient alternative to boiling, allowing the production of extracts with similar or superior quality.

Keywords: cashew tree; phenolic compounds; mechanical agitation.

1. Introdução

Anacardium occidentale L., conhecida popularmente como cajueiro, pertence à família Anacardiaceae e é uma espécie arbórea perene nativa do Brasil, amplamente distribuída em regiões tropicais ao redor do mundo (Chen et al., 2023). A espécie apresenta elevada importância econômica devido à produção da castanha de caju, seu fruto verdadeiro, amplamente comercializado nos mercados nacional e internacional (Maia-Silva, 2012).

Além disso, diferentes partes da planta possuem compostos bioativos com propriedades anti-inflamatórias, antioxidantes, antimicrobianas, antibacterianas, antifúngicas e cicatrizantes (Olajide, 2004; Santos, 2011; Monteiro, 2017; Araújo et al., 2018). Segundo Paes et al. (2006) e Chaves et al. (2010), a casca do cajueiro apresenta potencial para utilização como fonte de taninos. Trabalhos recentes reforçam a importância da espécie com a caracterização química do extrato e uso de novas tecnologias para extração (Nascimento, et al, 2026).

De acordo com sua estrutura química, são classificados em taninos hidrolisáveis e taninos condensados (Monteiro et al., 2005; Pansera et al., 2003). Devido às suas propriedades químicas, esses compostos possuem ampla aplicação industrial, sendo empregados no curtimento de couro, na fabricação de adesivos para madeira e como agentes antioxidantes em alimentos e bebidas (Pizzi, 2008).

Os taninos vêm sendo utilizados como coagulantes naturais no tratamento de água e efluentes. De acordo com Oldoni et al. (2022), sua aplicação proporcionou remoções superiores a 99,7% de turbidez e cor, evidenciando sua eficiência como alternativa aos coagulantes químicos.

As cascas de árvores constituem uma das principais fontes naturais de taninos. Estudos demonstram que a casca do cajueiro contém quantidades expressivas desses compostos, além de flavonoides e ácidos anacárdicos (Agostini-Costa et al., 2002; Paes et al., 2006; Chaves et al., 2010). Em razão dessa composição química, os extratos obtidos dessa matéria-prima apresentam potencial para aplicações industriais e tecnológicas, ampliando as possibilidades de aproveitamento dessa espécie.

A eficiência de utilização dos taninos está diretamente relacionada ao método empregado para sua obtenção. Diversas técnicas podem ser utilizadas para a extração dessas substâncias, sendo essa etapa considerada fundamental, uma vez que alterações nas condições

de extração podem influenciar o rendimento, a composição química e a qualidade dos extratos obtidos (PIZZI, 1983; Carneiro et al., 2012).

A extração por fervura é amplamente empregada em estudos de obtenção de taninos condensados, sendo frequentemente utilizada como método de referência na avaliação de novas técnicas de extração. No entanto, a busca por processos mais sustentáveis e energeticamente eficientes tem estimulado o desenvolvimento de metodologias alternativas, como a agitação mecânica, cuja eficiência na extração de taninos condensados ainda necessita ser melhor investigada. Apesar do potencial do cajueiro como fonte de taninos, ainda são limitados os estudos voltados à avaliação de métodos alternativos de extração capazes de manter a qualidade dos extratos e reduzir a dependência de processos que utilizam aquecimento.

Nesse contexto, o presente trabalho teve como objetivo avaliar a eficiência da extração de taninos condensados da casca de *Anacardium occidentale* por meio da agitação mecânica, utilizando como referência o método tradicional de fervura sob refluxo, visando comparar o rendimento.

2. Material e métodos

Coleta de cascas

O estudo foi realizado no Laboratório de Produtos Florestais Não Madeireiros (LAPFLONM) da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN). As cascas de *Anacardium occidentale* L. foram coletadas de cinco indivíduos saudáveis que vegetam na Escola Agrícola de Jundiaí, em Macaíba, Rio Grande do Norte, Brasil. As amostras foram retiradas do tronco, fragmentadas, secas ao ar e moídas em moinho tipo Willey. Para as análises, utilizou-se a fração retida entre as peneiras de 16 mesh (1,00 mm) e 60 mesh (0,25 mm). O material foi homogeneizado e teve seu teor de umidade determinado para correção dos resultados em base seca.

Extração para quantificação das substâncias tânicas

Foram utilizadas amostras de 25 g de casca seca submetidas a três métodos de extração: agitação mecânica a 300 RPM, agitação mecânica a 500 RPM e fervura sob refluxo (controle). Em todos os tratamentos, empregou-se água destilada como solvente, na proporção inicial de 1:10 (m/v), realizando-se duas extrações sucessivas de 250 mL, totalizando a relação casca de 1:20. As extrações foram conduzidas durante 2 horas.

Após cada extração, os extratos foram filtrados em peneira de 200 mesh (0,075 mm), tecido de flanela e funil de vidro sinterizado (porosidade nº 2). Em seguida, foram concentrados para 250 mL por evaporação da água em aparelho tipo Soxhlet.

A determinação do teor de sólidos totais (TST), do índice de Stiasny e do teor de taninos condensados (TTC) foi realizada conforme metodologia adaptada de Guangcheng et al. (1991). Para o TST, uma alíquota de 50 mL foi seca em estufa a 103 ± 2 °C por 48 h. O índice de Stiasny foi determinado pela reação de 50 mL do extrato com 4 mL de formaldeído (37%) e 1 mL de HCl concentrado, seguida de refluxo por 30 min. O precipitado formado foi filtrado e seco a 103 ± 2 °C por 24 h. O TTC foi obtido pela multiplicação do TST pelo índice de Stiasny.

Delineamento experimental

O experimento foi conduzido em delineamento inteiramente casualizado, sendo avaliados três métodos de extração de taninos condensados (refluxo, agitação a 300 rpm e agitação a 500 rpm), com três repetições por tratamento, totalizando nove unidades experimentais. Os dados foram submetidos ao teste de normalidade de Shapiro-Wilk e à análise de variância (ANOVA). Quando constatadas diferenças significativas, as médias foram comparadas pelo teste de Tukey, ao nível de significância de 5% ($\alpha = 0,05$), utilizando o software Assistat, versão 7.7.

3. Resultados e discussão

A eficiência dos métodos de extração foi avaliada por meio do teor de sólidos totais (TST), índice de Stiasny (I) e teor de taninos condensados (TTC), cujos resultados estão apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 - Valores médios de teor de sólidos totais (TST), índice de Stiasny (I) e teor de taninos condensados (TTC) obtidos a partir do extrato da casca de *Anacardium occidentale* pelos métodos de extração por fervura e agitação mecânica (300 e 500 rpm).

Método de Extração	TST (%)	I (%)	TTC (%)
Fervura	15,47 ± 0,81 a	69,59 ± 0,46 b	10,77 ± 1,07 a
Agitação (300 rpm)	13,88 ± 0,59 a	75,44 ± 2,07 a	10,47 ± 0,43 a
Agitação (500 rpm)	15,04 ± 0,25 a	71,97 ± 3,00 ab	10,81 ± 0,62 a

As médias seguidas por mesma letra, para cada parâmetro avaliado, não diferem estatisticamente (Tukey; p >0,05).

Segundo Medeiros et al. (2019), o teor de sólidos totais (TST) representa a quantidade total de substâncias extraídas presentes nas amostras analisadas na forma sólida. Os valores obtidos variaram de 13,88% a 15,47%, não apresentando diferenças estatísticas significativas entre os tratamentos ($p > 0,05$). Esse comportamento indica que os métodos avaliados apresentaram capacidade semelhante de extração dos compostos solúveis presentes na casca, demonstrando que a agitação mecânica foi tão eficiente quanto o método convencional de fervura na obtenção dos sólidos totais.

De acordo com Anjos (2021) e Souza et al. (2021), o índice de Stiasny (I) reflete a quantidade de polifenóis reativos presentes na amostra, sendo utilizado como indicador da pureza dos taninos condensados. Diferentemente do observado para o TST, foram verificadas diferenças estatísticas significativas entre os métodos de extração para esse parâmetro. A agitação mecânica a 300 rpm apresentou o maior índice de Stiasny (75,44%), diferindo estatisticamente do método de fervura (69,59%), enquanto a agitação a 500 rpm apresentou comportamento intermediário (71,97%), não diferindo dos demais tratamentos.

De acordo com Anjos (2021), valores mais elevados do índice de Stiasny indicam maior pureza dos taninos condensados. Dessa forma, os resultados obtidos demonstram que a agitação mecânica a 300 rpm proporcionou extratos com maior proporção de taninos reativos quando comparada ao método de fervura.

O teor de taninos condensados (TTC), principal parâmetro para quantificar as substâncias tânicas presentes na casca, variou entre 10,47% e 10,81%, não sendo observadas diferenças estatísticas significativas entre os métodos de extração avaliados ($p > 0,05$). Esses resultados demonstram que a substituição da fervura pela agitação mecânica não compromete a extração dos taninos condensados, mantendo rendimento equivalente ao método convencional.

A Figura 1 apresenta a comparação dos resultados obtidos neste estudo para o teor de taninos condensados (TTC), teor de sólidos totais (TST) e índice de Stiasny (I) com os valores reportados na literatura para extratos da casca de *Anacardium occidentale*. Observa-se que os valores de TTC e TST obtidos pelos métodos avaliados apresentam comportamento semelhante aos encontrados em trabalhos anteriores, indicando que a extração por agitação mecânica possibilitou a obtenção de extratos com características compatíveis às metodologias tradicionalmente empregadas.

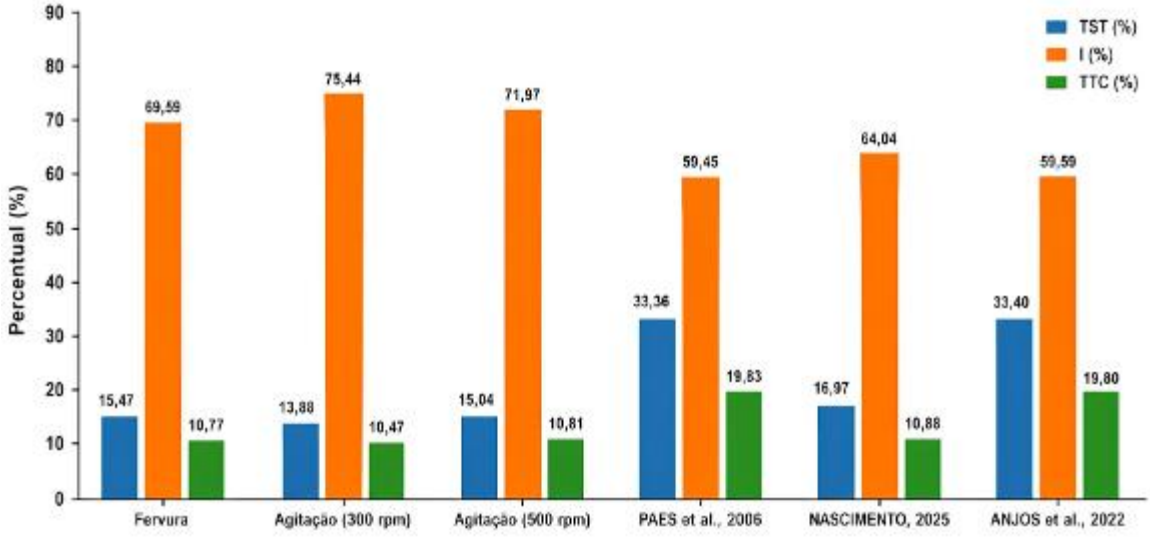


Figura 1 - Comparação dos valores de teor de sólidos totais (TST), índice de Stiasny (I) e teor de taninos condensados (TTC) do extrato da casca de *anacardium occidentale* obtidos nos diferentes métodos de extração avaliados nesta pesquisa (fervura, agitação a 300 rpm e agitação a 500 rpm) com resultados reportados na literatura.

Apesar dos rendimentos semelhantes em TTC e TST, os extratos obtidos por agitação mecânica apresentaram os maiores índices de Stiasny, alcançando valores de 75,44% e 71,97% para 300 e 500 rpm, respectivamente. Em contraste, o método de fervura apresentou índice de 69,59%. Esses resultados indicam maior pureza dos extratos obtidos por agitação mecânica, uma vez que o índice de Stiasny expressa a proporção de compostos tânicos reativos presentes no extrato. Dessa forma, a técnica mostrou-se eficiente na obtenção de extratos com menor participação de compostos não tânicos.

Quando comparados aos resultados obtidos por Nascimento (2025), realizados com indivíduos coletados no mesmo sítio experimental, os valores de TTC observados no presente estudo foram semelhantes ou ligeiramente superiores. Enquanto Nascimento (2025) registrou TTC de 10,88%, os tratamentos avaliados neste trabalho apresentaram valores entre 10,47% e 10,81%. Entretanto, as diferenças mais expressivas foram observadas para o índice de Stiasny, que atingiu até 75,44% no presente estudo, valor superior ao encontrado por Nascimento (2025), de 64,04%. Esses resultados sugerem que a agitação mecânica favoreceu a obtenção de extratos com maior pureza, mesmo sem promover aumentos expressivos no rendimento total de sólidos extraídos.

Ao comparar os resultados com outros estudos desenvolvidos com *Anacardium occidentale*, como os de Paes et al. (2006) e Anjos et al. (2022), observa-se elevada variação nos teores de taninos condensados e sólidos totais. Essa variação pode estar relacionada às diferenças ambientais entre os locais de coleta, incluindo condições climáticas, características do solo, disponibilidade hídrica, idade dos indivíduos e fatores genéticos. Tais fatores influenciam diretamente a produção de metabólitos secundários, justificando as diferenças observadas entre populações da mesma espécie.

De modo geral, os resultados demonstram que a extração por agitação mecânica foi capaz de produzir extratos com teor de taninos condensados semelhante ao método tradicional de fervura e superior pureza quando comparada a estudos realizados no mesmo sítio experimental. Esses resultados evidenciam o potencial da técnica para obtenção de extratos tânicos de melhor qualidade, contribuindo para o desenvolvimento de processos de extração mais eficientes e sustentáveis.

4. Conclusões

Conclui-se que a agitação mecânica constitui uma alternativa tecnicamente viável ao método tradicional de fervura sob refluxo para a extração de taninos condensados da casca de *Anacardium occidentale*, apresentando potencial para aplicação em processos industriais voltados ao aproveitamento sustentável dessa matéria-prima. Recomenda-se, entretanto, a realização de estudos futuros visando à otimização das condições operacionais de extração e à avaliação da viabilidade tecnológica e econômica dos extratos obtidos em escala industrial.

5. Agradecimentos

Ao Laboratório de Produtos Florestais Não Madeireiros (LAPFLONM) da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN) pelo suporte técnico e pela infraestrutura disponibilizada para a realização desta pesquisa. Á Prof.ª Dr.ª Tatiane Kelly Barbosa de Azevedo Carnaval pela orientação, incentivo e valiosas contribuições durante o desenvolvimento do trabalho, bem como ao mestrando Kayo Lucas Batista de Paiva pelo apoio técnico e científico.

Referências bibliográficas

Agostini-Costa, T. S. Lima, M. V., Lima, A., Aguiar, M. J., de Lima, J. B., & Paiva, J. (2002). Tanino em pedúnculos de caju: Efeito de algumas variações genéticas e climáticas. *Boletim do*

Centro de Pesquisa de Processamento de Alimentos, 20(2). https://doi.org/10.5380/cep.v20i2.1252

Anjos, B. F. (2021). *Produção de agentes coagulantes para clarificação da água a partir de taninos de espécies florestais da Caatinga* (Dissertação de mestrado). Universidade Federal do Rio Grande do Norte.

Araújo, J. S. C., Castilho, A. R. F., Lira, A. B., Pereira, A. V., Azevedo, T. K. B., Brito Costa, E. M. M., Pereira, M. S. V., Pessoa, H. F. L., & Pereira, J. V. (2018). Antibacterial activity against cariogenic bacteria and cytotoxic and genotoxic potential of *Anacardium occidentale* L. and *Anadenanthera macrocarpa* (Benth.) Brenan extracts. *Archives of Oral Biology, 85*, 173–179.

Carneiro, A. C. O., Vital, B. R., Frederico, P. G. U., Moreira, A. B., & Dambroz, C. S. (2012). Efeito do sulfito de sódio na extração de tanino da casca de *Anadenanthera peregrina*. *Floresta e Ambiente, 19*(1), 65–69.

Chaves, M. H., Citó, A. M. G. L., Lopes, J. A. D., Costa, D. A., Oliveira, C. A. A., Costa, A. F., & Brito Júnior, F. E. M. (2010). Fenóis totais, atividade antioxidante e constituintes químicos de extratos de *Anacardium occidentale* L., Anacardiaceae. *Revista Brasileira de Farmacognosia, 20*(1).

Chen, Y. Y., Li, N., Guo, X., Huang, H., Garcia-Oliveira, P., Sun, J., & Liu, C. (2023). Nutritional and bioactive constituents, functional activities, and industrial applications of cashew (*Anacardium occidentale*): A review. *Frontiers in Food Science and Technology*.

De Almeida, S. L., Ferreira, A. S., Pafo, F. V. E., Marinho, A. B., De Sousa, D. F., & Celestino, J. J. H. (2022). Efeitos da casca do caule do cajueiro – *Anacardium occidentale*: Uma revisão. *Revista Brasileira de Relatos de Casos, 2*(Suppl. 3), 58–63. https://doi.org/10.52600/2763-583X.bjcr.2022.2.Suppl.3.58-63

Maia-Silva, C. (2012). *Guia de plantas visitadas por abelhas da Caatinga*. Fundação Brasil Cidadão.

Medeiros, J. X., Calegari, L., Silva, G. H., Tanajura, J. A., & Braz, R. L. (2019). Bark and fruit extracts of *Anadenanthera colubrina* (Vell.), *Mimosa tenuiflora* (Willd.) and *Acacia mearnsii* (Wild.) species. *Journal of Experimental Agriculture, 30*(1), 1–7.

Monteiro, A. S., Rodrigues, R. C. E., Silva, G. F., & Albuquerque, P. M. (2017). Estudo da atividade antimicrobiana da casca da castanha de caju (*Anacardium occidentale*). *The Journal of Engineering and Exact Sciences, 3*(4).

Monteiro, J. M., Albuquerque, U. P., Araújo, E. L., & Amorim, E. L. C. (2005). Taninos: Uma abordagem da química à ecologia. *Química Nova, 28*(5), 892–896. https://doi.org/10.1590/S0100-40422005000500029

Nascimento, P. E. P., Azevedo, T. K. B., Paiva, K. L. B., Souza, D. S., Nunes, F. H. F. M., Costa, E. L. M., Silva, E. C. A., Pimenta, A. S., Miranda, N. O., & Meza Filho, J. G. (2026). Improving the extraction of *Anacardium occidentale* bark tannins by alkaline and sulphitation processes and their efficiency in coagulation: Chemical characterization by HPLC. *Revista Ambiente & Água, 21*. https://doi.org/10.4136/ambi-agua.3145

Nascimento, P. E. P. D. (2025). *Taninos extraídos de casca de Anacardium occidentale com hidróxido e sulfito de sódio podem ser eficientes no tratamento de água?* (Trabalho de Conclusão de Curso). Universidade Federal do Rio Grande do Norte.

Olajide, O. A. (2004). Effects of *Anacardium occidentale* stem bark extract on *in vivo* inflammatory models. *Journal of Ethnopharmacology, 95*, 139–142.

Oldoni, B., Steffens, C., Dallago, R., & Steffens, J. (2022). Uso de tanino como alternativa aos coagulantes químicos no tratamento de efluente de laticínio. *Revista Brasileira de Meio Ambiente, 10*(3). https://doi.org/10.66205/rvbma.v10i3.1146

Paes, J. B., Diniz, C. E. F., Marinho, I. V., & Lima, C. R. (2006). Avaliação do potencial tanífero de seis espécies florestais de ocorrência no semiárido brasileiro. *Cerne, 12*(3), 232–238.

Pansera, M. R., Santos, A. C. A., Paese, K., Wasum, R., Rossato, M., Rota, L. D., Pauletti, G. F., & Serafini, L. A. (2003). Análise de taninos totais em plantas aromáticas e medicinais cultivadas no nordeste do Rio Grande do Sul. *Revista Brasileira de Farmacognosia, 13*(1), 17–22.

Pizzi, A. (1983). *Wood adhesives: Chemistry and technology*. Marcell Dekker.

Pizzi, A. (2008). Tannins: Major sources, properties and applications. Em F. Belgacem & A. Gandini (Eds.), *Monomers, polymers and composites from renewable resources* (pp. 179–199). Elsevier.

Santos, F. O. (2011). *Atividades biológicas de Anacardium occidentale (Linn.)* (Dissertação de mestrado). Universidade Federal de Campina Grande.

Silva, D. C. G., et al. (2023). *Anacardium occidentale* L. (cajueiro) in the healing of skin wounds: An experimental study in rats. *Acta Cirúrgica Brasileira, 37*(10), e371006.

Silva, R. V. (2001). *Uso de taninos da casca de três espécies de eucalipto na produção de adesivos para madeira* (Dissertação de mestrado). Universidade Federal de Viçosa.

Souza, J. B., Azevêdo, T. K. B., Pimenta, A. S., Gomes, J. P. S., Meza Filho, J. G. U., & Silva, B. R. F. (2021). Sazonalidade do teor de taninos condensados da casca de árvores de cinco anos de idade de *Acacia mangium* cultivadas no Nordeste brasileiro. *Revista Árvore, 45*, e4523.

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Modificação superficial e secagem por pulverização de celulose micro/nanofibrilada: estudo da desintegração em água

Carine Setter[1]; Adriano Reis Prazeres Mascarenhas[2]; Tânia Fontana Dias[1]; Daniel Tavares de Farias[1]; Talita Baldin[1]; Cristiane Pedrazzi[1]; Gustavo Henrique Denzin Tonoli[3]; Tiago José Pires de Oliveira[4]

1 Departamento de Ciências Florestais, Universidade Federal de Santa Maria – UFSM, Avenida Roraima 1000, Santa Maria 97105-900, RS, Brasil.

2 Departamento de Engenharia Florestal, Universidade Federal de Rondônia, 76940-000 Rolim de Moura, RO, Brasil.

3 Departamento de Ciências Florestais, Universidade Federal de Lavras, CP 3037, 37200-900 Lavras, MG, Brasil.

4 Departamento de Engenharia, Universidade Federal de Lavras, 37200-900 Lavras, MG, Brasil.

Resumo: O estudo avaliou o efeito de pré-tratamentos químicos e da secagem por spray drying (SD), sobre a desintegração em água de filmes de celulose micro/nanofibrilada (MFC/NFC). Polpa kraft branqueada de Eucalyptus sp. foi submetida à oxidação mediada por TEMPO ou ao tratamento com silicato de sódio nas concentrações de 5% e 10%. As suspensões foram fibriladas mecanicamente em moinho, com cinco passagens a 1.500 rpm, tratadas com 5% de CTAB e secas por SD. Filmes produzidos por *casting* com suspensões nunca secas e pós redispersos foram imersos em água por 24 h. Também foi determinado o índice de retenção de água (IRA) das polpas. Os filmes produzidos com MFC/NFC TEMPO-oxidadas apresentaram os maiores percentuais de desintegração antes (25,6-28,3%) e após a secagem por SD (23,2 -29,6%). A polpa TEMPO-oxidada também apresentou IRA de 10,99 g/g, aproximadamente dez vezes superior aos demais tratamentos. Conclui-se que a oxidação mediada por TEMPO aumentou a afinidade das MFC/NFC pela água, resultando em filmes superabsorventes.

Palavras-chave: Nanocelulose; Bioabsorventes; Modificação Química.

Surface modification and spray drying of micro/nanofibrillated cellulose: a study of water disintegration

Abstract: This study evaluated the effects of chemical pretreatments and spray drying (SD) on the water disintegration of micro/nanofibrillated cellulose (CMF/CNF) films. Bleached *Eucalyptus* sp. kraft pulp was subjected to TEMPO-mediated oxidation or treatment with sodium silicate at concentrations of 5% and 10%. The suspensions were mechanically fibrillated in a mill through five passes at 1,500 rpm, treated with 5% CTAB, and dried by SD. Films produced by casting from never-dried suspensions and redispersed powders were immersed in water for 24 h. The water retention value (WRV) of the pulps was also determined. Films produced with TEMPO-oxidized CMF/CNF showed the highest disintegration percentages before (25.6–28.3%) and after SD (23.2–29.6%). The TEMPO-oxidized pulp also exhibited a WRV of 10.99 g/g, approximately ten times higher than those of the other treatments. It was concluded that TEMPO-mediated oxidation increased the affinity of CMF/CNF for water, resulting in highly absorbent films.

Keywords: Nanocellulose; Bioabsorbents; Chemical Modification.

1. Introdução

A celulose micro/nanofibrilada (MFC/NFC) têm despertado crescente interesse para o desenvolvimento de filmes e outros materiais de base biológica, devido à sua elevada área superficial, alta razão de aspecto, resistência mecânica e capacidade de formar redes coesas por meio de ligações de hidrogênio (Antony Jose et al., 2025; Pan et al., 2023). Essas características favorecem sua aplicação em embalagens, membranas para filtração e separação de diferentes misturas, sensores e dispositivos eletrônicos flexíveis (Barhoum et al., 2023; Hou et al., 2025; Li et al., 2025; Norrrahim et al., 2022).

Entretanto, as propriedades dos materiais produzidos com MFC/NFC dependem diretamente das características químicas e morfológicas das fibrilas, as quais podem ser modificadas por pré-tratamentos aplicados à polpa celulósica. A oxidação mediada por N-oxil-2,2,6,6-tetrametilpiperidina (TEMPO), por exemplo, promove a conversão seletiva de grupos hidroxila primários em grupos carboxila, aumentando a carga aniônica, a repulsão eletrostática, o intumescimento das fibras e a individualização das MFC/NFC (Fukuzumi et al., 2013; Liu et al., 2021). O tratamento com silicato de sódio constitui uma alternativa de menor custo e pode modificar a carga superficial, reduzir o diâmetro das fibrilas e facilitar a fibrilação mecânica (Mascarenhas et al., 2024). Essas alterações podem influenciar a afinidade da celulose pela água e a organização da rede fibrilas nos filmes.

Apesar das vantagens das MFC/NFC, sua produção ocorre, em geral, na forma de suspensões aquosas com baixa concentração de sólidos. Essa condição dificulta o transporte e o armazenamento. A secagem por spray drying permite obter materiais na forma de pó, facilitando seu manuseio e armazenamento. Entretanto, durante a remoção da água, as fibrilas se aproximam e formam ligações de hidrogênio irreversíveis, originando agregados compactos. Esse fenômeno, conhecido como hornificação, reduz a área superficial e dificulta a redispersão do material em água (Duan et al., 2015).

Uma alternativa para reduzir as interações interfibrilares durante a secagem é a modificação de sua superfície com surfactantes. O brometo de cetiltrimetilamônio (CTAB), um surfactante catiônico, pode interagir com grupos aniônicos presentes nas superfícies das MFC/NFC tratadas, alterando sua afinidade com a água, sua agregação durante a secagem e sua capacidade de redispersão. Ainda são limitadas as informações sobre o efeito combinado dos pré-tratamentos, do CTAB e da secagem por spray drying na desintegração em água de filmes de MFC/NFC.

Assim, o objetivo do trabalho foi avaliar o efeito da oxidação mediada por TEMPO e do pré-tratamento com silicato de sódio, associados à adsorção de CTAB e à secagem por spray

drying, sobre a desintegração em água de filmes de MFC/NFC. Também foi determinado o índice de retenção de água das polpas celulósicas, com o objetivo de relacionar a afinidade dos materiais pela água com o comportamento dos filmes.

2. Material e métodos

2.4 Tratamento e fibrilação da polpa celulósica

Fibras de polpa kraft branqueada de *Eucalyptus* sp., foram utilizadas para produzir MFC/NFC. Foram avaliadas duas estratégias de modificação da polpa celulósica antes da adsorção do surfactante catiônico CTAB: oxidação mediada por TEMPO e tratamento alcalino com silicato de sódio. O reagente N-oxil-2,2,6,6-tetrametilpiperidina, com pureza de 98%, foi adquirido da Alfa Aesar, Germany, enquanto o silicato de sódio (Na_2SiO_3), com pureza de 99%, foi adquirido da Dinâmica Química LTDA, São Paulo, Brasil.

O tratamento por oxidação mediada por TEMPO foi realizado conforme a metodologia proposta por Setter et al., (2023). O tratamento com silicato de sódio foi realizado com base na metodologia descrita por Mascarenhas et al., (2022), utilizando-se soluções aquosas de Na_2SiO_3 na concentrações de 5% e 10%, nas quais as polpas celulósicas foram imersas. Após os tratamentos, as suspensões celulósicas a 2,0% (m/m) foram fibriladas em moinho microfibrilador Super Masscolloider, modelo MKCA6-3 (Masuko Sangyo®, Japão), de acordo com a metodologia proposta por Mendonça et al., (2022). As suspensões foram submetidas a cinco passagens pelo equipamento, operado a 1.500 rpm. A distância inicial entre os discos de pedra foi ajustada para 10 µm e reduzida gradualmente conforme o aumento da viscosidade das suspensões.

2.5 Modificação com CTAB e secagem por spray drying

As suspensões de MFC/NFC foram diluídas para 0,5% (m/m) e tratadas com 5% de CTAB (pureza ~99%, PM 364,45 g/mol, Dinâmica Química LTDA, São Paulo, Brasil), em relação à massa seca de celulose. As amostras permaneceram sob agitação constante a 60 °C por 3 h e, posteriormente, à temperatura ambiente durante a noite (Abitbol et al., 2014). A secagem foi realizada em equipamento Mini Spray Dryer LM MSDi 1.0 (LabMaq, Brasil), com temperatura de entrada de 150 °C, taxa de alimentação de 0,3 L/h, vazão do ar de secagem de 0,64 m^3/min e vazão de ar comprimido de 30 L/min. Durante o processo, as suspensões foram mantidas sob agitação magnética.

Para facilitar o entendimento do leitor os tratamentos foram designados da seguinte forma: NFC e T-NFC, celulose microfibrilada sem tratamento e TEMPO-oxidadas sem adição de surfactante, respectivamente. As MFC/NFC tratadas com silicato de sódio 5%, silicato de sódio 10%, oxidadas via TEMPO e posteriormente modificadas com surfactante catiônico serão denominadas S5-CTAB, S10-CTAB e T-CTAB, respectivamente. E os materiais celulósicos obtidos após a secagem via SD, foram denominados C-NFC-SD, T-NFC-SD, S5-NFC-CTAB-SD, S10-NFC-CTAB-SD e T-NFC-CTAB-SD.

2.6 Redispersão dos agregados de MFC/NFC e preparo dos filmes

As suspensões nunca secas foram diluídas em água deionizada para 1,0% (m/m) e homogeneizadas por 10 min. Os materiais secos foram redispersos na mesma concentração e sonicados por 30 min em sonicador de ponteira ultrassônico (Marca, Eco sonics; Modelo QR500, Brasil), com potência de 750 W e frequência ultrassônica de 20 kHz, seguido de agitação magnética por 10 min. Os filmes foram produzidos por *casting*, utilizando-se 50 mL de suspensão em placas de acrílico com 15 cm de diâmetro. As amostras foram mantidas à temperatura ambiente até a evaporação da água, sendo produzido oito filmes por tratamento.

2.7 Desintegração em água dos filmes

A desintegração em água dos filmes foi baseada na metodologia proposta por Guimarães et al., (2022), com adaptações. Discos de 16 mm de diâmetro foram secos em estufa a 105 °C por 24 h, pesados e imersos em 50 mL de água deionizada por 24 h. Em seguida, as amostras foram filtradas e o material não desintegrado foi seco nas mesmas condições e novamente pesado. Foram utilizadas cinco repetições por tratamento. A desintegração em água foi calculada pela Equação 1:

(1)

Em que D é a desintegração em água (%), M_i é a massa inicial do material seco (g) e M_f é a massa final do material seco não desintegrado (g).

2.8 Índice de retenção de água

O índice de retenção de água (IRA) foi determinado a fim de verificar a influência dos pré-tratamentos sob esse parâmetro e, consequentemente, na desintegração de água dos filmes de MFC/NFC. O IRA foi determinado de acordo com o método de teste padrão SCAN-C 62:00

(SCAN-C, 2000). Amostras de polpa celulósica contendo 0,5% (m/m) foram drenadas em uma centrifuga Heraeus Megafuge 16R (Thermo Fisher Scientific, Waltham, EUA) a 3000 g por 15 min. As polpas centrifugadas foram pesadas e depois secas em estufa a 105 °C ± 2 °C por 24 h e, por fim, pesadas novamente. O IRA foi calculado com base na Equação 2.

(2)

Em que M_u e M_s são as massas após drenagem em centrífuga e após secagem em estufa, respectivamente.

2.9 Análise estatística

Para a análise estatística, considerou-se cada grupo de material, ou seja, suspensões filmogênicas nunca secas por pulverização (NS) e filmes produzidos a partir das micropartículas de celulose secas por Spray Drying (SD). Além disso, foram avaliadas as interações entre o grupo de mesmo tratamento antes e após a secagem por SD. Os resultados de desintegração em água foram submetidos à análise de variância e aqueles detectados como significativos pelo teste F, foram avaliados pelo teste de Scott Knott, a 5% de significância, utilizando o software SISVAR – Sistema de Análise de Variância, versão 5.6.

3. Resultados e discussão

3.1 Desintegração em água dos filmes celulósicos e IRA das polpas celulósicas

A desintegração em água dos filmes celulósicos é um parâmetro importante, pois fornece informações prévias sobre suas possíveis aplicações finais. Após 24 h de imersão, os filmes NS produzidos com MFC/NFC TEMPO-oxidadas apresentaram maior desintegração (Figura 1).

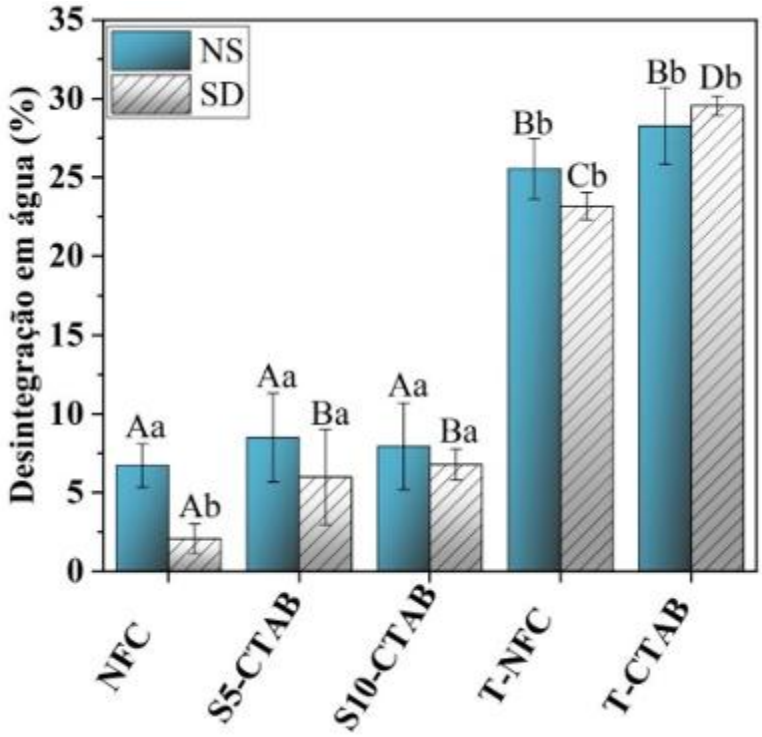


Figura 1 – Desintegração em água dos filmes de MFC/NFC após 24 h de imersão. Médias seguidas pela mesma letra não diferem pelo teste de Scott-Knott, a 5% de significância. Letras maiúsculas denotam significância entre mesmo grupo de material (NS ou SD); letras minúsculas apontam significância entre o grupo de mesmo tratamento (NFC, S5-CTAB, S10-CTAB, T-NFC e T-CTAB).

A desintegração em água dos filmes NS T-NFC (25,6%) e T-CTAB (28,3%) foi significativamente superior aos demais tratamentos NS. Em específico, a desintegração do filme T-NFC foi cerca de 3 a 4 vezes maior do que dos filmes NFC (6,7%), S5-CTAB (8,5%) e S10-CTAB (7,9%). Já, a desintegração em água do filme T-CTAB foi 320,5%, 232,9% e 255,9% maior, do que os filmes NFC, S5-CTAB e S10-CTAB, respectivamente. A maior desintegração em água dos materiais TEMPO-oxidados está relacionada à introdução de grupos carboxila na posição C6 da unidade de anidroglicose. A elevada carga aniônica aumenta a repulsão entre as fibrilas, favorece o intumescimento e reduz a coesão das microfibrilas mantidas por ligações de hidrogênio (Klemm et al., 2011).

Com isso, esse tratamento químico facilita a fibrilação das fibras de celulose, proporcionando nanofibrilas com diâmetro relativamente menores (10-20 nm) (Bakkari et al., 2019) e, portanto, maior área superficial, resultando em maior exposição de grupos polares. Assim, quando filmes celulósicos são imersos em água, eles incham e absorvem

consideravelmente mais água, pelo fato desses materiais conterem muitos grupos iônicos ativos, incluindo hidroxilas (-OH) e carboxilas (-COOH) (afinidade da água: -COOH > -OH), o que aumenta a capacidade de absorção de água (Zhou et al., 2013). Esse resultado foi confirmado pelo índice de retenção de água, que atingiu 10,99 g/g para a polpa TEMPO-oxidada, valor aproximadamente 10 vezes superior aos dos demais tratamentos (Tabela 1).

Tabela 1 - Índice de retenção de água das polpas celulósicas submetidas a diferentes tratamentos

Tratamento (fibra celulósica)	IRA (g/g)
Sem tratamento	1,07
Silicato de sódio 5%	1,06
Silicato de sódio 10%	1,10
TEMPO-oxidada	10,99

O elevado IRA das polpas TEMPO-oxidadas explica a maior desintegração dos filmes e indica potencial para aplicações em materiais superabsorventes (Patiño-Masó et al., 2019). Em contraste, o tratamento com silicato de sódio pouco alterou o IRA e não promoveu diferenças relevantes na desintegração dos filmes nunca secos. Entre os filmes produzidos com materiais secos por spray drying e redispersos, o NFC-SD apresentou a menor desintegração (2,1%), enquanto T-NFC-SD e T-CTAB-SD alcançaram 23,2% e 29,6%, respectivamente. Particularmente, a desintegração em água do filme NFC-SD foi cerca de 1004%, 1309% inferior aos observados para os filmes T-NFC-SD e T-CTAB-SD, respectivamente.

Assim, os filmes produzidos com MFC/NFC TEMPO-oxidadas mantiveram maior afinidade com a água mesmo após a secagem. A elevada desintegração em água do filme T-CTAB-SD está associada a abundância de grupos polares como -OH e -COOH na estrutura dessas MFC/NFC devido a elevada razão de aspecto promovida pelo processo ultrassônico. Ainda, observa-se que a secagem seguida de redispersão afetou significativamente apenas o material sem tratamento, promovendo redução de 69% na desintegração em água dos filmes NFC-SD em relação aos filmes NFC nunca secos. A remoção de água favoreceu a formação de agregados compactos por ligações de hidrogênio, reduzindo a área superficial disponível. Embora a sonicação tenha promovido a redispersão parcial, o NFC-SD permaneceu mais agregado que o material, o que limitou sua interação com a água.

4. Conclusões

A oxidação mediada por TEMPO aumentou a afinidade das MFC/NFC pela água, resultando em maior índice de retenção de água e maior desintegração dos filmes antes e após a secagem por spray drying. A modificação com CTAB manteve esse comportamento, sendo o tratamento T-CTAB-SD o que apresentou maior desintegração entre os materiais secos e redispersos. O silicato de sódio pouco alterou a retenção de água e a desintegração dos filmes. Para as MFC/NFC sem tratamento, a secagem promoveu a formação de agregados compactos e reduziu a desintegração em água. Dessa forma, as MFC/NFC TEMPO-oxidadas mostraram potencial para aplicações em materiais absorventes, enquanto os filmes sem tratamento e aqueles tratados com silicato de sódio podem ser destinados a aplicações que demandem alta resistência à umidade.

5. Agradecimentos

Os autores agradecem às instituições brasileiras CAPES (Agência Federal de Apoio ao Ensino Superior), CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) e FAPEMIG (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais) pelo apoio a essa pesquisa.

6. Referências bibliográficas

Abitbol, T., Marway, H., & Cranston, E. D. (2014). Surface modification of cellulose nanocrystals with cetyltrimethylammonium bromide. *Nordic Pulp & Paper Research Journal*, *29*(1), 46–57. https://doi.org/10.3183/npprj-2014-29-01-p046-057

Antony Jose, S., Cowan, N., Davidson, M., Godina, G., Smith, I., Xin, J., & Menezes, P. L. (2025). A Comprehensive Review on Cellulose Nanofibers, Nanomaterials, and Composites: Manufacturing, Properties, and Applications. *Nanomaterials*, *15*(5), 356. https://doi.org/10.3390/nano15050356

Bakkari, M. E., Bindiganavile, V., Goncalves, J., & Boluk, Y. (2019). Preparation of cellulose nanofibers by TEMPO-oxidation of bleached chemi-thermomechanical pulp for cement applications. *Carbohydrate Polymers*, *203*, 238–245. https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2018.09.036

Barhoum, A., Deshmukh, K., García-Betancourt, M.-L., Alibakhshi, S., Mousavi, S. M., Meftahi, A., Sabery, M. S. K., & Samyn, P. (2023). Nanocelluloses as sustainable membrane materials for separation and filtration technologies: Principles, opportunities, and challenges. *Carbohydrate Polymers*, *317*, 121057. https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2023.121057

Duan, C., Long, Y., Li, J., Ma, X., & Ni, Y. (2015). Changes of cellulose accessibility to cellulase due to fiber hornification and its impact on enzymatic viscosity control of

dissolving pulp. *Cellulose*, *22*(4), 2729–2736. https://doi.org/10.1007/s10570-015-0636-9

Fukuzumi, H., Saito, T., & Isogai, A. (2013). Influence of TEMPO-oxidized cellulose nanofibril length on film properties. *Carbohydrate Polymers, 2nd European Polysaccharide Network of Excellence International Conference, August 2011*, *93*(1), 172–177. https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2012.04.069

Guimarães, B. M. R., Scatolino, M. V., Martins, M. A., Ferreira, S. R., Mendes, L. M., Lima, J. T., Junior, M. G., & Tonoli, G. H. D. (2022). Bio-based films/nanopapers from lignocellulosic wastes for production of added-value micro-/nanomaterials. *Environmental Science and Pollution Research*, *29*(6), 8665–8683. https://doi.org/10.1007/s11356-021-16203-4

Hou, Y., Wu, Z., Qin, W., Loy, D. A., & Lin, D. (2025). A review on surface and interface engineering of nanocellulose and its application in smart packaging. *Advances in Colloid and Interface Science*, *345*, 103645. https://doi.org/10.1016/j.cis.2025.103645

Klemm, D., Kramer, F., Moritz, S., Lindström, T., Ankerfors, M., Gray, D., & Dorris, A. (2011). Nanocelluloses: A new family of nature-based materials. *Angewandte Chemie International Edition*, *50*(24), 5438–5466.

Li, Y., Wang, M., Meng, Y., Wang, Q., Fu, Q., Yu, C., Zhu, L., Cai, L., Chen, C., Xia, C., & Wang, S. (2025). Nanocellulose Hybrid Membranes for Green Flexible Electronics: Interface Design and Functional Assemblies. *ACS Applied Materials & Interfaces*, *17*(21), 30365–30401. https://doi.org/10.1021/acsami.5c04027

Liu, S., Low, Z.-X., Xie, Z., & Wang, H. (2021). TEMPO-oxidized cellulose nanofibers: A renewable nanomaterial for environmental and energy applications. *Advanced Materials Technologies*, *6*(7), 2001180.

Mascarenhas, A. R. P., Scatolino, M. V., Dias, M. C., Martins, M. A., Melo, R. R. de, Damásio, R. A. P., Mendonça, M. C., & Tonoli, G. H. D. (2022). Fibers pre-treatments with sodium silicate affect the properties of suspensions, films, and quality index of cellulose micro/nanofibrils: Effect of Na_2SiO_3. *Nordic Pulp & Paper Research Journal*, *0*(0). https://doi.org/10.1515/npprj-2022-0037

Mascarenhas, A. R. P., Scatolino, M. V., Lago, R. C. do, Medeiros, D. T., Batista, F. G., Setter, C., Melo, R. R. de, Martins, M. A., & Tonoli, G. H. D. (2024). Silicates as alternative pretreatment for cellulose pulp to obtain nanofibrils for application in biodegradable packaging: A technical review. *CERNE*, *30*, e-103354.

Mendonça, M., Dias, M. C., Martins, C. C. N., Durães, A. F. S., Damásio, R. A. P., & Tonoli, G. H. D. (2022). Alkaline Pretreatment Facilitate Mechanical Fibrillation of Unbleached Cellulose Pulps for Obtaining of Cellulose micro/nanofibrils (MFC). *Journal of Natural Fibers*, 1–16. https://doi.org/10.1080/15440478.2022.2092252

Norrrahim, M. N. F., Knight, V. F., Nurazzi, N. M., Jenol, M. A., Misenan, M. S. M., Janudin, N., Kasim, N. A. M., Shukor, M. F. A., Ilyas, R. A., Asyraf, M. R. M., & Naveen, J. (2022). The Frontiers of Functionalized Nanocellulose-Based Composites and Their Application as Chemical Sensors. *Polymers*, *14*(20), 4461. https://doi.org/10.3390/polym14204461

Pan, R., Cheng, Y., Pei, Y., Liu, J., Tian, W., Jiang, Y., Tang, K., Zhang, J., & Zheng, X. (2023). Cellulose materials with high light transmittance and high haze: A review. *Cellulose*, *30*(8), 4813–4826. https://doi.org/10.1007/s10570-023-05172-1

Patiño-Masó, J., Serra-Parareda, F., Tarrés, Q., Mutjé, P., Espinach, F. X., & Delgado-Aguilar, M. (2019). TEMPO-Oxidized Cellulose Nanofibers: A Potential Bio-Based Superabsorbent for Diaper Production. *Nanomaterials*, *9*(9), 1271. https://doi.org/10.3390/nano9091271

SCAN-C, S. (2000). 62: 00 Water retention value of chemical pulps. *Nordic Standardization Program*.

Setter, C., Mascarenhas, A. R. P., Dias, M. C., de Oliveira Meira, A. C. F., da Silva Carvalho, N. T., Lorenço, M. S., Martins, M. A., Tonoli, G. H. D., & de Oliveira, T. J. P. (2023). Surface modification of cellulosic nanofibrils by spray drying: Drying yield and microstructural, thermal and chemical characterization. *Industrial Crops and Products*, *201*, 116899.

Zhou, Y., Fu, S., Zhang, L., & Zhan, H. (2013). Superabsorbent nanocomposite hydrogels made of carboxylated cellulose nanofibrils and CMC-g-p(AA-co-AM). *Carbohydrate Polymers*, *97*(2), 429–435. https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2013.04.088

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Novas espécies de madeira tropical com potencial para o desenvolvimento de adesivo de base biológica

Michelângelo Vargas Fassarella[1]; João Mário Comper Covre[1]; Demetrius Profetti[1]; Izabella Luzia Silva Chaves[2]; Fabricio Gomes Gonçalves[1]

[1] Universidade Federal do Espírito Santo, Alegre, ES, Brasil
[2] Universidade Estadual de Montes Claros, Janaúba, MG, Brasil

Resumo: A busca por adesivos naturais tem se intensificado devido à necessidade de reduzir o uso de insumos sintéticos. Nesse contexto, os taninos extraídos de cascas de árvores apresentam potencial promissor para aplicações tecnológicas. O objetivo deste estudo foi quantificar os taninos presentes nas cascas de *Virola gardneri*, *Croton urucurana* e *Swartzia* spp., bem como avaliar sua reatividade e potencial de aplicação como adesivos naturais. As amostras foram coletadas em fragmentos florestais e submetidas à extração aquosa com Na_2SO_3. Os extratos foram caracterizados quanto ao teor de extrativos totais, teor de taninos, número de Stiasny e reatividade, além de análises espectroscópicas (FTIR) e termogravimétricas (TG/DTG). Os resultados indicaram elevados teores de taninos para *V. gardneri* e *C. urucurana* (≈18,61%), com índices de Stiasny superiores a 70% e reatividade acima de 94%, evidenciado por predominância de bandas características de taninos condensados altamente reativos nas análises de FTIR. Os resultados possibilitam inferir que estas espécies estudadas apresentam potencial para a indústria de adesivos naturais.

Palavras-chave: Recursos florestais; Biomateriais; Polifenóis.

New tropical wood species with potential for the development of bio-based adhesive

Abstract: The search for natural adhesives has intensified due to the need to reduce the use of synthetic inputs. In this context, tannins extracted from tree bark show promising potential for technological applications. This study aimed to quantify the tannins present in the bark of *Virola gardneri*, *Croton urucurana*, and *Swartzia* spp., as well as to evaluate their reactivity and potential application as natural adhesives. The samples were collected from forest fragments and subjected to aqueous extraction with Na_2SO_3. The extracts were characterized in terms of total extractives content, tannin content, Stiasny number, and reactivity, in addition to spectroscopic (FTIR) and thermogravimetric (TG/DTG) analyses. The results indicated high tannin contents for *V. gardneri* and *C. urucurana* (≈18.61%), with Stiasny indices above 70% and reactivity exceeding 94%, evidenced by the predominance of characteristic bands of highly reactive condensed tannins in the FTIR analyses. Make it possible to infer that these species studied have potential for the natural adhesives industry.

Keywords: Forest resources; Biomaterials; Polyphenols.

1. Introdução

As cascas dos troncos das espécies arbóreas, importante resíduo no setor florestal, além de exercerem função de barreira mecânica, apresentam elevada diversidade química, sendo ricas em polifenóis, flavonoides, terpenoides e outros extrativos (Araujo et al., 2021; Brennan et al., 2020). Entre esses compostos, destacam-se os taninos, amplamente distribuídos em árvores e arbustos, desempenhando papel relevante na resistência biótica e abiótica das plantas (Azevêdo et al., 2017; Paes et al., 2013; Pizzi et al., 2024).

Produzidos como metabólitos secundários, os taninos apresentam ampla variação estrutural e de massa molar, o que lhes confere elevada reatividade e versatilidade química (Fraga-Corral et al., 2020). Com notável importância econômica, os taninos possuem aplicações consolidadas em diferentes setores industriais, incluindo curtimento de couros, indústria alimentícia, farmacêutica, cosmética e de polímeros (Ajao et al., 2021; Arias et al., 2022).

Pesquisas tem sido ampliada para o desenvolvimento de adesivos naturais, impulsionada pela necessidade de reduzir a dependência de resinas sintéticas e as emissões de formaldeído (Alawode et al., 2019; Silva et al., 2025). Alguns estudos têm investigado o rendimento e a qualidade dos extratos tânicos de diferentes espécies (Medeiros et al., 2018), bem como os efeitos de métodos de extração, solventes e condições operacionais (Hoyos-Martínez et al., 2019). Além disso, a eficiência de extração influencia diretamente a pureza, a composição química e a reatividade dos taninos, o que impacta seu desempenho tecnológico em aplicações adesivas (Gonçalves et al., 2021).

Os taninos são compostos predominantemente hidrofílicos e podem ser extraídos por diferentes rotas, incluindo água quente, soluções alcalinas, solventes orgânico-aquosos e salinos (Gonçalves et al., 2021; Hoyos-Martínez et al., 2019). A escolha do método de extração (temperatura, tempo e tipo de solvente), afetam significativamente o rendimento e a composição do extrato (Das et al., 2020). Embora sais como o sulfito de sódio favoreçam a extração (Sousa et al., 2019), condições inadequadas podem degradar compostos bioativos ou reduzir sua eficiência.

A produção industrial de taninos ainda se concentra em um número restrito de espécies, como *Acacia mearnsii* e *Schinopsis* spp. (Pizzi et al., 2024), enquanto inúmeras espécies tropicais com potencial de prospecção de novas fontes permanecem inexploradas. Espécies como *Croton urucurana*, *Virola gardneri* e representantes do gênero Swartzia apresentam características promissoras, incluindo presença de exsudatos e compostos fenólicos associados

a elevada atividade química (Araujo et al., 2021). No entanto, ainda há lacunas quanto à quantificação de taninos e à avaliação de sua reatividade e potencial tecnológico nessas espécies.

Nesse contexto, este estudo tem como objetivo quantificar os taninos presentes nas cascas de *V. gardneri*, *C. urucurana* e *Swartzia* spp., bem como avaliar sua reatividade e potencial de aplicação como adesivos naturais, com base em parâmetros químicos e espectroscópicos. Os resultados esperados envolvem a descoberta de novas fontes de taninos para adesivos naturais, com potencial de beneficiar a indústria de base florestal, o setor de biomateriais e cadeias produtivas voltadas ao manejo e valorização recursos florestais.

2. Material e métodos

2.1 Obtenção do material

Para cada espécie, foram amostrados três indivíduos adultos, visando garantir representatividade biológica. Durante a coleta, observou-se a presença de exsudações avermelhadas nas cascas, com menor intensidade em *Swartzia* spp. (Figura 1).



Figura 1 – Etapa de obtenção do material em campo e detalhe da cor dos taninos extraídos.

As amostras de casca de *V. gardneri* foram coletadas em áreas de *inselbergs* localizadas na Unidade de Conservação Monumento Natural Maciço das Andorinhas, no município de Jerônimo Monteiro (20°46’32’’ S; 41°21’15’’ W). As cascas de *C. urucurana* foram obtidas em fragmentos florestais de borda na localidade de Santa Angélica, em Alegre (20°39’55’’ S; 41°25’27’’ W), em quantidade suficiente para o estudo e de forma a não prejudicar os indivíduos. Já as amostras de *Swartzia* spp. foram coletadas no Monumento Natural Cachoeira Alta, distrito de São Vicente, em Cachoeiro de Itapemirim (20°42’00’’ S; 41°05’04’’ W). Todas as coletadas foram realizadas no sul do estado do Espírito Santo.

A quantificação dos taninos foi realizada conforme metodologia descrita por Vieira et al. (2014). Para cada espécie, foram utilizados 10 g de casca (base seca), submetidos à extração por refluxo em 150 mL de água destilada contendo 5% de Na_2SO_3, durante duas horas. Após a extração, o teor de extrativos totais foi determinado por secagem em estufa a (103 ± 2 °C) até massa constante.

Para a determinação dos taninos condensados, alíquotas do extrato (50 mL) foram reagidas com formaldeído (37%) (4 mL) e ácido clorídrico (1 mL) concentrado em um balão volumétrico e estes foram mantidos em manta térmica sob refluxo durante 30 minutos, resultando na formação de um precipitado (Gonçalves et al., 2021). O precipitado obtido foi lavado, seco até massa constante e utilizado para estimativa do teor de taninos condensados, expresso por meio do número de Stiasny (NS), conforme a Equação 1:

$$NS(\%) = \left(\frac{Massa\ de\ taninos}{Massa\ de\ extrativos\ totais} \right) \times 100 \quad (1)$$

Esse parâmetro permite diferenciar as frações tânicas reativas das não tânicas presentes no extrato, sendo amplamente utilizado na avaliação do potencial adesivo de extratos fenólicos. A reatividade foi realizada pelo método Ultravioleta, conforme metodologia descrita em (Roffael, 1976; Vieira, 2010).

2.2 Caracterização espectroscópica (FTIR)

Os extratos tânicos em pó, previamente peneirados em malha de 240 mesh, foram analisados por espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier (FTIR). As análises foram realizadas em espectrofotômetro (Bruker, modelo Tensor 27), na faixa espectral de 4000 a 400 cm^{-1}, com resolução de 4 cm^{-1}. Foi utilizada a técnica de refletância total atenuada (ATR), permitindo a análise direta das amostras sólidas.

2.3 Análise termogravimétrica (TG/DTG)

A estabilidade térmica dos extratos foi avaliada por análise termogravimétrica (TG/DTG), utilizando um analisador (Setaram, modelo LabSys Evo). As amostras foram aquecidas da temperatura ambiente até 895 °C, sob atmosfera de nitrogênio, com taxa de aquecimento de 10 °C/min.

3. Resultados e discussão

3.1 Rendimento e Reatividade dos extratos

Os extratos de *V. gardneri* e *C. urucurana* apresentaram altos teores de tanino, índice de Stiasny (NS) e alta reatividade (Tabela 1). Esse desempenho está relacionado à predominância de taninos condensados com alta reatividade, favorecendo a formação de redes poliméricas estáveis. Em contraste, os baixos valores observados para *Swartzia* sp. indicam predominância de compostos pouco reativos, limitando sua aplicação.

Tabela 1 - Quantificação do teor extrativos totais, taninos, número de Stiasny e reatividade

Espécies Tropicais	Extrativos (%)	Taninos (%)	NS	Reatividade (%)
Croton urucurana	23.35	16.61	71.16	94.20
Swartzia sp	12.69	1.66	13.09	27.32
Virola gardneri	25.54	18.13	71.00	97.35

Os resultados de NS observado *V. gardneri* e *C. urucurana* indicam maior proporção de estruturas fenólicas capazes de reagir com agentes reticulantes, favorecendo a formação de redes poliméricas tridimensionais estáveis. Essa característica é reforçada pelos elevados valores de reatividade, que sugerem eficiência na interação química com formaldeído, aspecto essencial para o desempenho de adesivos.

3.2 FTIR

No espectro de FTIR (Figura 1), a banda larga entre 3700 e 3000 cm^{-1} corresponde ao estiramento O–H de grupos fenólicos, conferindo caráter reativo aos taninos (Araujo et al., 2021). Bandas típicas de taninos condensados foram observadas em todas as espécies de madeira em 1514 cm^{-1} e 1442 cm^{-1}, associadas, respectivamente, às vibrações δ(-C=C-) e ν(C–C) de anéis aromáticos.

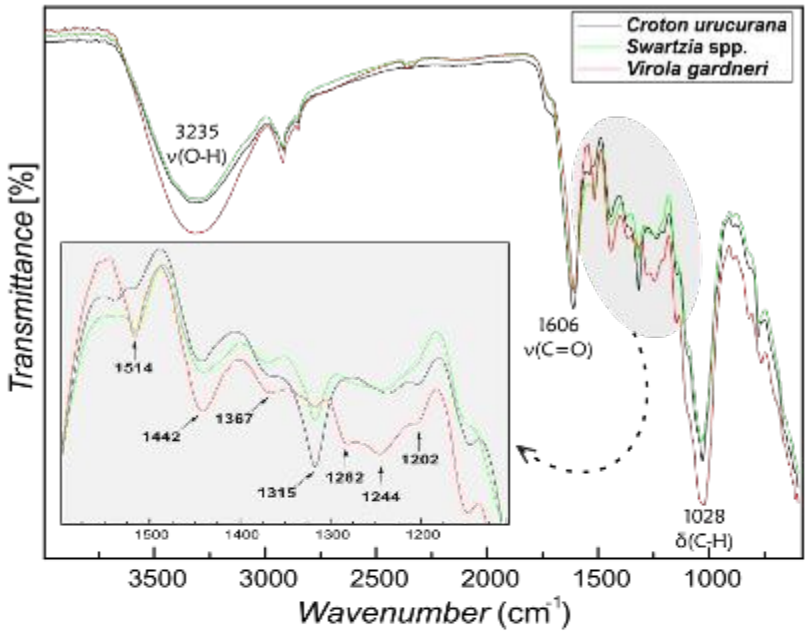


Figura 1 - Espectros de FTIR presentes nos extratos tânicos das espécies tropicais.

Esses resultados são semelhantes aos reportados para *M. eximia* (Araujo et al., 2021), com maiores intensidades observadas em *V. gardneri*. O sinal em 1538 cm^{-1}, observado para *C. urucurana*, indica a presença de anéis aromáticos com dois grupos hidroxila, atribuídos a estruturas do tipo profisetinidina ou procianidina (Cesprini et al., 2022).

Silva et al. (2025) relataram que a combinação de altos valores de número de Stiasny (NS) e bandas intensas de estiramento C=C, particularmente em 1442 cm^{-1}, indica elevada pureza dos extratos tânicos. O espectro de *Swartzia* spp. apresentou bandas distintas em 1367 cm^{-1} e 1315 cm^{-1}, típicas de estiramentos C–O e C–O–H associados ao ácido gálico presente em taninos hidrolisáveis. Adicionalmente, *V. gardneri* apresentou menor intensidade nessa região espectral.

Nos taninos condensados, as bandas em 1282 e 1244 cm^{-1} correspondem às vibrações de estiramento C–O e C–O–H, bem como à deformação angular de C–H do anel B, enquanto as bandas entre 1202 e 1147 cm^{-1} estão associadas ao anel A (Cesprini et al., 2022). Segundo os autores, essas absorções são características de unidades catecol do anel B, presentes em estruturas de fisetinidina e catequina, indicando taninos condensados do tipo flavan-3-ol.

Nessa região, apenas *V. gardneri* apresentou todas as bandas características. Em contraste, *Swartzia* spp. não apresentou bandas em 1238, 1201 e 1147 cm^{-1}, indicando menor concentração de grupos fenólicos reativos em comparação com as demais espécies. *V. gardneri* apresentou maior intensidade em 1028 cm^{-1}, deslocamento de banda de 782 para 765 cm^{-1}, além

de bandas exclusivas em 820 e 612 cm^{-1}, atribuídas às vibrações de deformação angular de grupos aromáticos C–H e O–H (Cesprini et al., 2022).

3.3 Termogravimetria

As curvas TG/DTG dos extratos tânicos de *C. urucurana*, *V. gardneri* e *Swartzia* sp. apresentaram comportamento térmico semelhante, caracterizado por três etapas principais de degradação (Figura 3). A primeira etapa, abaixo de ~120 °C, está associada à perda de umidade e compostos voláteis (Alawode et al., 2019). A segunda, entre aproximadamente 200–250 °C, corresponde à degradação de componentes menos estáveis, como carboidratos associados.

Figura 3 - TG/DTG.

A principal etapa de decomposição ocorre acima de 250 °C, atribuída à degradação das estruturas fenólicas dos taninos (Araujo et al., 2021). Extratos de *C. urucurana* e *Swartzia* spp. apresentaram picos mais intensos na curva DTG acima de 400 ºC, ao contrário de *V. gardneri*. Essas diferenças indicam variações na resistência térmica, associadas à estrutura, ao grau de polimerização e à natureza das ligações interflavonoides, que governam as etapas de decomposição térmica (Janceva et al., 2022). Todas as amostras apresentaram massa residual próxima a 30%, em concordância com a literatura.

4. Conclusão

Os principais achados evidenciaram que *V. gardneri* e *C. urucurana* apresentam elevados teores de taninos (~18%), altos índices de Stiasny e elevada reatividade, além de características estruturais e estabilidade térmica compatíveis com taninos condensados de alto desempenho.

Tanino obtidos da casca de *Swartzia* spp. demonstrou baixa aptidão tecnológica destacando-se a ausência de bandas características de taninos condensados no FTIR, o que confirma a predominância de compostos pouco reativos.

Como contribuição científica, o estudo avança na prospecção de novas fontes tropicais de taninos, valida o uso integrado de FTIR e o número de Stiasny como abordagem metodológica e fornece evidências da relação entre estrutura química e reatividade.

Considerando aspectos ecológicos, *C. urucurana* se destacou como a alternativa mais viável para pesquisas subsequentes em formulações de adesivos. Possibilitando assim a ampliação da prospecção de espécies com ênfase em matérias-primas sustentáveis.

5. Agradecimentos

Os autores agradecem ao Laboratório Multiusuário de Instrumentação – LabMInst (LabPetro-Ufes, Brasil) pela realização das análises de FTIR e TG-DTG (Acordos de Cooperação Técnica nº 0050.0022844.06.4, nº 5900.0112399.19.9, Edital Fapes nº 08/2021 e PRPPG-Ufes).

6. Referências bibliográficas

Ajao, O., Benali, M., Faye, A., Li, H., Maillard, D., & Ton-That, M. T. (2021). Multi-product biorefinery system for wood-barks valorization into tannins extracts, lignin-based polyurethane foam and cellulose-based composites: Techno-economic evaluation. *Industrial Crops and Products*, *167*, 113435. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2021.113435

Alawode, A. O., Bungu, P. S. E., Amiandamhen, S. O., Meincken, M., & Tyhoda, L. (2019). Properties and characteristics of novel formaldehyde-free wood adhesives prepared from *Irvingia gabonensis* and *Irvingia wombolu* seed kernel extracts. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, *95*, 102423. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2019.102423

Araujo, E. S., Lorenço, M. S., Zidanes, U. L., Sousa, T. B., Mota, G. S., Reis, V. N. O., Silva, M. G., & Mori, F. A. (2021). Quantification of the bark Myrcia eximia DC tannins from the Amazon rainforest and its application in the formulation of natural adhesives for wood. *Journal of Cleaner Production*, *280*, 124324. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124324

Arias, A., González-García, S., Feijoo, G., & Moreira, M. T. (2022). Tannin-based bio-adhesives for the wood panel industry as sustainable alternatives to petrochemical resins. *Journal of Industrial Ecology*, *26*(2), 627–642. https://doi.org/10.1111/jiec.13210

Azevêdo, T. K. B., Paes, J. B., Calegari, L., & Santana, G. M. (2017). Teor de taninos condensados presente na casca de Jurema-preta (Mimosa tenuiflora) em função das fenofases. *Floresta e Ambiente*, *24*, e00026613-7. https://doi.org/10.1590/2179-8087.026613

Brennan, M., Fritsch, C., Cosgun, S., Dumarcay, S., Colin, F., & Gérardin, P. (2020). Yield and compositions of bark phenolic extractives from three commercially significant softwoods show intra- and inter-specific variation. *Plant Physiology and Biochemistry*, *155*, 346–356. https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2020.07.033

Cesprini, E., Causin, V., De Iseppi, A., Zanetti, M., Marangon, M., Barbu, M. C., & Tondi, G. (2022). Renewable tannin-based adhesive from Quebracho extract and furfural for particleboards. *Forests*, *13*(11), 1781. https://doi.org/https://doi.org/10.3390/f13111781

Das, A. K., Islam, M. N., Faruk, M. O., Ashaduzzaman, M., & Dungani, R. (2020). Review on tannins: Extraction processes, applications and possibilities. *South African Journal of Botany*, *135*, 58–70. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.sajb.2020.08.008

Fraga-Corral, M., García-Oliveira, P., Pereira, A. G., Lourenço-Lopes, C., Jimenez-Lopez, C., Prieto, M. A., & Simal-Gandara, J. (2020). Technological application of tannin-based extracts. *Molecules*, *25*(3), 1–27. https://doi.org/https://doi.org/10.3390/molecules25030614

Gonçalves, F. G., Chaves, I. L. S., Brito, A. S., Silva, E. S. G., Fassarella, M. V., Lopez, Y. M., & Oliveira, R. G. E. (2021). Extracción de taninos de la corteza de Pinus tratada térmicamente: Evaluación de su aplicación como adhesivo. *Madera y Bosques*, *27*, e2712041. https://doi.org/http://dx.doi.org/10.21829/myb.2021.2712041

Hoyos-Martínez, P. L., Merle, J., Labidi, J., & Bouhtoury, F. C. – El. (2019). Tannins extraction: A key point for their valorization and cleaner production. *Journal of Cleaner Production*, *206*, 1138–1155. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.09.243

Janceva, S., Andersone, A., Spulle, U., Tupciauskas, R., Papadopoulou, E., Bikovens, O., Andzs, M., Zaharova, N., Rieksts, G., & Telysheva, G. (2022). Eco-friendly adhesives based on the oligomeric condensed tannins-rich extract from Alder bark for particleboard and plywood production. *Materials*, *15*(11), 3894. https://doi.org/https://doi.org/10.3390/ma15113894

Medeiros, J. X., Calegari, L., Silva, G., Oliveira, E., & Pimenta, A. (2018). Measurement of tannic substances in forest species. *Floresta e Ambiente*, *25*(3), e20160589. https://doi.org/https://doi.org/10.1590/2179-8087.058916

Paes, J. B., Diniz, C. E. F., Lima, C. R., Bastos, P. M., & Neto, P. N. M. (2013). Taninos condensados da casca de angico-vermelho (*Anadenanthera colubrina* var. cebil) extraídos com soluções de hidróxido e sulfito de sódio. *Caatinga*, *26*(3), 22–27.

Pizzi, A., Laborie, M.-P., & Candan, Z. (2024). A review on sources, extractions and analysis

methods of a sustainable biomaterial: Tannins. *Journal of Renewable Materials*, *12*(3), 397–425. https://doi.org/https://doi.org/10.32604/jrm.2023.046074

Roffael, E. (1976). ROFFAEL, E. Über die reaktivität von wäßrigen rindenextrakten gegenüber formaldehyd. *Adhäsion, Cham*, *20*(11), 306–311.

Silva, E. S. G., Esteves, B. M. M. L., Domingos, I., Almeida, M., Araujo, B., Chaves, I. L. S., Fassarella, M. V., Lelis, R. C. C., Paes, J. B., Carvalho, L. M. H., & Gonçalves, F. G. (2025). Chemical modification of *Pachira aquatica* oil for bio-based polyurethane wood adhesives. *Forests*, *16*, 1843. https://doi.org/http://dx.doi.org/10.3390/f16121843

Silva, L. C., Nascimento, P. E. P., Paiva, K. L. B., Souza, D. S., Pimenta, A. S., Ucella-Filho, J. G. M., & Azevêdo, T. K. B. (2025). Quantification and FTIR-based chemical characterization of condensed tannins extracted from the bark of tropical tree species. *Revita Árvore*, *49*, e4917. https://doi.org/https://doi.org/10.53661/1806-9088202549263864

Sousa, T. B., Souza, S. G., Franco, T. B. B., Jesus, M. S., & Mori, F. A. (2019). Quantification of tannins from Curupay bark. *Floresta e Ambiente*, *26*, e20160082. https://doi.org/https://doi.org/10.1590/2179-8087.008216

Vieira, M. C. (2010). *Colagem de painéis OSB com adesivos à base de taninos da casca de* Pinus oocarpa *Schiede ex Schltdl.* Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais e Florestais) - Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ.

Vieira, M. C., Lelis, R. C. C., & Rodrigues, N. D. (2014). Chemical properties of tannic extracts from bark of *Pinus oocarpa* and their use as adhesive. *Cerne*, *20*(1), 47–54.

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

OTIMIZAÇÃO DA OXIDAÇÃO ALCALINA COM NITROBENZENO PARA CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA DA LIGNINA DA MADEIRA E KRAFT

Paulo Roberto Tavares Miranda[1], Larisse Aparecida Ribas Batalha[1], Fernando José Borges Gomes[1], Roberto da Costa Carlos Lelis[1], Rosane Nora Castro[1], Vinicius Olivieri Rodrigues Gomes[1], Júlia Pessanha Monteiro[1], Nilton Louvem da Silva Junior[1]

[1] Universidade Federal Rural do Rio de janeiro

Resumo

A lignina é um polímero composta por unidades p-hidroxifenila (H), Guaiacila (G) e Siringila (S), cuja proporção pode ser utilizada para definir o uso industrial da biomassa. Este estudo visou otimizar a oxidação com nitrobenzeno para madeira de eucalipto e lignina Kraft. Os experimentos demonstraram que rendimentos máximos ocorreram a 170 °C (madeira) e 190 °C (Kraft) por 2,5 horas. A unidade H não foi detectada por oxidação através da análise de Ressonância Magnética Nuclear (RMN 2D), mas a pirólise (PI-CG/EM) indicou sua presença. Tal divergência sugere que a degradação térmica de unidades G e S na pirólise gera falsos positivos para H. Assim, a oxidação otimizada e a RMN 2D são mais precisas para a caracterização estrutural. Conclui-se que a técnica de PI-CG/EM deve ser usada com cautela devido à formação de unidades H. A otimização proposta melhora a avaliação química da lignina para aplicações em bioenergia e celulose.

Palavras-chave: Relação H/G/S; RMN 2D; PI-CG/E.

OPTIMIZATION OF ALKALINE OXIDATION WITH NITROBENZENE FOR CHEMICAL CHARACTERIZATION OF WOOD AND KRAFT LIGNIN

Abstract

Lignin is a polymer composed of H, G, and S units, the proportion of which defines the industrial application of the biomass. This study optimized alkaline nitrobenzene oxidation for eucalyptus wood and Kraft lignin. Experimental results demonstrated that maximum yields occurred at 170 °C for wood and 190 °C for Kraft lignin, with a residence time of 2.5 hours. While the H unit was not detected by oxidation or 2D NMR, pyrolysis (Py-GC/MS) indicated its presence. This divergence suggests that the thermal degradation of G and S units during pyrolysis generates false positives for H. Thus, optimized oxidation and 2D NMR are more accurate for structural characterization. It is

concluded that the Py-GC/MS technique should be used with caution due to the formation of H units. The proposed optimization improves the chemical evaluation of lignin for applications in bioenergy and pulp production.

Keywords: H/G/S relation; 2D NMR; Py-GC/MS**.**

1. Introdução

O Brasil é um dos maiores produtores mundiais de celulose, alcançando 25,5 milhões de toneladas de celulose produzidas em 2024, atrás apenas dos EUA. Aproximadamente 75% dessa produção é exportada, contribuindo significativamente para a balança comercial (IBÁ, 2025). Diante disso, empresas do setor investem constantemente em tecnologias e inovações. Um subproduto relevante do processo é o licor negro, rico em lignina. Tradicionalmente subutilizada como fonte energética, a lignina representa uma oportunidade de valorização. O aproveitamento industrial desse composto pode ampliar sua aplicação e rentabilidade. Assim, o setor busca soluções sustentáveis e economicamente viáveis para aumentar sua competitividade.

A lignina é um subproduto promissor da indústria de celulose, sendo o principal componente do licor negro (DEMUNER et al., 2019). Possui alto potencial energético e estrutura fenólica, e é classificada pela proporção dos monômeros guaiacila (G), siringila (S) e p-hidroxifenila (H), derivados dos álcoois coniferílico, sinapílico e p-cumarílico. No eucalipto predomina a lignina S-G; em coníferas, G-H (Sarkanen et al., 1971); e em gramíneas, H-G-S (DEL RÍO et al., 2005). O teor e a estrutura da lignina influenciam a produção de polpa, afetando a deslignificação, consumo de reagentes e rendimento no cozimento da madeira (RODRIGUES et al., 1999).

A velocidade de deslignificação é influenciada pela estrutura química da lignina, sendo diretamente proporcional à relação S/G (siringila/guaiacila). Uma maior relação S/G pode afetar significativamente as propriedades da madeira, bem como o rendimento do processo de polpação. As ligninas com uma alta proporção de unidades siringila tendem a deslignificar mais rapidamente devido à sua menor resistência à quebra química, comparadas às ligninas com uma maior proporção de unidades guaiacila. Portanto, a composição da lignina, em termos da relação S/G, desempenha um papel crucial na eficiência do processo de produção de polpa de celulose, afetando tanto o consumo de reagentes químicos quanto a qualidade final da polpa (COLLINS et al., 1990; WALLIS et al., 1996; DEL RÍO et al., 2005; RODRIGUES et al., 1999).

Diversos métodos químicos, físicos e citológicos são usados para caracterizar a lignina, embora sua composição molecular completa ainda seja desconhecida (Monties et al., 1991). A oxidação alcalina de nitrobenzeno, introduzida por (Freudenburg et al.,1940), é o método mais usado para análise estrutural em materiais lignocelulósicos (Lapierre et al., 2010). Nesse processo, as unidades p-hidroxifenil (H), guaiacil (G) e siringil (S) são degradadas em aldeídos: p-hidroxibenzaldeído, vanilina e siringaldeído, além de pequenas quantidades de seus ácidos correspondentes. As razões Sr/V e B/V são marcadores importantes para caracterizar a lignina (Sarkanen et al., 1971), influenciando seu aproveitamento industrial na produção de papel e bioenergia.

Dessa forma, este trabalho teve como objetivo otimizar tempo e temperatura na oxidação alcalina com nitrobenzeno para maximizar o rendimento. Visa melhorar a avaliação química da lignina da madeira e da lignina Kraft de eucalipto. A otimização busca uma caracterização mais precisa da estrutura da lignina. Isso contribui para sua aplicação industrial na fabricação de papel e bioenergia.

2. Material e métodos

As amostras, madeira e lignina Kraft de eucalipto, foram obtidas juntos a uma empresa brasileira do setor de Celulose & Papel. O teor de lignina total foi obtido pela soma da lignina insolúvel em ácido (TAPPI 222 om 88) e lignina solúvel ácido (TAPPI UM 250).

A oxidação alcalina com nitrobenzeno foi realizada em reator termostático a 170°C, 180°C e 190°C, com tempos de 1,5 h, 2,5 h e 4 h. Para lignina kraft, usaram-se 50 mg da amostra, 5 mL de NaOH 2N e 0,5 mL de nitrobenzeno; para madeira livre de extrativos, 200 mg, 7 mL de NaOH 2N e 0,5 mL de nitrobenzeno. Após a reação, o reator foi resfriado e adicionou-se 1 mL de 5-iodovanilina como padrão interno. A mistura foi extraída três vezes com diclorometano, descartando a fase orgânica. A fase aquosa foi acidificada até pH 2,5 e extraída novamente com diclorometano (3x). A fase orgânica foi seca, evaporada e o resíduo dissolvido em 0,5 mL de acetona, sendo então injetado no cromatógrafo.

A cromatografia gasosa quantitativa foi realizada em um equipamento Perkin Elmer Clarus 680 equipado com detector de ionização de chama (FID) e coluna Elite-1 (30 m × 0,32 mm × 0,25 μm). A temperatura de injeção foi de 200°C, a temperatura do detector foi de 270◦C e o fluxo de gás carreador foi de 2 mL de ar sintético/min. A coluna foi mantida por 3 min a 120°C, elevada a 5°C/min a 200°C, seguida de 10°C/min a 260°C por 5 min. Os aldeídos: p-hidroxibenzaldeído, vanilina, siringaldeído foram utilizados como padrões.

Os espectros de RMN HSQC 2D foram obtidos em um espectrômetro Bruker Avance 500 MHz com Quad probe, usando o programa “hsqcedetgpsisp 2”. Amostras de lignina (100 mg/mL) foram dissolvidas em DMSO-d6. A análise ocorreu a 25°C, com 2.048 pontos em F2, 512 em F1 e 32 varreduras. Os dados foram processados no software Bruker Topspin-NMR. O pico de DMSO (δC/δH 39,5/2,5) serviu como referência interna.

A pirólise à temperatura de 550°C foi realizada em um pirolisador de micro-forno conectado a um aparelho GC-MS (Shimadzu, model QP2020). Sendo a relação H/G/S obtida pela soma da área percentual de todos os picos derivados de cada monômero de interesse, indicados a seguir: Lignina p-hidroxifenila (H): fenol, o-creosol, p-creosol, m-creosol, 2,4-dimetilfenol, 2,6-dimetilfenol; Lignina guaiacila (G): guaiacol, 4-metilguaiacol, 4-etilguaiacol, 4- vinilguaiacol, eugenol, 4-propilguaiacol, vanilina, 4-propenilguaiacol, guaiacil-acetona, 3-metilguaiacol, 5-metilguaiacol, 4-acetilguaiacol; Lignina siringila (S): siringol, 4-metilsiringol, 4-vinilsiringol, 4- propenilsiringol, siringaldeído, homosinringaldeído, siringila-acetona, 2,3-dimetilfenol, 3,4-dimetoxifenol, e 4-acetilsiringol.

3. Resultados e discussão

O rendimento de extração dos monômeros H, G e S por oxidação alcalina com nitrobenzeno foi obtido pela razão entre os aldeídos identificados na cromatografia e o teor de lignina total. As amostras analisadas apresentaram 29,5% de lignina para madeira livre de extrativos e 95,0% para lignina Kraft de eucalipto. A derivatização, como a sililação, melhora a resposta dos analitos e separação cromatográfica (Cruz, 2004), mas eleva o custo e tempo de análise. Devido às boas respostas dos aldeídos p-hidroxibenzaldeído, vanilina e siringaldeído nas condições adotadas, optou-se por não derivatizar. Essa decisão tornou a análise mais simples e econômica, mantendo boa eficiência na separação. Assim, os objetivos do estudo foram atendidos sem comprometer a qualidade dos dados gerados.

A Tabela 1 apresenta os efeitos da temperatura e do tempo de residência nos rendimentos da oxidação alcalina com nitrobenzeno e na razão S/G das amostras. O aldeído p-hidroxibenzaldeído, derivado da lignina H, não foi detectado em nenhuma das amostras. As baixas concentrações de ácidos vanílico e siríngico foram desconsideradas no cálculo do rendimento e da razão S/G. Esta razão foi determinada pela proporção entre siringaldeído (lignina S) e vanilina (lignina G). O maior rendimento para madeira ocorreu a 170 °C por 2,5 h, conforme Min et al. (2015). Para a lignina kraft, o melhor rendimento foi a 190 °C por 2,5 h.

Tabela 1. Rendimentos de oxidação alcalina com nitrobenzeno e a relação S/G

Amostra	Temp., ^{0}C	Tempo, h	Rendimento, %	Relação

				S/G
Madeira de eucalipto	170	1,5	46,3	3,2
		2,5	50,8	3,4
		4	48,7	3,3
	180	1,5	40,2	3,6
		2,5	44,0	3,4
		4	45,2	3,5
	190	1,5	47,3	3,5
		2,5	48,9	3,6
		4	43,6	3,5
Lignina Kraft de eucalipto	170	1,5	10,2	3,0
		2,5	13,1	2,4
		4	12,5	2,8
	180	1,5	9,9	3,0
		2,5	10,9	3,0
		4	10,4	2,9
	190	1,5	10,9	2,9
		2,5	13,3	3,0
		4	11,2	2,7

A técnica de pirólise acoplada à cromatografia gasosa e à espectrometria de massas (PI-CG/EM) tem sido usada para determinar a relação S/G da lignina (Barbosa et al., 2008; Fernández-Rodríguez et al., 2020; Silva et al., 2020). Devido ao baixo rendimento na oxidação com nitrobenzeno, aplicou-se a PI-CG/EM para a amostra de lignina. A relação H/G/S foi calculada com base na área percentual dos picos derivados de cada monômero. As áreas obtidas foram 1,33% (H), 22,06% (G) e 56,06% (S), resultando em uma relação S/G de 2,5. Esse valor foi menor que o obtido na oxidação (S/G = 3,0). A diferença é atribuída à desmetoxilação promovida pela pirólise (Lopes et al., 2011).

Devido à divergência entre as técnicas de oxidação com nitrobenzeno e PI-CG/MS quanto à lignina H, utilizou-se a ressonância magnética nuclear bidimensional (RMN 2D) do tipo HSQC (13C-1H). Essa técnica é amplamente aplicada na elucidação estrutural de ligninas (Fernandez-Costas et al., 2014; Crestini et al., 2017). A estrutura p-hidroxifenil (lignina H) foi identificada pelos deslocamentos químicos δC/δH 130,5/7,4 e 128,9/7,1, ausentes na lignina Kraft (figura 1). As unidades S apareceram em δC/δH 104,6/7,06 e 103,4/6,62. Unidades S oxidadas surgiram em δC/δH entre 104,7/7,01 e 109,4/7,15. Já as unidades G mostraram correlações em δC/δH 120,1/6,65; 119,2/6,65; 115,2/6,76 e 111,9/6,74.

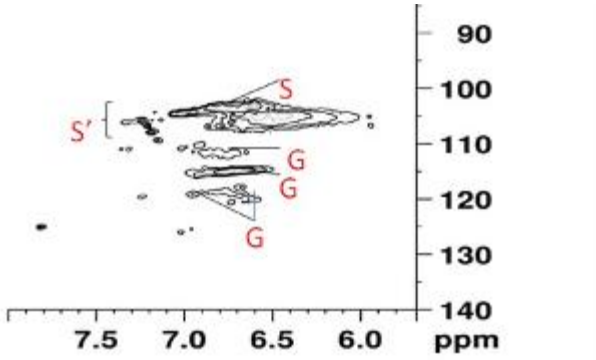


Figura 1. Região aromática no espectro RMN 2D HSQC.

4. Conclusões

Os resultados indicam que o rendimento de extração depende das condições da oxidação. Para madeira e lignina Kraft, os maiores rendimentos foram a 170 °C e 190 °C por 2,5h, respectivamente.

A presença da unidade H na amostra de lignina Kraft foi observado pela técnica de PI-CG/EM porém não foi observada com a oxidação com nitrobenzeno, confirmada pela técnica não destrutiva RMN 2D. Isso indica que a pirólise pode degradar as unidades G e S da lignina e produzir a unidade H, mostrando que a técnica de pirolise deve ser usada com cautela uma vez que pode gerar resultados errôneas para a caracterização química da lignina.

5. Agradecimentos

Os autores agradecem o financiamento do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior e da Fundação de Amparo à Pesquisa no Estado do Rio de Janeiro (FAPERJ).

6. Referências bibliográficas

1. Silvério, F. O., Barbosa, L. C., Maltha, C. R., Fidêncio, P. H., Cruz, M. P., Veloso, D. P., & Milanez, A. F. (2008). Effect of storage time on the composition and content of wood extractives in Eucalyptus cultivated in Brazil. Bioresource technology, 99(11), 4878-4886.

2. Sarkanen, K. V., Ludwig, C. H., & Lignins-Occurrence, F. (1971). Structure and Reactions. Wi1ey-Interscience, NY.

3. Collins, D. J., Pilotti, C. A., & Wallis, A. F. A. (1990). Correlation of chemical composition and kraft pulping properties of some Papua New Guinea reforestation woods.

4. Crestini, C., Lange, H., Sette, M., & Argyropoulos, D. S. (2017). On the structure of softwood kraft lignin. Green Chemistry, 19(17), 4104-4121.

5. Cruz, M. P., Barbosa, L. C., Maltha, C. R., Gomide, J. L., & Milanez, A. F. (2006). Caracterização química do" pitch" em indústria de celulose e papel de Eucalyptus. Química Nova, 29(3), 459-466.

6. del Río, J. C., Gutiérrez, A., Hernando, M., Landín, P., Romero, J., & Martínez, Á. T. (2005). Determining the influence of eucalypt lignin composition in paper pulp yield using Py-GC/MS. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 74(1-2), 110-115.

7. Lin, S. Y., & Dence, C. W. (Eds.). (2012). *Methods in lignin chemistry*. Springer Science & Business Media.

8. Min, D., Xiang, Z., Liu, J., Jameel, H., Chiang, V., Jin, Y., & Chang, H. M. (2015). Improved protocol for alkaline nitrobenzene oxidation of woody and non-woody biomass. *Journal of Wood Chemistry and Technology*, *35*(1), 52-61.

9. Fernández-Costas, C., Gouveia, S., Sanromán, M. A., & Moldes, D. (2014). Structural characterization of Kraft lignins from different spent cooking liquors by 1D and 2D Nuclear Magnetic Resonance spectroscopy. Biomass and Bioenergy, 63, 156-166.

10. Fernandez-Rodriguez, J., Erdocia, X., Hernandez-Ramos, F., Gordobil, O., Alriols, M. G., & Labidi, J. (2020). Direct lignin depolymerization process from sulfur-free black liquors. Fuel Processing Technology, 197, 106201.

11. Freudenberg, K., Lautsch, W., & Engler, K. (1940). Die bildung von vanillin aus fichtenlignin. Berichte der deutschen chemischen Gesellschaft (A and B Series), 73(3), 167-171.

12. IBÁ, 2025. Indústria Brasileira De Árvores. Relatório IBÁ 2025. Disponível e: IBA_relatorio_digital_POR.pdf

13. Katahira, R., & Nakatsubo, F. (2001). Determination of nitrobenzene oxidation products by GC and1H-NMR spectroscopy using 5-iodovanillin as a new internal standard. Journal of wood science, 47(5), 378-382.

14. Lapierre, C. (2010). Determining lignin structure by chemical degradations. Lignin and lignans: advances in chemistry, 11-48.

15. Lopes, F. J. F., Silvério, F. O., Baffa, D. C. F., Loureiro, M. E., & Barbosa, M. H. P. (2011). Determination of sugarcane bagasse lignin S/G/H ratio by pyrolysis GC/MS. Journal of Wood Chemistry and Technology, 31(4), 309-323.

16. Monties, B. (1991). Recent advances in structural and biosynthetic variability of lignins. Proc 6th Int Symp of Wood and Paper Chemistry, Melbourne, Australia, APPITA, 113– 123.

17. Rodrigues, J., Meier, D., Faix, O., & Pereira, H. (1999). Determination of tree to tree variation in syringyl/guaiacyl ratio of Eucalyptus globulus wood lignin by analytical pyrolysis. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 48(2), 121-128.

18. YZ, L. (1971). Lignins, occurrence, formation, structure and reactions. Lignins, 205.

19. da Silva, S. H. F., Gordobil, O., & Labidi, J. (2020). Organic acids as a greener alternative for the precipitation of hardwood kraft lignins from the industrial black liquor. International journal of biological macromolecules, 142, 583-591.

20. TAPPI. (2002). Technical Association of the Pulp and Paper Industry. Standard Method T 222 om 88 - Acid-insoluble lignin in wood and cellulose. Atlanta: Standard Method TAPPI.

21. TAPPI. (1991). Technical Association of the Pulp and Paper Industry. Standard Method UM 250: Acid-soluble lignin in wood and cellulose. Atlanta: Standard Method TAPPI.

22. TAPPI. (2002). Technical Association of Pulp and Paper Industry. Standard Method T 211 om93 - Ash in wood, pulp, paper and cardboard: combustion at 525°C. Atlanta: Standard Method TAPPI.

23. TAPPI. (2002). T. 222 om-02: Acid-insoluble lignin in wood and pulp. 2002–2003 TAPPI Test Methods.

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Otimização das condições de síntese de biocarvões ativados a partir de lignina kraft para remoção de ceftriaxona

Maria Paula França Martino[1]; Iara Fontes Demuner[1], Antonio Machado Netto[2]; Kleryton Luiz Alves de Oliveira[2]; Renata Pereira Lopes Moreira[2].

[1] Departamento de Engenharia Florestal, UFV
[2] Departamento de Química, UFV

Resumo: A subutilização da lignina kraft motiva sua valorização a partir da produção de materiais de valor agregado. Nesse sentido, a produção de biocarvões ativados para remoção de contaminantes emergentes, como os antibióticos, apresenta-se como uma alternativa relevante de aplicação. Portanto, objetivou-se determinar as condições ótimas das variáveis de entrada, tempo e temperatura de pirólise, para a síntese de biocarvão ativado de lignina kraft, empregando a metodologia de superfície de resposta, com ANOVA de 95% de significância, a partir de um delineamento central composto rotacional. Os biocarvões foram produzidos a partir de ativação química com cloreto de zinco e pirolisados sob diferentes condições. Esses materiais foram avaliados em relação à sua capacidade adsortiva, por ensaios em batelada de adsorção de ceftriaxona e quantificação UV-Vis. O modelo quadrático ajustado (R^2 = 90,79%; R^2 ajustado = 81,57%) mostrou que apenas a variável temperatura foi significativa, com comportamento parabólico e ponto ótimo em 623,3 °C. A variável tempo não apresentou significância estatística sobre a variável resposta, e portanto ajustou-se o uso do menor tempo testado (45 min), garantindo economia energética sem prejuízo à adsorção.
Palavras-chave: Biocarvão; Adsorção; Pirólise

Optimization of synthesis conditions for activated biochars from kraft lignin for ceftriaxone removal

Abstract: The underutilization of kraft lignin drives efforts to valorize it through the production of value-added materials. In this context, producing activated biochars for the removal of emerging contaminants—such as antibiotics—represents a significant application alternative. Therefore, this study aimed to determine the optimal conditions for the input variables (pyrolysis time and temperature) for synthesizing activated biochar from kraft lignin, using response surface methodology with a rotatable central composite design and ANOVA at a 95% significance level. The biochars were produced via chemical activation with zinc chloride and pyrolyzed under various conditions. These materials were evaluated for their adsorption capacity through batch adsorption tests using ceftriaxone, with quantification performed via UV-Vis spectroscopy. The fitted quadratic model (R^2 = 90.79%; adjusted R^2 = 81.57%) revealed that only the temperature variable was significant, exhibiting parabolic behavior with an optimum point at 623.3 °C. The time variable showed no statistical significance regarding the response variable; consequently, the shortest time tested (45 min) was selected, ensuring energy savings without compromising adsorption performance.
Keywords: Biochar; Adsorption; Pyrolysis

1. Introdução

A lignina é o segundo polímero natural mais abundante do mundo, seguida apenas da celulose (SHOREY et. al, 2024). Possui grande potencial de geração de diversos bioprodutos de alto valor agregado devido às propriedades como alto teor de carbono, biodegrabilidade e por apresentar baixo custo (LIU et al., 2020). No entanto, vem sendo subutilizada, de forma que, de 70 milhões de toneladas que são produzidas anualmente pelo setor de celulose e papel, apenas 5% é direcionado para novas rotas de produção (TAN et al., 2021).

Diante deste impasse, tem sido crescente o interesse em pesquisas acerca da biorrefinaria da lignina. Uma das possíveis rotas de aplicação é a produção de biocarvão (BC) ativado, que pode ser empregado em diversas frentes, destacando-se a adsorção de poluentes (CARROT & CARROT, 2007; CHEN et al., 2022). Uma categoria importante são os micropoluentes emergentes, que, apesar de presentes em baixas concentrações, são persistentes no meio ambiente. Dentro dessa categoria estão os antibióticos, que podem contaminar corpos d'água e a fauna ali presente (JIANG et al., 2013). Além disso, sua presença no ambiente pode levar à indução de resistência microbiana, gerando distúrbios ambientais (GRENNI et al., 2018).

Um dos antibióticos mais utilizados é a ceftriaxona, uma cefalosporina de terceira geração, de amplo espectro, indicada para tratamento de infecções em geral (ALIBRAHIM, 2023). A organização de sua estrutura molecular faz com que seja persistente no meio ambiente, tornando-a potencialmente perigosa (BADI et al., 2018).

Dessa forma, a utilização de um BC produzido a partir de lignina para remoção de ceftriaxona torna-se uma tentativa sustentável para solução do problema apresentado. Para otimizar sua síntese, pode-se variar parâmetros de produção como tempo e temperatura de pirólise e avaliar sua influência sobre as propriedades dos materiais produzidos. Nesse sentido, métodos como o Delineamento Central Composto Rotacional (DCCR) e a Metodologia de Superfície de Resposta (MSR) tornam-se interessantes, uma vez que ao empregá-los, possibilita-se redução no número de experimentos e avaliação da interação entre as variáveis escolhidas para análise estatística (NETTO et al., 2025).

Diante do exposto, objetiva-se a partir do presente trabalho determinar o tempo e a temperatura ótimos para síntese do BC ativado de lignina kraft para adsorção de ceftriaxona, através do DCCR e MSR.

2. Material e métodos

a. Padrões, reagentes e matéria-prima

Os reagentes de grau analítico utilizados foram ácido clorídrico 37% (CAS 7647- 01-0, Alphatec), hidróxido de sódio 99,7% (CAS 1310-73-2, VETEC), cloreto de zinco 98% (CAS 7646-85-) e ceftriaxona sódica 89,1% (CAS 104376-79-6, Sigma-Aldrich). Água destilada foi usada no preparo das soluções. A lignina kraft foi fornecida por uma empresa brasileira de celulose e papel, já caracterizada em DEMUNER et al. (2021).

1.1. Síntese dos biocarvões

Para síntese dos biocarvões, foi empregada a MRS por meio de um DCCR (Tabela 1), através do software *Minitab 18 Student*. As variáveis de entrada serão o (1) tempo (45 a 75 min) e (2) temperatura de pirólise (400 a 700 °C), e a resposta avaliada para otimização foi a capacidade adsortiva. O delineamento experimental é apresentado abaixo, contendo 4 pontos fatoriais, 4 axiais e 3 repetições do central. Após a realização da análise estatística, obtiveram-se os parâmetros de síntese para o biocarvão otimizado (BCO), e foi realizada a previsão da capacidade adsortiva esperada desse material.

Tabela 1 – Delineamento Composto Central Rotacional obtido para síntese dos BCs

Ordem padrão	Temperatura (°C)	Tempo de residência (min)
1	700,00	60,00
2	550,00	60,00
3	400,00	60,00
4	550,00	60,00
5	443,934	49,39
6	656,066	49,39
7	550,00	60,00
8	443,934	70,61

9	550,00	75,00
10	656,066	70,61
11	550,00	45,00

Fonte: (Autora)

A ativação química foi feita com cloreto de zinco ($ZnCl_2$) na razão mássica 3:1 (massa de ativante/massa de lignina). Em seguida, a mistura foi seca em estufa a 105 °C por 48 h. Após isso, o material foi pirolisado em reator de pirólise (forno mufla) com termopar, no respectivos tempo e temperatura de cada tratamento (Tabela 1), com taxa de aquecimento média de 10 °C min^{-1}. Após o resfriamento do reator, o BC foi coletado e encaminhado para a etapa de lavagem.

Os biocarvões foram lavados em duas etapas. Primeiro, foram colocados em solução de HCl (0,1 mol L^{-1}) durante 1 hora. Em seguida, foram lavados com água destilada à 70 °C e passaram pelo processo de filtração a vácuo até atingir pH próximo da neutralidade, conforme adaptado de Reddy et al., (2022). Posteriormente, foram colocados para secagem em estufa por 24 h a 105 °C, e foi feita a uniformidade granulométrica a partir do peneiramento em peneira de 32 *mesh*.

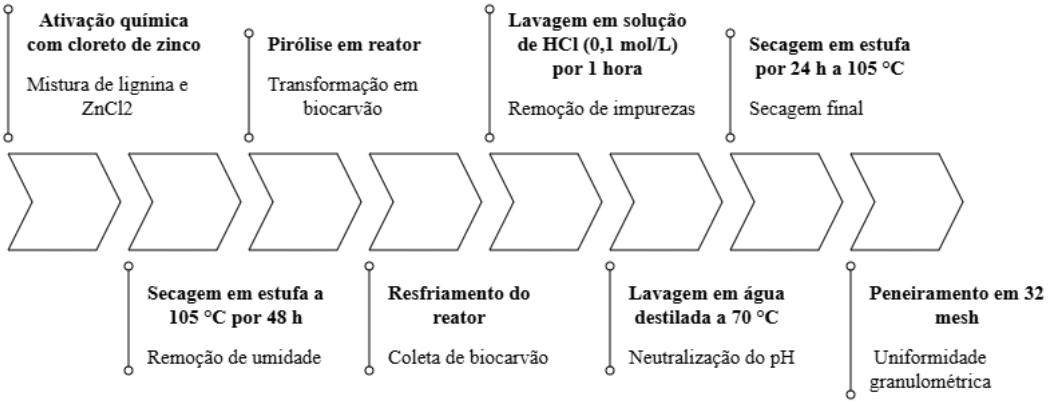


Figura 1 – Diagrama esquemático da síntese dos biocarvões (Fonte: Autora)

O rendimento dos biocarvões foi determinado segundo a Equação 1, em que: R é o rendimento (%); é a massa do material produzido (g); mL é a massa da lignina kraft (g).

$$R(\%) = \left(\frac{m_P}{m_L}\right) \times 100 \qquad \text{(Eq. 1)}$$

1.1. Ensaios de adsorção

O método para a adsorção do fármaco foi realizada de forma adaptada a explicitada por Netto et al. (2026). Para realização dos ensaios de adsorção, foram adicionados em frascos Erlenmeyer 10,0 mL de solução de CEF a 100 mg L^{-1}, com 10 mg de cada BC sintetizado. O sistema foi agitado a 180 rpm em temperatura ambiente (~25 °C) por 1440 minutos, seguido por centrifugação (4000 rpm), retirada do sobrenadante e quantificação da concentração de CEF no equilíbrio por UV-Vis. Os ensaios foram feitos em triplicata para cada BC.

A partir dos resultados de absorbância obtidos no pico de 240 nm, calculou-se a concentração final de CEF no meio aquoso, em mg L^{-1} (Equação 2), e a capacidade de adsorção em mg g^{-1} (Equação 3), em que $\boldsymbol{C}$ é a concentração da solução (mg L^{-1}) no equilíbrio, $\boldsymbol{A_f}$ é a absorbância final obtida em UV-Vis, $\boldsymbol{A_B}$ é a absorbância final do branco (testemunha), $\boldsymbol{q}$ é a capacidade adsortiva (mg g^{-1}); $\boldsymbol{V}$ é o volume de solução (mL), $\boldsymbol{C_{in}}$ é a concentração inicial da solução (mg L^{-1}).

$$C = \frac{(A_f \times 100)}{A_B} \qquad \text{(Eq. 2)}$$

$$q = \left(\frac{VC_{¿} - VC}{m_{ads}}\right) \qquad \text{(Eq. 3)}$$

A partir dos valores de $\boldsymbol{q}$ obtidos, foram calculadas as médias entre as triplicatas para cada BC, que foram inseridos no software *Minitab 18* para obtenção da equação quadrática ajustada que relaciona as variáveis tempo e temperatura.

1.2. Análise estatística

Para avaliação dos resultados, foi feito análise de variância (ANOVA) de dois fatores com replicação ($p \leq 0,05$). Avaliou-se também o coeficiente de determinação (R^2) e o R^2 ajustado da equação gerada através do software.

3. Resultados e discussão

A Tabela 2 apresenta os valores da média da capacidade adsortiva $\boldsymbol{q}$ e rendimento encontrados para cada BC sintetizado.

Tabela 2 – Valores de rendimento e de *q* para cada BC

Biocarvão (BC)	Rendimento (%)	$\boldsymbol{q}$ médio (mg/g)

1	51,00	81,0573
2	54,85	88,7828
3	61,06	16,3068
4	41,95	97,3334
5	62,74	62,4884
6	50,64	96,2152
7	58,04	98,4276
8	59,04	91,9113
9	55,98	96,3451
10	50,61	78,8467
11	54,73	95,2826

Fonte: (Autora)

A média dos rendimentos de síntese dos BCs foi de 54,60% em relação à quantidade de biomassa inicial, de forma que para cada 10 g, aproximadamente, de biomassa, foram produzidos em média 5,4 g de BC. Sarve et al. (2022) obtiveram um resultado semelhante, de 53,0% de rendimento, utilizando também a mesma massa inicial de 10 g de lignina. Li et al. (2024), testando diferentes proporções de celulose/lignina para síntese de BCs, obtiveram um rendimento de 54,24% em peso a 800 °C, sintetizando um BC com 100% de lignina, a um tempo de residência de 17,5 minutos.

Observa-se que o BC que apresentou menor valor de *q* foi o de n° 3, produzido sob condições de tempo e temperatura de 400 °C e 60 minutos, respectivamente. Já os de maiores valores de *q* foram aqueles produzidos em temperaturas mais elevadas, tais como os carvões 6, 7, 9 e 11. Estes padrões condizem com a literatura, uma vez que maiores temperaturas de pirólise tendem a gerar maior volume de poros, colaborando para o aumento da área superficial, e por consequência, aumento da capacidade adsortiva. Temperaturas mais baixas frequentemente estão associadas a um fornecimento de energia não satisfatório para o desenvolvimento dos poros (FU et al., 2020; PUTRANTO et al., 2022).

A validade do modelo previsto foi analisada a partir dos gráficos da Figura 2. O gráfico de probabilidade normal (Figura 2a) indica que os resíduos se aproximam de uma distribuição normal, enquanto o gráfico de resíduos versus valores ajustados (Figura 2b) exibe pontos aleatoriamente distribuídos em torno da linha zero, sem padrões discerníveis (NETTO et al., 2025). Complementarmente, o histograma (Figura 2c) mostra simetria em relação ao zero e o gráfico de resíduos versus ordem de observação (Figura 2d) sugere a independência dos resíduos pela ausência de tendências ascendentes ou descendentes (MANMEEN et al., 2023). Tais padrões indicando a eficiência do modelo previsto para o processo.

A equação de regressão ajustada a partir dos dados é representada na Equação 4.

$$q = -703 + 2{,}654\,T + 0{,}62\,t - 0{,}001859\,T^2 + 0{,}0312\,t^2 - Tt \qquad \text{(Eq. 4)}$$

Em que ***T*** é a temperatura (°C), ***t*** é o tempo (min) e ***q*** é a capacidade de adsorção (mg/g).

Com o ajuste da equação, obteve-se valores de R^2 e R^2 ajustado de 90,79% e 81,57%, respectivamente, que indicam significância entre os valores observados e previstos da variável capacidade de adsorção. Além disso, a análise de variância está apresentada na Tabela 3.

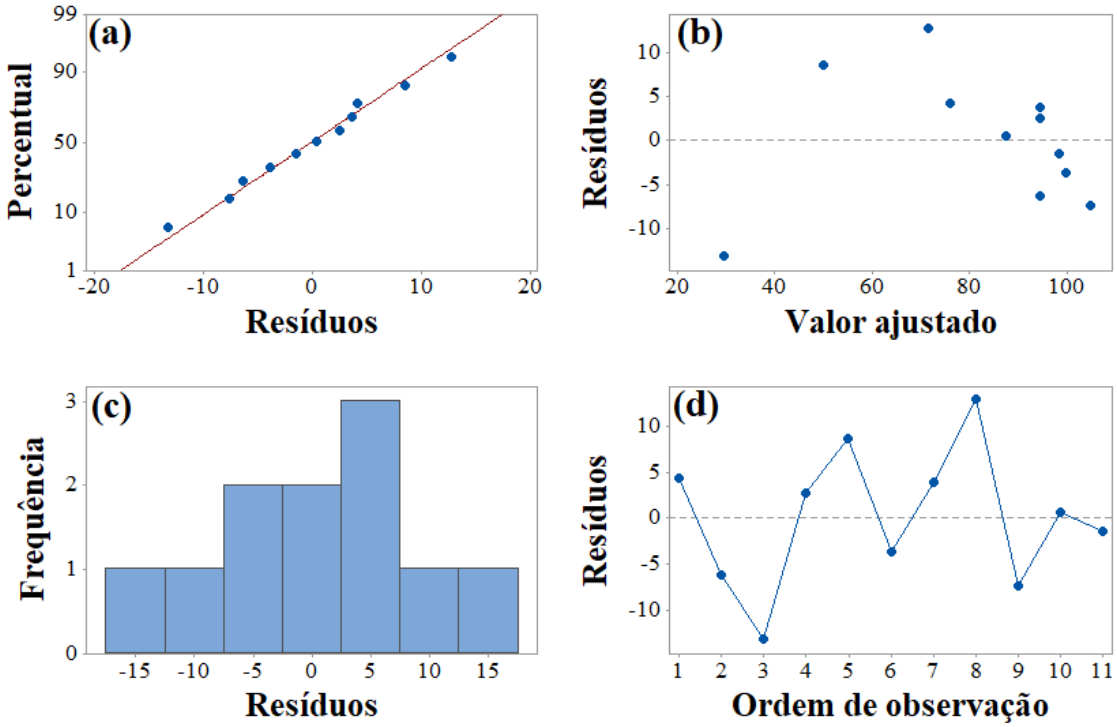


Figura 2 – Gráficos de resíduos do modelo de superfície de resposta estabelecido através dos resultados de capacidade de adsorção (mg/g) (a) Probabilidade normal; (b) Versus ajustados; (c) Histograma; (d) Versus ordem.

(Fonte: Autora)

Tabela 3 – Valores-P obtidos para cada variável relacionada na Equação 3 (Fonte: Autora)

Fonte de variação	GL	SQ Ajust.	QM Ajust.	Valor F	Valor-P
Modelo	5	5541,38	1108,28	9,85	0,013
Linear	2	2204,46	1102,230	9,8	0,019
Temperatura	1	2164,11	2164,110	19,24	0,007
Tempo	1	40,35	40,350	0,36	0,575
Quadrático	2	3047,74	1523,870	13,55	0,010
Temperatura×Temperatura	1	2470,3	2470,300	21,96	0,005

Tempo×Tempo	1	69,7	69,700	0,62	0,467
Interação de 2 fatores	1	289,19	289,190	2,57	0,170
Temperatura×Tempo	1	289,19	289,1900	2,57	0,170
Erro	5	562,45	112,4900		
Falta de ajuste	3	502,15	167,3800	5,55	0,1560
Erro puro	2	60,3	30,15		
Total	10	**6103,84**			

As variações na capacidade adsortiva em relação ao tempo e à temperatura de pirólise, no gráfico de superfície de resposta podem ser observadas na Figura 3. Através da Tabela 3, denota-se que a variável tempo não apresentou significância estatística sobre a capacidade de adsorção dos BCs, de forma que determinou-se a utilização do tempo mínimo de 45 minutos para produção do BCO. Ademais, a temperatura de pirólise, variável significativa, apresentou um comportamento de uma parábola com concavidade para baixo, com ponto máximo na temperatura de 623,3 °C.

A literatura aponta que condições de altas temperaturas não requerem tempos mais estendidos para síntese de BCs de qualidade. Contudo, um aumento drástico na temperatura não resulta significamente em desenvolvimento de poros mais eficiente, podendo ocasionar danos à estrutura microporosa (AL-GHURABI et al., 2025). Isso se confirma com os resultados obtidos, uma vez que a temperatura ótima encontrada de 623,3 °C está ainda abaixo da temperatura de síntese do BC1, que é de 700 °C.

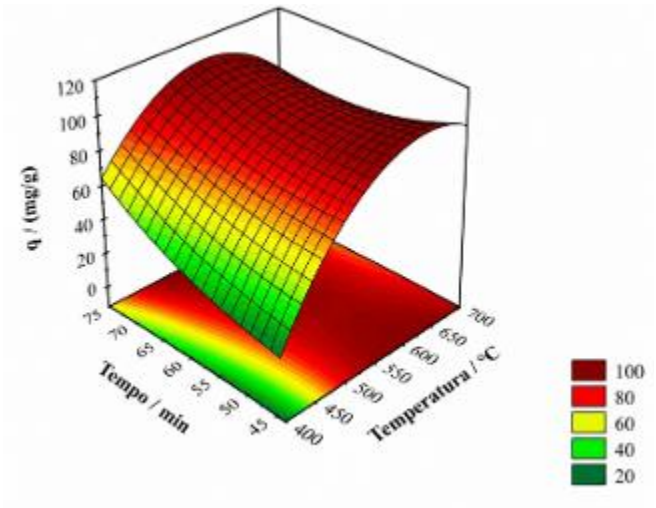


Figura 3 – Gráficos da superfície de resposta relacionando o tempo e temperatura de pirólise com a resposta encontrada na capacidade adsortiva (Fonte: Autora)

Com os parâmetros de síntese definidos será possível realizar a produção do BCO, o qual apresenta capacidade adsortiva esperada de 108,24 mg/g, calculado a partir da equação estabelecida pelo modelo. Apresentando um valor superior a todos obtidos pelos 11 BCs do DCCR, denotando assim o processo de maximização da variável resposta.

4. Conclusões

Conclui-se que apenas a temperatura foi significativa na síntese dos biocarvões, apresentando um valor de 623,33 °C. Não sendo o tempo significativo, recomenda-se o menor tempo de residência utilizado no experimento, sendo este 45 minutos, para síntese do biocarvão otimizado, garantindo economia de energia e redução de custos.

5. Agradecimentos

Os autores agradecem ao Laboratório de Nanomateriais e Química Ambiental (LANAQUA), da Universidade Federal de Viçosa (UFV), por oferecer a estrutura necessária para realização deste trabalho, e à FAPEMIG pelo apoio financeiro. Agradecem também ao Laboratório de Painéis e Energia da Madeira (LAPEM) e ao Departamento de Engenharia Florestal (DEF) da UFV pelo suporte concedido.

6. Referências bibliográficas

Shorey, R., Salaghi, A., Fatehi, P., & Mekonnen, T. H. (2024). Valorization of lignin for advanced material applications: a review. RSC Sustainability, 2(4), 804–831. https://doi.org/10.1039/D3SU00401

Liu, S., Wei, W., Wu, S., & Zhang, F. (2020). Preparation of hierarchical porous activated carbons from different industrial lignin for highly efficient adsorption performance. Journal of Porous Materials, 27(5), 1523–1533. https://doi.org/10.1007/s10934-020-00926-9

Tan, Y., Wang, X., Xiong, F., Ding, J., Qing, Y., & Wu, Y. (2021). Preparation of lignin-based porous carbon as an efficient absorbent for the removal of methylene blue. Industrial Crops and Products, 171, 113980. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2021.113980

Suhas, Carrott, P. J. M., & Ribeiro Carrott, M. M. L. (2007). Lignin – from natural adsorbent to activated carbon: A review. Bioresource Technology, 98(12), 2301–2312. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2006.08.008

Chen, K., He, Z. J., Liu, Z. H., Ragauskas, A. J., Li, B. Z., & Yuan, Y. J. (2022). Emerging Modification Technologies of Lignin-based Activated Carbon toward Advanced Applications. ChemSusChem, 15(21). https://doi.org/10.1002/cssc.202201284

Jiang, J.-Q., Zhou, Z., & Sharma, V. K. (2013). Occurrence, transportation, monitoring and treatment of emerging micro-pollutants in waste water — A review from global views. Microchemical Journal, 110, 292–300. https://doi.org/10.1016/j.microc.2013.04.014
Grenni, P., Ancona, V., & Barra Caracciolo, A. (2018). Ecological effects of antibiotics on natural ecosystems: A review. Microchemical Journal, 136, 25–39. https://doi.org/10.1016/j.microc.2017.02.006

Alibrahim, K. A. (2023). Enhanced adsorption of ceftriaxone antibiotics from water by activated carbon derived from agriculture products waste. Journal of Molecular Recognition, 36(7). https://doi.org/10.1002/jmr.3016

Mojtaba Yegane Badi, Azari, A., Mahdi Farzadkia, & Esrafili, A. (2018). Modification of activated carbon with magnetic Fe 3 O 4 nanoparticle composite for removal of ceftriaxone from aquatic solutions. 261, 146–154. https://doi.org/10.1016/j.molliq.2018.04.019

Netto, A. M., Ferreira, P. R., Monteiro, K. A., de, S., Jodieh O. S. Varejão, Vinicius, E., Renato, N. S., & Renata. (2025). Optimization of Biochar Synthesis from Cosmetic Industry Sludge for Enhanced Removal of Enrofloxacin. Journal of the Brazilian Chemical Society. https://doi.org/10.21577/0103-5053.20250097

Demuner, I. F., Borges Gomes, F. J., Gomes, J. S., Coura, M. R., Borges, F. P., Macedo Ladeira Carvalho, A. M., & Silva, C. M. (2021). Improving kraft pulp mill sustainability by lignosulfonates production from processes residues. Journal of Cleaner Production, *317*, 128286. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128286

Reddy, B. S., Reddy, N. S., Nam, S.-Y., Ahn, H.-J., Ahn, J.-H., & Cho, K.-K. (2022). Potassium hydroxide activated carbon derived from albumen as an efficient sulfur host for room temperature sodium-sulfur batteries. *Journal of Energy Storage*, *45*, 103666. https://doi.org/10.1016/j.est.2021.103666

Sarve, D. T., Dutta, R., Rastogi, A., & Ekhe, J. D. (2022). Valorization of industrial waste lignin via pyrolysis in the presence of additives: Formation, characterization, and application of fuel valued bio-oil and activated char. Journal of the Indian Chemical Society, *99*(4), 100398. https://doi.org/10.1016/j.jics.2022.100398

Li, X., Cen, K., Wang, L., Jia, D., Zhu, X., & Chen, D. (2024). Co-pyrolysis of cellulose and lignin: Effects of pyrolysis temperature, residence time, and lignin percentage on the properties of biochar using response surface methodology. Industrial Crops and Products, 219, 119071–119071. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2024.119071

Fu, J., Zhang, J., Jin, C., Wang, Z., Wang, T., Cheng, X., & Ma, C. (2020). Effects of temperature, oxygen and steam on pore structure characteristics of coconut husk activated carbon powders prepared by one-step rapid pyrolysis activation process. Bioresource Technology, 310, 123413. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.123413

Putranto, A., Ng, Z. W., Hadibarata, T., Aziz, M., Yeo, J. Y. J., Ismadji, S., & Sunarso, J. (2022). Effects of pyrolysis temperature and impregnation ratio on adsorption kinetics and isotherm of methylene blue on corn cobs activated carbons. South African Journal of Chemical Engineering, 42, 91–97. https://doi.org/10.1016/j.sajce.2022.07.008

Ajchareeya Manmeen, Prawit Kongjan, Arkom Palamanit, & Rattana Jariyaboon. (2023). Biochar and pyrolysis liquid production from durian peel by using slow pyrolysis process: Regression analysis, characterization, and economic assessment. Industrial Crops and Products, 203, 117162–117162. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2023.117162

Al-Ghurabi, E. H., Boumaza, M. M., Al-Masry, W., & Asif, M. (2025). Optimizing the synthesis of nanoporous activated carbon from date-palm waste for enhanced CO2 capture. Scientific Reports, 15(1). https://doi.org/10.1038/s41598-025-00498-1

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Perfil Fitoquímico do Extrato Metanólico da Casca de *Anadenanthera colubrina* (Vell.) Brenan

Rafael Lucas Marassi[1]; Carlos Augusto Cardoso Fernandes[1]; Ana Helise Abreu Rodrigues da Silva[1]; Natália Dias de Souza[1]

[1] Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro

Resumo: *Anadenanthera colubrina* (Vell.) Brenan (angico-branco) é uma árvore nativa sulamericana amplamente empregada na medicina popular para o tratamento de inflamações, dores e infecções. Este estudo objetivou a caracterização fitoquímica do extrato metanólico da casca de *A. colubrina.* As cascas foram coletadas de indivíduos adultos em Mangaratiba (RJ), Brasil. As amostras foram moídas e submetidas a uma extração sequencial em aparelho Soxhlet utilizando solventes de polaridades crescentes: ciclohexano, acetato de etila e metanol. O rendimento total de extrativos foi de 33,07 %, destacando-se a fração metanólica com a maior proporção (21,54 %). A prospecção fitoquímica qualitativa do extrato metanólico revelou a presença de diversas classes de metabólitos secundários, incluindo fenóis, taninos condensados, flavonoides (antocianinas, leucoantocianidinas e catequinas), triterpenóides e saponinas. Os resultados comprovam que a casca dessa espécie constitui uma valiosa fonte de moléculas bioativas com elevado potencial para aplicações farmacológicas, industriais e biotecnológicas, promovendo assim a valorização sustentável dos recursos florestais.

Palavras-chave: Prospecção; Metabólitos Secundários; Medicina Popular

Phytochemical Profile of the Methanolic Extract from the Bark of *Anadenanthera colubrina* (Vell.) Brenan

Abstract: *Anadenanthera colubrina* (Vell.) Brenan (angico-branco) is a native south american tree widely employed in popular medicine for the treatment of inflammations, pains and infections. This study aimed at the phytochemical characterization of the methanolic extract from the *A. colubrina* bark. The barks were collected from adult individuals in Mangaratiba (RJ), Brazil. The samples were ground and submitted to a sequential extraction in a Soxhlet apparatus using solvents of increasing polarities: cycle-hexane, ethyl acetate and methanol. The total extractives yield was 33,07 %, with the methanolic fraction standing out with the higher proportion (21,54 %). The qualitative phytochemical prospection of the methanolic extract revealed the presence of various classes of secondary metabolites, including phenols, condensed tannins, flavonoids (anthocyanins, leucoanthocyanidins and catechins), triterpenoids and saponins. The results prove that the bark of this species constitutes a valuable source of bioactive molecules with elevated potential for pharmacological, industrial and biotechnological applications, thereby promoting the sustainable valorization of forest resources.

Keywords: Prospection; Secondary Metabolites; Popular Medicine

1. Introdução

A *Anadenanthera colubrina* (Vell.) Brenan, conhecida por angico-branco, é uma espécie arbórea nativa da flora brasileira, pertencente à família Fabaceae, com ampla distribuição nos biomas Caatinga, Cerrado e Mata Atlântica. (Morim, 2026)

Sua relevância no contexto econômico e social refere-se ao uso popular de diferentes partes da planta, sendo a madeira e a casca as principais, empregadas em diversas finalidades (Delices et al., 2022).

O conhecimento químico da casca do angico-branco é fundamental devido aos seus diversos usos na medicina popular para inflamações, feridas, doenças respiratórias, tosse, problemas nos rins e útero, gonorreia entre outros (Soldati, & de Albuquerque, 2010; Delices et al., 2022).

Estudar a composição química dos vegetais permite entender os mecanismos por trás das ações anti-inflamatórias, antimicrobianas e curativas dos extratos provenientes da *A. colubrina*. Além disso, a identificação e o estudo químico ajudam a validar e preservar o conhecimento tradicional, promovendo o uso sustentável da biodiversidade local e contribuindo para a conservação da espécie.

A composição química da casca de *A. colubrina* destaca-se pela sua diversidade, com uma vasta bioatividade, que se caracteriza pelas diferentes classes de compostos, os quais são detectados através dos ensaios de prospecção fitoquímica (Araújo et al., 2024).

A prospecção fitoquímica é o processo de identificar e analisar os compostos químicos presentes em plantas, que podem ter aplicações farmacológicas, agrícolas ou industriais (dos Santos, 2022).

Estudar a casca da espécie *Anadenanthera colubrina*, é de grande importância devido às suas propriedades únicas e potenciais para diversas aplicações. A prospecção fitoquímica é fundamental para explorar seu potencial econômico e ecológico.

O objetivo deste trabalho foi identificar os grupos de metabólitos secundários da casca de *Anadenanthera colubrina*, visando conhecer os seus principais componentes atribuindo assim um uso mais específico para esse espécime.

2. Material e métodos

2.1. Coleta das Amostras

As cascas de angico-branco (*Anadenanthera colubrina* (Vell.) Brenan) utilizadas nesta pesquisa foram coletadas em Mangaratiba, no estado do Rio de Janeiro (RJ), Brasil, localizada nas coordenadas 43° 59' 55.73" W e 22° 23' 56.74" S, a 1119 metros acima do nível do mar. As

amostras foram obtidas de um agrupamento de aproximadamente 10 indivíduos adultos, identificados por meio do mapeamento de coleta de sementes realizado pela equipe do Programa Replantando Vida da Companhia Estadual de Águas e Esgotos (CEDAE).

2.2. Preparo das Amostras

As cascas foram moídas no moinho tipo Willey. O material moído foi peneirado, sendo a fração retida na malha 60 mesh utilizada para o preparo das amostras.

2.3. Preparo dos Extrativos

A extração dos extrativos foi realizada com 10 g da casca homogeneizada, acondicionada em cartuchos de papel-filtro e submetida à extração sequencial em aparelho Soxhlet com ciclohexano, acetato de etila e metanol (250 mL de cada solvente), por 12 h para cada etapa. As análises foram realizadas em triplicata. Os solventes foram removidos em rotavapor sob pressão reduzida, e os extratos concentrados foram mantidos em capela até a completa evaporação do solvente. O teor de extrativos parciais foi determinado por gravimetria, conforme a Equação 1. O Teor de Extrativos Total é o somatório dos teores parciais de cada solvente (Ciclohexano, Acetato de Etila e Metanol).

$$TEp = \left(\frac{MFc - MFs}{MM} \right) \times 100$$

Equação 1. Onde: Tep = teor de extrativo parcial (%), MFc = massa do frasco com extrativo (g), MFs = massa do frasco sem extrativo (g), MM = massa de madeira no cartucho antes do processo de extração (g).

2.4. Prospecção fitoquímica

Para a realizar a prospecção fitoquímica de *A. colubrina*, foi selecionada a fração metanólica dos extrativos, que foi investigada através de ensaios qualitativos para a identificação das principais classes de metabólitos secundários utilizando a metodologia adaptada de Costa et al., (1995); Matos, F. J. de A. (1997); e Rodrigues et al., (2010). As análises foram conduzidas em duplicata. A investigação foi realizada por reações específicas para cada classe de compostos: fenóis e taninos (cloreto férrico); antocianinas, antocianidinas, flavonóides, leucoantocianidinas, catequinas e flavonas (testes de variação de pH); flavonóis, flavanonas, flavonóis e xantonas (reação de Shinoda); esteroides e triterpenoides (reação de

Liebermann-Burchard); saponinas (teste de formação de espuma) e alcalóides (reação com os reagentes de Mayer).

3. Resultados e discussão

A Figura 1 apresenta os teores de extratos obtidos no ciclo de extração para cada solvente utilizado para a casca de *A. colubrina*.

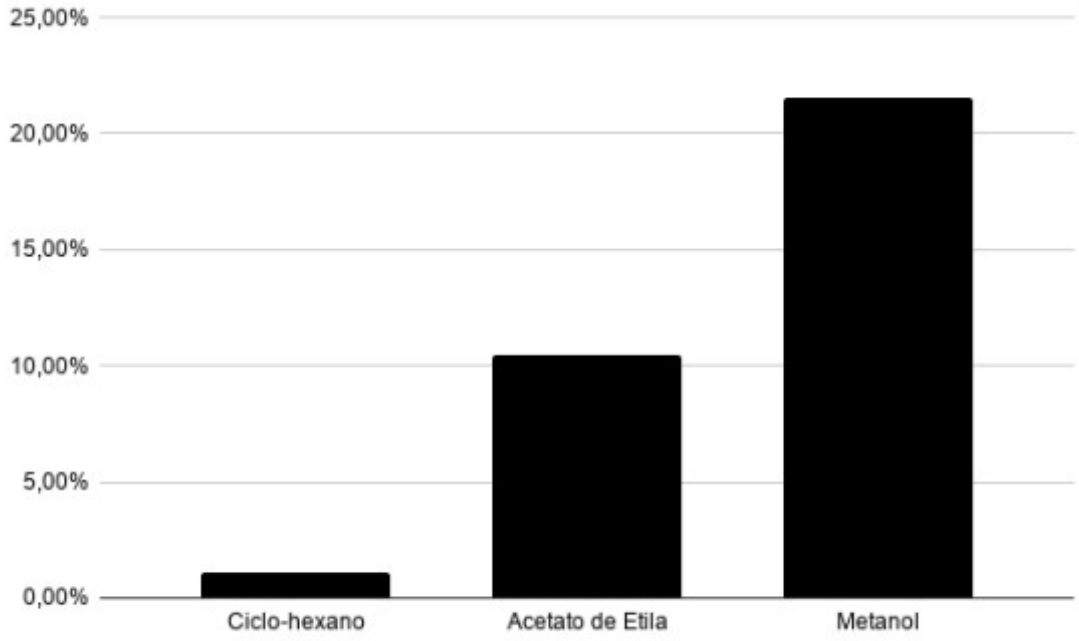


Figura 1 – Teores de extrativos da casca de *A. colubrina.*

A casca de *A. colubrina* apresentou como rendimento total de extrativos 33,07 %. (Tabela 1). Esse resultado aproxima-se ao relatado por Mota et al. (2017), que realizou a extração sequencial da casca da espécie, usando: diclorometano, etanol e água, e encontrou 29,3 % de extrativos totais.

O alto rendimento dos extrativos encontrados na casca, estão em concordância com os estudos de Warlo et al., (2023) e Neiva et al., (2018), que fizeram extrações da casca e da madeira, comparando os rendimentos, e verificaram uma maior proporção na casca.

Tabela 1 – Teores de extrativos obtidos da casca de *A. colubrina* por extração sequencial com solventes de polaridade crescente.

Solventes			
Ciclohexano (%)	Acetato de etila (%)	Metanol (%)	Total (%)
1,09	10,43	21,54	33.07

Observou-se um maior rendimento na fração metanólica (21,54 %), seguido pela fração de polaridade média (10,43 %), e por último com o menor rendimento, a fração apolar, com (1,09 %), (Tabela 1 e Figura 1).

Esses resultados, corroboram com os estudos de outros autores que fizeram extrações de outros espécimes vegetais usando solventes de diferentes polaridades, confirmando que a quantidade de extrativos nas plantas aumentam de acordo com a polaridade do solvente (Figura 1) (Baeshen et al., 2023; Jayashika, B. 2025).

A fim de identificar as principais classes de metabólitos presentes na casca de *A. colubrina* e ampliar o conhecimento sobre as suas possíveis aplicações foi realizada a prospecção fitoquímica (Tabela 2).

Tabela 2 – Perfil fitoquímico do extrato metanólico da casca de *A. colubrina.*

Constituintes	***A. colubrina***
Fenóis	+
Taninos condensados	+
Taninos pirogálicos	-
Antocianinas e Antocianidinas	+
Chalconas e Auronas	+
Flavonas	-
Leucoantocianidinas	+
Catequinas	+
Flavonóis, Flavanonas, Flavanonóis e Xantonas	+
Esteróides	-
Triterpenóides	+
Saponinas	+
Alcalóides	-

(+) presença do metabólito; (-) ausência do metabólito

A prospecção fitoquímica qualitativa do extrato metanólico da casca de *A. colubrina* revelou uma vasta e diversa composição. A análise detectou a presença de fenóis, taninos condensados, antocianinas, antocianidinas, chalconas, auronas, leucoantocianidinas,

catequinas, flavonóis, flavanonas, flavanonóis, xantonas, triterpenóides e saponinas (Tabela 2). O perfil identificado está de acordo com os rastreamentos efetuados por Delices et al., 2022 e de Araújo et al., 2024, onde encontraram: taninos, fenóis, flavonóides e saponinas.

Esses metabólitos resultantes alinham com a diversidade fitoquímica conhecida do gênero *Anadenanthera* (González et al., 2026). Os compostos encontrados, podem ser considerados bioativos, com uma vasta gama de atividades, entre elas: anti-inflamatórias, antimicrobianas, antifúngicas, antitussígenas e analgésicas (Baeshen et al., 2023; González et al., 2026).

4. Conclusões

Esta pesquisa demonstra que a casca de *A. colubrina,* a qual é amplamente usada por comunidades tradicionais, por seus efeitos fitoterápicos, representa um valioso recurso natural, com classes de compostos descobertas neste estudo (fenóis, taninos, antocianinas, antocianidinas, chalconas, auronas, leucoantocianidinas, catequinas, flavonóis, flavanonas, flavanonóis, xantonas, triterpenóides e saponinas), além de apresentar potencial para diferentes aplicações biotecnológicas e industriais, contribuindo para a valorização sustentável dos recursos florestais.

5. Agradecimentos

Os autores agradecem ao Laboratório de Química da Madeira (LQM) da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (UFRRJ), pelo apoio técnico e pela infraestrutura disponibilizada para a realização deste trabalho, à Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (UFRRJ) pelo suporte institucional e à Equipe do Programa Replantando Vida da Companhia Estadual de Águas e Esgotos (CEDAE) pela coleta do material de estudo.

6. Referências bibliográficas

Delices, M., Muller, J., Arunachalam, K., & De Oliveira Martins, D. T. (2022). *Anadenanthera colubrina* (Vell) Brenan: Ethnobotanical, phytochemical, pharmacological and toxicological aspects.. Journal of ethnopharmacology, 115745 . https://doi.org/10.1016/j.jep.2022.115745

Soldati, G., & De Albuquerque, U. P. (2010). Impact assessment of the harvest of a medicinal plant (*Anadenanthera colubrina* (Vell.) Brenan) by a rural semi-arid community (Pernambuco), northeastern Brazil. International Journal of Biodiversity Science, Ecosystem Services & Management, 6, 106 – 118. https://doi.org/10.1080/21513732.2011.565729

González, R. B., Ojeda, G., Miragliotta, A. M. G., Ricciardi, G. A., Carrera, I., Torres, A. M., & Dellacassa, E. (2026). Beyond a Psychotropic Plant: Exploring the Ethnomedicinal Value of *Anadenanthera colubrina* var. cebil.. Mini reviews in medicinal chemistry. https://doi.org/10.2174/0113895575418590260116110240

Araújo, A. A. B. de, Araújo, D. V. da C., Santos, H. L. da S., Almeida, É. R. de M., Henrique, J. de S., Santos, A. F. dos, Melo, N. C. de, Nascimento, E. B. de B., Castanha, E. R., & Correia, A. C. de C. (2024). Caracterização fitoquímica e avaliação farmacológica do extrato hidroetanólico das cascas de *Anadenanthera colubrina*. Em *Pesquisas e Debates sobre a Saúde Coletiva: Um Intercâmbio entre Brasil e Portugal* (Vol. 2, Cap. 98, pp. 919–930). Editora Omnis Scientia. https://doi.org/10.47094/978-65-6036-670-1/919-930

Jayashika, B. (2025). Solvent-Dependent Phytochemical Diversity in *Justicia tranquebariensis*: A Comparative Analysis of Methanol and Ethyl Acetate Extractions. *International Journal For Multidisciplinary Research*. https://doi.org/10.36948/ijfmr.2025.v07i03.43181

Baeshen, N., Almulaiky, Y. Q., Afifi, M., Al-Farga, A., Ali, H. A., Baeshen, N. N., Abomughaid, M., Abdelazim, A., & Baeshen, M. (2023). GC-MS Analysis of Bioactive Compounds Extracted from Plant *Rhazya stricta* Using Various Solvents. *Plants*, *12*. https://doi.org/10.3390/plants12040960

Mota, G. S., Sartori, C., Miranda, I., Quilhó, T., Mori, F., & Pereira, H. (2017). Bark anatomy, chemical composition and ethanol-water extract composition of *Anadenanthera peregrina* and *Anadenanthera colubrina*. PloS ONE, 12. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0189263

Costa, A. S. V. d., Pessanha, G. G., Carvalho, M. G. d., & Braz Filho, R. (1995). Identificação de substâncias secundárias presentes em leguminosas utilizadas como adubo verde. https://locus.ufv.br/items/cb5cfbed-748d-48b3-9e34-1bf01f51c651

Rodrigues, K. A. D. F., Dias, C. N., Florêncio, J. C., Vilanova, C. M., Gonçalves, J. D. R. S., & Coutinho-Moraes, D. F. (2010). Prospecção fitoquímica e atividade moluscicida de folhas de *Momordica charantia* L. *Cadernos de Pesquisa*, *17*(2). https://www.researchgate.net/publication/279437748_PROSPECCAO_FITOQUIMICA_E_ATIVIDADE_MOLUSCICIDA_DE_FOLHAS_DE_MOMORDICA_CHARANTIA_L
Matos, F. J. de A. (1997). Introdução à fitoquímica experimental (2ª ed.). EUFC. https://www.studocu.com/pt-br/u/4389632?sid=0d158492-df52-4e58-abad-d848734f27821783645112

Warlo, H., Windeisen-Holzhauser, E., Brüchert, F., Sauter, U. H., & Richter, K. (2023). Extractives in Douglas firs (Pseudotsuga menziesii (Mirb.) Franco) from three sites in south-west Germany and potential opportunities for valorization. European Journal of Wood and Wood Products, 1-16. https://doi.org/10.1007/s00107-023-01954-3

dos Santos, K. L. M. (2022). Caracterização fitoquímica e atividades biológicas do óleo essencial de *Piper aduncum* L. [Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação, Universidade

Federal de Pernambuco]. Repositório Institucional da UFPE. https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/51957

Morim, M. P. (2026). *Anadenanthera*. *In* Flora e Funga do Brasil. Jardim Botânico do Rio de Janeiro. https://floradobrasil.jbrj.gov.br/FB18071

Neiva, D., Araújo, S., Gominho, J., Carneiro, A., & Pereira, H. (2018). An integrated characterization of Picea abies industrial bark regarding chemical composition, thermal properties and polar extracts activity. PLoS ONE, 13. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0208270

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

PIRÓLISE EM DOIS ESTÁGIOS DA MADEIRA PARA OBTENÇÃO DE COMPOSTOS BIORREFINADOS

Êmilly Wakim de Almeida[1]; Ana Márcia Ladeira Macedo de Carvalho[1]; Angélica de Cássia O. Carneiro[1]; Iara Fontes Demuner[1]; Jamille Carvalho de Souza[1]; Ariane Mateus de Souza[1]; Camila Juliana Sampaio Pereira[1]; Amanda Ladeira Carvalho[1]

[1] Universidade Federal de Viçosa

Resumo: A pirólise em dois estágios de biomassa lignocelulósica é uma estratégia promissora para aumentar a seletividade dos compostos voláteis. Este estudo avaliou a eficiência desse processo na madeira de *Eucalyptus urophylla* quanto à seletividade dos compostos gerados, utilizando pirólise analítica acoplada à cromatografia gasosa e espectrometria de massas (Py-GC/MS). A pirólise direta foi conduzida a 550 °C, enquanto a pirólise em dois estágios utilizou 350 °C no primeiro estágio, seguida de 550 °C no segundo. Na pirólise direta, formaram-se compostos oxigenados de baixa complexidade estrutural e fenólicos. Na pirólise em dois estágios, observou-se fracionamento parcial das rotas de degradação, concentrando no primeiro estágio compostos ácidos e fenólicos provenientes da degradação das hemiceluloses e parte da lignina e, no segundo, compostos fenólicos e anidroaçúcares derivados da celulose e da lignina residual. Os resultados evidenciam o potencial da pirólise em duas etapas para a produção seletiva de químicos verdes de maior valor agregado.

Palavras-chave: Fracionamento térmico; compostos fenólicos; Levoglucosana; Biorrefinaria.

Two-Stage Pyrolysis of Wood for the Production of Green Chemicals

Abstract: Two-stage pyrolysis of lignocellulosic biomass is a promising strategy to enhance the selectivity of volatile compounds. This study evaluated the efficiency of this process in Eucalyptus urophylla wood regarding the selectivity of the compounds produced using analytical pyrolysis coupled with gas chromatography–mass spectrometry (Py-GC/MS). Direct pyrolysis was performed at 550 °C, whereas two-stage pyrolysis was carried out at 350 °C in the first stage, followed by 550 °C in the second stage. Direct pyrolysis resulted in the formation of low-structural-complexity oxygenated compounds and phenolic compounds. In contrast, two-stage pyrolysis promoted partial fractionation of the degradation pathways, concentrating acidic and phenolic compounds derived from the degradation of hemicelluloses and part of the lignin in the first stage, and phenolic compounds and anhydrosugars derived from cellulose and residual lignin in the second stage. These results demonstrate the potential of two-stage pyrolysis for the selective production of higher-value green chemicals.

Keywords: Thermal fractionation; phenolic compounds; levoglucosan; Biorefinery.

1. Introdução

A crescente necessidade de diversificar a matriz energética e expandir a produção de combustíveis renováveis e produtos químicos verdes tem estimulado o uso da biomassa como uma alternativa sustentável às fontes fósseis (Hu et al., 2023). Entre as biomassas lignocelulósicas disponíveis, a madeira de eucalipto destaca-se no contexto brasileiro devido à sua ampla base florestal plantada, estimada em 8,1 milhões de hectares (IBÁ, 2025). Além disso, a madeira de eucalipto apresenta elevado potencial para a obtenção de combustíveis renováveis e compostos químicos de alto valor agregado por meio de processos de conversão termoquímica, especialmente a pirólise (Bittencourt et al., 2024).

Entre as rotas de conversão termoquímica, a pirólise se destaca-se pela versatilidade e pela capacidade de converter biomassa lignocelulósica em frações sólida, líquida e gasosa, sendo uma tecnologia promissora para produção de bio-óleo e sua valorização em sistemas de biorrefinarias (Tawalbeh et al., 2021). Essa fração líquida apresenta potencial para a obtenção de combustíveis avançados e químicos plataforma, enquanto o biocarvão oferece aplicações energéticas, ambientais e agrícolas. Entretanto, o rendimento e a composição dessas frações são fortemente influenciados pelas condições operacionais do processo, como temperatura, tempo de residência, taxa de aquecimento e atmosfera reacional (Huang et al., 2025; Xu et al., 2025).

A pirólise da madeira é um processo complexo, resultante da decomposição térmica de seus três principais componentes estruturais: celulose, hemiceluloses e lignina. Em razão da distinta composição química e estabilidade térmica, esses componentes apresentam mecanismos distintos de degradação, envolvendo reações como desidratação, despolimerização e clivagem de ligações químicas, que ocorrem em faixas específicas de temperatura (Cai et al., 2019). De modo geral, as hemiceluloses se decompõem predominantemente entre 210 e 320 °C, a celulose entre 310 e 390 °C, enquanto a lignina apresenta degradação em uma faixa mais ampla, entre 160 e 900 °C com máxima taxa de degradação geralmente observada entre 315 a 400 °C (Yu et al., 2017).

Durante a pirólise, a celulose e as hemiceluloses tendem a formar predominantemente compostos oxigenados e solúveis em água, enquanto a lignina é a principal precursora de compostos aromáticos e fenólicos (Patwardhan; Brown; Shanks, 2011; Wang; Chang; Fan, 2010). Essas diferenças na estrutura química, na estabilidade térmica e na natureza dos produtos gerados durante a decomposição justificam o interesse em estratégias de pirólises capazes de modular a conversão da biomassa, com destaque para processos em múltiplos estágios, nos quais é possível favorecer a formação seletiva de compostos de alto valor agregado para a indústria química.

A aplicação da pirólise em dois estágios, mediante o controle das condições de temperatura em cada etapa, permite modular a decomposição dos componentes da biomassa lignocelulósica e, consequentemente, aumentar a seletividade e o rendimento de compostos químicos de interesse, especialmente compostos fenólicos, anidroaçúcares e outros químicos de plataforma, em comparação à pirólise convencional em um único estágio (Xu et al., 2025). Diante disso, este estudo teve como objetivo comparar a pirólise direta e a pirólise em dois estágios da madeira de *Eucalyptus urophylla*, avaliando seus efeitos sobre a composição química dos produtos formados, visando a produção seletiva de compostos químicos de maior valor agregado.

2. Material e métodos

2.1. Material

Foram utilizadas amostras de madeiras de *Eucalyptus Urophylla*, clone MN.463, provenientes de duas árvores. De cada árvore foram retirados discos de 6 cm de espessura nas posições correspondentes à base (0%), DAP, 25%, 50%, 75% e 100% da altura comercial, considerando-se um diâmetro comercial mínimo de 6 cm. A partir desses discos, foi preparada uma amostra composta, visando obter uma amostra representativa da madeira das árvores avaliadas. Os discos foram seccionados e transformados em serragem, utilizando-se um moinho do tipo Wiley. Após a moagem a amostra composta foi classificada com o auxílio de peneiras, sendo utilizada a fração granulométrica entre 40 e 60 mesh para a realização das análises físico-químicas. Posteriormente, as amostras foram armazenadas em sala climatizada, com umidade relativa de 60 % e temperatura de ±23 °C.

2.2. Análises Físico-químicas

Os teores de extrativos totais da madeira foram determinados de acordo com a norma TAPPI 204 cm-17 (TAPPI, 2017), utilizando-se uma mistura etanol:tolueno na proporção de 1:2 (v/v). A quantificação da porcentagem de materiais voláteis, cinzas e carbono fixo da madeira foi obtida segundo a ASTM D1762-84 (2021).

Para a realização da análise química estrutural, o teor absolutamente seco da madeira foi determinado conforme a norma TAPPI 264 cm-22 (TAPPI, 2022). Os teores de lignina solúvel e insolúvel em ácido foram determinados de acordo com as normas TAPPI UM 250 (TAPPI, 1991) e TAPPI T 222 om-21 (TAPPI, 2021), respectivamente. O teor de lignina total foi obtido

pela soma dos valores de lignina solúvel e insolúvel. Os teores de glicanas, xilanas, arabinanas, galactanas e mananas foram determinados conforme a norma SCAN-CM 71:09 (SCAN, 2009).

A relação siringila/guaiacila (S/G) da lignina foi determinada por oxidação com nitrobenzeno, conforme Goldschmid (1971) e Lin & Dence (1992). Amostras livres de extrativos (0,20 g) foram tratadas com 7 mL de NaOH 2 mol L^{-1} e 0,5 mL de nitrobenzeno em reator pressurizado, sendo a reação conduzida a 170 °C por 7 h e 20 min. Após a reação, os produtos da oxidação foram extraídos com clorofórmio, concentrados e redissolvidos em solução de acetonitrila:água (1:1, v/v). A identificação e quantificação dos produtos de degradação da lignina foram realizadas por HPLC com detector UV.

2.3. Pirólise analítica da madeira

Para os ensaios de pirólise analítica foram utilizados 0,300 ± 0,005 mg de madeira, em base seca, na granulometria entre 0.106–0.180 mm. As análises foram realizadas em pirolisador de micro - forno (Frontier Laboratories Ltd., Fukushima, Japão) acoplado a um cromatógrafo de gás com detector de massa (Shimadzu, modelo QP2020). Foi utilizada uma coluna capilar Ultra ALLOY® UA5 (, 30 m X 0,25 mm de diâmetro interno x 0,25 µm de espessura de película). A interface do sistema foi mantida a 300ºC durante todos os experimentos. Os ensaios foram conduzidos a uma taxa de aquecimento de 1.000 °C/s, utilizando hélio como gás de arraste, com fluxo constante de 1mL·min^{-1}.

O experimento foi conduzido em duas condições de pirólise, a pirólise direta e a pirólise em dois estágios. Na pirólise direta, a amostra foi submetida a uma única temperatura de pirólise, em um único estágio de aquecimento. Para essa condição, foi avaliada a temperatura de 550°C e tempo de residência de 30 segundos.

Na pirólise em dois estágios, a amostra foi inicialmente submetida a um primeiro estágio em temperatura mais baixa, seguido da pirólise do resíduo sólido remanescente em temperatura mais elevada. No primeiro estágio, foi avaliada a temperatura de 350 °C e tempo de residência de 30 segundos. Em seguida, o resíduo sólido obtido no primeiro estágio foi submetido ao segundo estágio de pirólise na temperatura de 550°C e tempo de residência de 30 segundos.

Os compostos voláteis liberados durante as pirólises foram identificados por comparação dos espectros de massa com as bibliotecas espectrais CG/EM (Willey e NIST). Os experimentos foram realizados em duplicada e, para a interpretação da composição química dos voláteis, foram considerados os 60 picos cromatográficos de maior área relativa. Em seguida, os compostos identificados foram agrupados em classes químicas, como ácidos, cetonas, álcoois,

furanos, fenóis, hidrocarbonetos e outras, de acordo com a sua estrutura química. Para as classes químicas, os resultados foram expressos em área relativa (%), calculada a partir da razão entre a soma dos compostos pertencentes a cada classe e a área cromatográfica total, permitindo avaliar a distribuição e a predominância das diferentes classes de compostos nos tratamentos analisados.

2.4. Delineamento experimental

O experimento foi conduzido em delineamento inteiramente casualizado, composto por dois tratamentos: pirólise direta (550 °C/30 s) e pirólise em dois estágios (350 °C/30 s, seguida de 550 °C/30 s), com duas repetições por tratamento. Para os compostos químicos identificados por pirólise acoplada à cromatografia gasosa e espectrometria de massas (Py-GC/MS), foi empregada a estatística descritiva, sendo apresentados os valores médios de área dos picos cromatográficos (%) e o respectivo desvio padrão.

3. Resultados e discussão

3.1. Caracterização da madeira

A caracterização físico-química da madeira é fundamental para compreender seu comportamento durante a degradação térmica e interpretar a distribuição dos produtos gerados durante a pirólise. A caracterização físico-química da madeira de *Eucalyptus urophylla* está apresentada na Tabela 1.

Tabela 1 – Caracterização da madeira de *Eucalyptus urophylla*

Propriedade		Valor (%)
Materiais voláteis		$84{,}51^{1{,}68}$
Carbono Fixo		$15{,}46^{1{,}69}$
Extrativos totais		$5{,}03^{0{,}41}$
Cinzas		$0{,}45^{0{,}21}$
Lignina	Insolúvel	$27{,}00^{0{,}22}$
	Solúvel	$3{,}62^{0{,}22}$
	Total	$30{,}62^{0{,}15}$
Relação S/G		$2{,}86^{0{,}21}$
Açúcares	Arabinanas	$0{,}35^{0{,}06}$
	Galactanas	$0{,}80^{0{,}00}$

Glicanas	$44{,}33^{0{,}28}$
Xilanas	$11{,}08^{0{,}67}$
Mananas	$0{,}95^{0{,}24}$

Onde: Os valores apresentados como sobrescritos correspondem ao desvio padrão.

A análise imediata mostrou baixo teor de carbono fixo e alto teor de materiais voláteis, indicando potencial da madeira para conversão termoquímica e produção de compostos voláteis com potencial para utilização como químicos verdes. O elevado teor de materiais voláteis reflete a predominância de constituintes que se decompõem durante a pirólise, principalmente celulose, hemiceluloses e lignina, originando voláteis ricos em diversos compostos químicos (Wang et al., 2017).

O teor de extrativos totais da madeira foi de 5,03%, valor compatível com a faixa reportada para clones de *Eucalyptus* sp. por Ramos et al. (2024), que observaram teores entre 2,1 e 8,8%, com maior concentração de valores entre 2 e 4 %. Na madeira de eucalipto, os extrativos são constituídos principalmente por ácidos graxos, fitoesteróis, compostos aromáticos e terpenos (Gominho; Lourenço; António Vélez Marques Pereira, 2020).

O baixo teor de cinzas da madeira é desejável para processos termoquímicos. A reduzida presença de minerais minimiza problemas operacionais, como incrustação e corrosão em equipamentos, além de reduzir possíveis efeitos catalíticos sobre reações secundárias, que podem alterar a distribuição e seletividades dos produtos da pirólise (Puri; Hu; Naterer, 2024).

A composição de carboidratos confirmou a predominância de glicanas e xilanas, com menores proporções de arabinanas, galactanas e mananas. Essa composição é particularmente relevante para a conversão termoquímica, uma vez que a decomposição da fração holocelulósica constitui a principal rota de formação de anidroaçúcares, furanos, aldeídos e cetonas (Liu et al., 2021). De modo geral, a degradação da glicanas está associada à formação de levoglucosana e outros anidroaçúcares, enquanto a decomposição dos outros açucares favorece a geração de ácido acético, furfural e compostos de menor massa molecular (Nguyen; Trinh, 2022).

A lignina apresenta elevada estabilidade térmica e se decompõe em uma ampla faixa de temperatura, contribuindo principalmente para a formação de compostos fenólicos durante a pirólise (Hu et al., 2025). Além disso, a relação siringila/guaiacila (S/G) evidencia a predominância de unidades siringil na lignina de madeiras de eucalipto, característica que

favorece a formação de compostos como siringol, moléculas de interesse para a produção de químicos renováveis e aplicações em biorrefinarias (Kawamoto, 2017).

3.2. Produtos voláteis da pirólise da madeira por Py-CG/MS

Os produtos voláteis da pirólise direta foram constituídos predominantemente por compostos fenólicos, seguidos por ácidos, cetonas, aldeídos e outros grupos químicos. Esses compostos foram formados a partir da degradação térmica dos principais constituintes da madeira, iniciando-se pela despolimerização dos polissacarídeos (hemiceluloses e celulose), que originou ácidos, compostos furânicos e anidroaçúcares, e pela clivagem das ligações éter da lignina, responsável pela formação de compostos fenólicos (Vilas-Boas et al., 2025). De forma geral, a sobreposição das faixas de degradação térmica dos principais constituintes da madeira favoreceu a formação simultânea de diferentes classes de compostos, resultando em uma fração volátil quimicamente complexa e de baixa seletividade, comportamento característico da pirólise direta de biomassas lignocelulósicas (Wang et al., 2022).

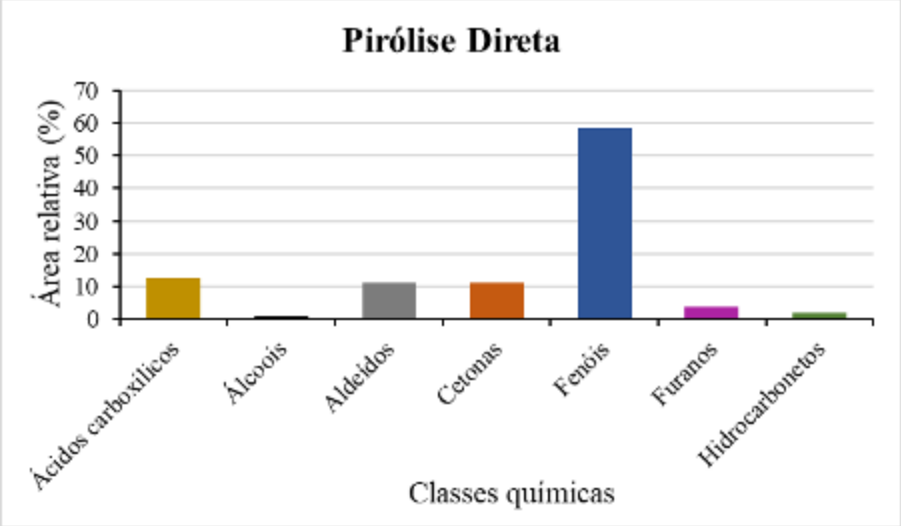


Figura 1 – Distribuição relativa das principais classes químicas dos voláteis obtidos na pirólise direta da madeira

Já a pirólise em dois estágios promoveu maior segregação dos produtos da decomposição dos principais constituintes da madeira. No primeiro estágio, observou-se que os compostos derivados da degradação das hemiceluloses se concentraram majoritariamente no primeiro estágio, com destaque para ácidos. Além disso, os compostos fenólicos constituíram a classe química predominante, refletindo a degradação da lignina mesmo sob temperaturas mais

baixas. No segundo estágio da pirólise os compostos fenólicos e anidroaçucares apresentaram elevada área relativa (95%). Esse comportamento esteve associado ao fracionamento térmico da madeira em dois estágios, no qual a degradação preferencial das hemiceluloses no primeiro estágio resultou no enriquecimento relativo de celulose e lignina no material remanescente.

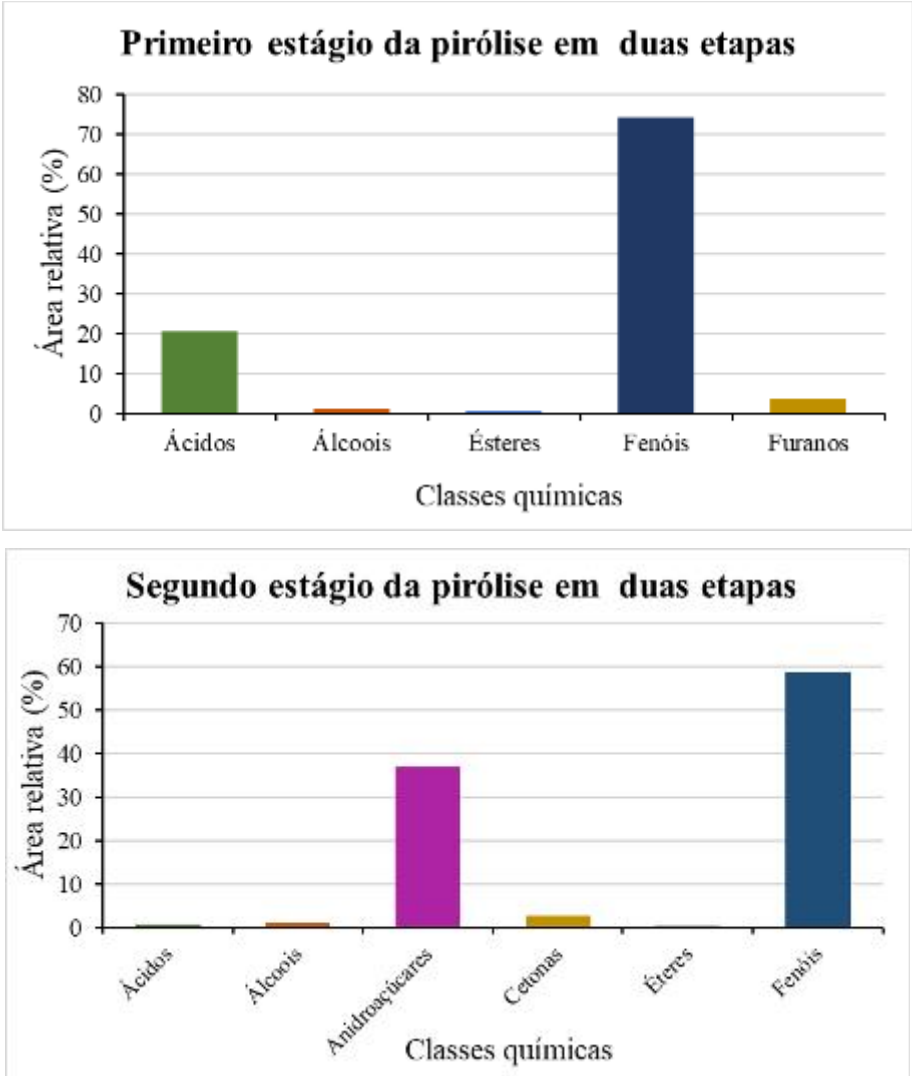


Figura 2 – Distribuição relativa das principais classes químicas dos voláteis obtidos na pirólise em duas etapas da madeira

Em conjunto, os resultados demonstraram que a pirólise em dois estágios modificou significativamente a distribuição temporal da degradação dos constituintes lignocelulósicos, reduzindo a sobreposição entre os produtos derivados das hemiceluloses, celulose e lignina. Como consequência, observou-se maior seletividade para classes específicas de compostos químicos em cada etapa do processo, evidenciando o potencial dessa estratégia para direcionar a

produção de químicos renováveis de maior valor agregado como levoglucosana e compostos fenólicos.

Embora a pirólise em dois estágios tenha demonstrado maior seletividade na obtenção de compostos de interesse, são necessários estudos em maior escala e sob diferentes condições operacionais para validar e otimizar o processo. Adicionalmente, recomenda-se avaliar a viabilidade técnica, econômica e ambiental da rota proposta, visando à produção de compostos químicos renováveis de maior valor agregado, como levoglucosana e compostos fenólicos.

4. Conclusões

A pirólise em dois estágios mostrou-se uma estratégia eficiente para controlar a distribuição dos produtos da conversão termoquímica da madeira de *Eucalyptus urophylla*, aumentando a seletividade para ácidos, fenóis e levoglucosana por meio do controle das condições operacionais. Esses resultados reforçam o potencial dessa tecnologia para a produção seletiva de químicos verdes e a valorização da madeira como matéria-prima para biorrefinarias.

5. Agradecimentos

Os autores agradecem ao Laboratório de Painéis e Energia da Madeira (LAPEM), ao Laboratório de Celulose e Papel (LCP), ao Departamento de Engenharia Florestal (DEF) e à Universidade Federal de Viçosa (UFV) pelo suporte técnico, infraestrutura e apoio institucional disponibilizados para a execução desta pesquisa. Agradecem, ainda, ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio financeiro concedido ao desenvolvimento deste trabalho.

6. Referências bibliográficas

Tawalbeh, M., Al-Othman, A., Salamah, T., Alkasrawi, M., Martis, R., & Abu El-Rub, Z. (2021). A critical review on metal-based catalysts used in the pyrolysis of lignocellulosic biomass materials. Journal of Environmental Management, 299, 113597. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.11359.

Bittencourt, R. de C., Guimarães, T., Costa, M. M. da, Silva, L. S., Barbosa, V. O. de P., Arêdes, S. C. de L., Alves, K. S., & Carvalho, A. M. M. L. (2024). Production of high-value green chemicals via catalytic fast pyrolysis of *Eucalyptus urograndis* forest residues. Sustainability, 16(19), 8294. https://doi.org/10.3390/su16198294

Cai, W., Liu, R., He, Y., Chai, M., Cai, J., & Chen, G. (2019). Py-GC/MS analysis on product distribution of two-staged biomass pyrolysis. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 138, 62–67. https://doi.org/10.1016/j.jaap.2019.01.009.

Goldschmid, O. (1971). Lignins: Occurrence, formation, structure and reactions. Wiley-Interscience.

Gominho, J., Lourenço, A., Marques, A. V., & Pereira, H. (2020). An extensive study on the chemical diversity of lipophilic extractives from Eucalyptus globulus wood. Phytochemistry, 180, 112520. https://doi.org/10.1016/j.phytochem.2020.112520

Hu, R., Wang, X., Zhang, Y., Li, Y., Wang, J., & Ma, L. (2023). Electrochemical biorefinery toward chemicals synthesis and bio-oil upgrading from lignin. Engineering, 27, 178–198. https://doi.org/10.1016/j.eng.2022.11.016.

Huang, X., Li, Y., Wang, Z., Zhang, H., Liu, J., & Wang, C. (2025). Efficient separation and extraction of guaiacol and its derivatives from bio-oils based on a heterogeneous extraction technique. Separation and Purification Technology, 356, 129739. https://doi.org/10.1016/j.seppur.2024.129739.

Kawamoto, H. (2017). Lignin pyrolysis reactions. Journal of Wood Science, 63(2), 117–132. https://doi.org/10.1007/s10086-016-1606-z

Nguyen, A. Q., & Trinh, L. T. P. (2022). Thermochemical conversion of cellulose and hemicellulose. In A. Basile, A. Dalena, & T. M. Tavares (Eds.), Biomass utilization: Conversion strategies (pp. 107–131). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-69103-4_5.

Patwardhan, P. R., Brown, R. C., & Shanks, B. H. (2011). Product distribution from the fast pyrolysis of hemicellulose. ChemSusChem, 4(5), 636–643. https://doi.org/10.1002/cssc.201000425.

Puri, L., Hu, Y., & Naterer, G. F. (2024). Critical review of the role of ash content and composition in biomass pyrolysis. Frontiers in Fuels, 2, 1378361. https://doi.org/10.3389/frfu.2024.1378361.

Wang, S., Dai, G., Yang, H., & Luo, Z. (2017). Lignocellulosic biomass pyrolysis mechanism: A state-of-the-art review. Progress in Energy and Combustion Science, 62, 33–86. https://doi.org/10.1016/j.pecs.2017.05.004.

Vilas-Boas, A. C. M., Bittencourt, R. C., Costa, M. M., Guimarães, T., Alves, K. S., Barbosa, V. O. P., Trugilho, P. F., & Carvalho, A. M. M. L. (2025). Methodologies for bio-oil characterization from biomass pyrolysis: A review focused on GC-MS. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 185, 106850. https://doi.org/10.1016/j.jaap.2024.106850.

Wang, J., Chang, J., & Fan, J. (2010). Catalytic esterification of bio-oil by ion exchange resins. Journal of Fuel Chemistry and Technology, 38(1), 5–11. https://doi.org/10.1016/S1872-5813(10)60018-7.

Wang, Y., Wu, S., Li, X., Chen, H., & Chen, Y. (2022). Catalytic pyrolysis of lignocellulosic biomass for bio-oil production: A review. Chemosphere, 297, 134181. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.134181.

Xu, J., Zhang, Y., Wang, Z., Li, X., Chen, H., & Wang, S. (2025). Reed pyrolysis system using multi-stage quench scheme for furfural and chemical production: Process analysis and life cycle assessment. Fuel, 400, 135708. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2025.135708.

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Polpação Kraft com Antraquinona: Avaliação de Migração Residual

Nilton Louvem da Silva Júnior [1]; Fernando José Gomes Borges [1]; Lucas de Oliveira Souza[1]; Larisse Aparecida Ribas Batalha [1]; Osvaldo Vieira [2]; Rosane Nora Castro [1]; Roberto Carlos Costa Lelis[1]

[1] Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro

[2] Química Nova Brasil

Resumo: A indústria de celulose e papel enfrenta o desafio contínuo de incrementar a eficiência produtiva simultaneamente à mitigação de impactos ambientais e redução de custos operacionais. Nesse contexto, a utilização de aditivos químicos, consolidou-se como uma estratégia proeminente para otimizar o processo Kraft. Este trabalho avalia estudos preliminares da aplicação da antraquinona (AQ), aditivo que atua como mediador em reações redox cíclicas durante a polpação alcalina. Os resultados demonstram que o aumento da concentração de AQ promove uma redução no número Kappa, evidenciando maior eficiência na remoção de lignina mesmo sob menores teores de álcali. O emprego de 0,10% de AQ em um incremento de aproximadamente 2,2% no rendimento total da polpa, proporcionando redução da geração de sólidos dissolvidos e na diminuição do consumo específico de madeira. Sob a ótica da segurança química, ensaios de migração total em simulante aquoso indicaram valores dentro de limites normativos aceitáveis e, na migração específica, não detectaram a presença de antraquinona nos extratos.

Palavras-chave: Catalisador; Rendimento; Aditivo.

Kraft Pulping with Anthraquinone: Assessment of Residual Migration

Abstract: The pulp and paper industry faces the ongoing challenge of increasing production efficiency while mitigating environmental impacts and reducing operational costs. In this context, the use of chemical additives has become a prominent strategy for optimizing the Kraft process. This work evaluates preliminary studies on the application of anthraquinone (AQ), an additive that acts as a mediator in cyclic redox reactions during alkaline pulping. The results demonstrate that increasing the AQ concentration promotes a reduction in the Kappa number, showing greater efficiency in lignin removal even under lower alkali contents. The use of 0.10% AQ resulted in an increase of approximately 2.2% in the total pulp yield, providing a reduction

in the generation of dissolved solids and a decrease in specific wood consumption. From a chemical safety perspective, total migration tests in aqueous simulant indicated values within acceptable normative limits, and specific migration tests did not detect the presence of anthraquinone in the extracts.

Keywords: Catalyst; Yield; Additive.

1. Introdução

O processo Kraft consolidou-se como a tecnologia hegemônica na indústria global de celulose e papel, adequadas a aplicações que incluem papéis de imprimir e escrever, papéis especiais e substratos para embalagens (Argyropoulos et al., 2023; Nonaka e Takahashi, 2017; Akadiri et al., 2010; Biswas et al., 2011; Batista et al., 2026; Rajan et al., 2024; Dash, Bhavanam e Gera, 2023).

Nesse panorama operacional, a incorporação de aditivos catalíticos tem sido uma estratégia proeminente para otimizar a seletividade da deslignificação Kraft e mitigar impactos operacionais e ambientais (Adiwinata et al., 2011; Cicekler et al, 2023; Manji, 1996). A antraquinona (AQ) destaca-se como o catalisador redox eficaz para acelerar a remoção de lignina enquanto preserva a massa fibrosa (Almeida et al., 2014; Almeida et al., 2015; Anita et al., 2021), permitindo atingir Kappa objetivo sob condições menos severas, possibilitando reduções na carga de álcali ativo aplicado e no fator H (Almeida et al., 2004; Firesova et al., 2006; Manji, 1996; Vivian et al., 2017).

A preocupação central, contudo, reside na esfera toxicológica e regulatória. A reclassificação da AQ pela International Agency for Research on Cancer como "Grupo 2B, possivelmente carcinogênica para humanos" (Anita et al., 2021a; 2021b), baseada em evidências de atividade tumoral em bioensaios com animais, desencadeou restrições globais severas (Hart et al., 2014).

A avaliação da segurança química de materiais celulósicos destinados ao contato com alimentos fundamenta-se na quantificação da transferência de substâncias da embalagem para a matriz alimentar, sendo habitualmente conduzida por meio de protocolos de migração total e específica (Almeida et al., 2004; Stormer et al., 2025).

O objetivo deste trabalho é avaliar o perfil de segurança da polpa celulósica, produzida sob a influência da antraquinona como catalisador sobre parâmetros de polpação kraft de híbridos de *Eucalyptus*, submetendo-a a protocolos normatizados de migração total e específica.

2. Material e métodos

A matéria-prima utilizada consistiu-se em cavaco de *Eucalyptus* spp. com densidade básica de 500 $kg.m^{-3}$. Os cozimentos foram realizados em digestor laboratorial seguindo protocolo padronizado, nas condições apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 – Condições de polpação e aditivação

Parâmetros	Condições	Unidade
Tempo até Temperatura	90	Min.
Tempo na temperatura	50	Min.
Temperatura	160	°C
Alcalinidade Ativa	17, 18 e 19	%
Antraquinona	0,05; 0,07; 0,10	%
Sulfidez	30	%

Para cada amostra registraram-se: índice Kappa, rendimento depurado (%), rendimento total (%), AER (g/L), pH final, C.E.M (m^3/adt1) e tss/adt conforme valores originais.

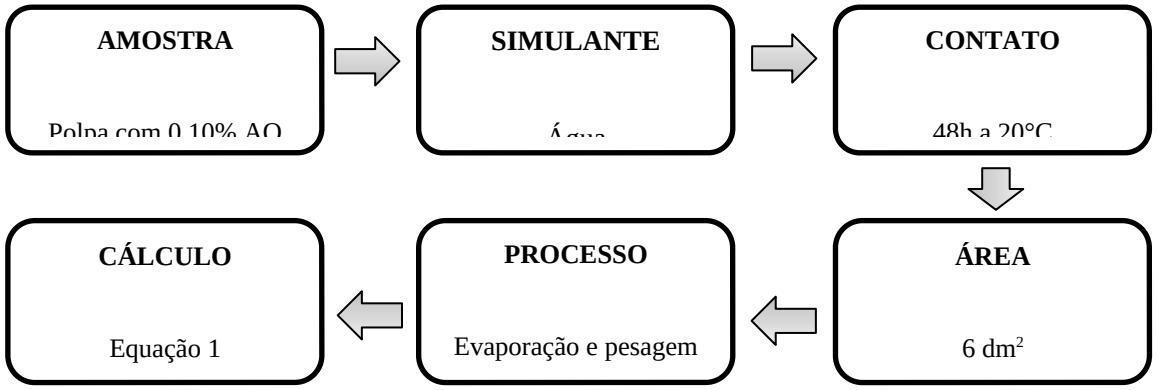


Figura 1 – Fluxograma do procedimento do ensaio de migração total.

As análises de migração total foram conduzidas segundo a RDC N° 88/2016, apresentado na Figura 1. Para a migração específica, os extratos concentrados foram analisados por HPLC em comprimentos de onda relevantes para antraquinona e os padrões comerciais de AQ foram analisados para comparações de retenção.

$$MT = \frac{Ramostra - Rbranco}{A}$$

Equação (1)

Em que:

- MT é a migração total, em mg/dm^2;
- Ramostra é a massa residual obtida para a amostra;
- Rbranco é a massa residual obtida para o branco;
- A é a área de contato, em dm^2.

3. Resultados e discussão

3.1. Processo de Polpação

Os dados experimentais foram analisados comparativamente em duas etapas (Tabela 2). Primeiro avaliou-se o efeito de variação da carga de álcali ativo (AA) sobre os parâmetros da polpação controle (Amostras 1, 2 e 3), por meio da construção de curvas de cozimento para determinar a sensibilidade da biomassa à severidade química e selecionar a condição de melhor seletividade na faixa de número Kappa objetivo entre 16 e 18 (Gomide et al., 2011; Biswas et al., 2011; Vivian et al., 2017).

Tabela 2 – Condições de polpação utilizadas na curva de cozimento e na aditivação com AQ.

Amostras	Aditivo	Rampa, min.	TAT, min.	Temp., °C	AA, %
1	-	90	50	160	17
2	-	90	50	160	18
3	-	90	50	160	19
4	0,05	90	50	160	17
5	0,07	90	50	160	17
6	0,10	90	50	160	17

Na etapa subsequente, os resultados obtidos com a adição de dosagens crescentes de AQ sob carga alcalina fixa (Amostras 4, 5 e 6) foram comparados diretamente à linha de base previamente estabelecida. As curvas de polpação com e sem aditivo foram avaliadas graficamente para quantificar os ganhos de rendimento, seletividade de deslignificação do processo sob condições representativas da indústria de celulose. A Figura 2 mostram a curva de polpação com e sem o uso de AQ.

A inclusão da dosagem de 0,10% de AQ é estratégica no contexto deste estudo, pois corresponde ao limite máximo permitido pelo FDA (*Food and Drug Administration*) para papéis e cartões destinados ao contato com alimentos (Almeida et al., 2014; Anita et al., 2021b).

Os resultados experimentais detalhados na Tabela 3 evidenciam que a incorporação de antraquinona como aditivo no processo Kraft promoveu melhorias multidimensionais. A comparação entre o controle (Amostra 1) e a condição de maior aditivação (Amostra 6) revela uma redução no número Kappa, o que demonstra o potencial catalítico da AQ em acelerar a fragmentação da lignina (Anita et al., 2021b; Fiserova et al., 2006; Vivian et al., 2017). Este efeito decorre do ciclo redox em que a forma reduzidada AQ atua como um nucleófilo potente atacando as ligações β-aril éter (β-O-4) da lignina, facilitando sua solubilização no licor negro (Luo et al., 2024; Vedoya et al., 2022).

Tabela 3 – Caracterização das polpas com e sem aplicação de AQ.

Amostras	Kappa	Rendimento Depurado, %	Rendimento Total, %	AER*, g/L	pH final	C.E.M**, m^3/adt	tss/adt
1	16,1	53,65	53,71	5,33	11,81	3,36	1,06
2	15,0	53,30	53,33	5,71	12,06	3,38	1,09
3	14,5	53,15	54,26	6,09	12,14	3,39	1,10
4	14,9	54,29	54,32	4,34	12,00	3,32	1,04
5	14,6	55,48	55,51	3,58	11,89	3,24	1,00
6	14,0	55,87	55,93	3,05	11,86	4,01	0,98

Simultaneamente à extensão da deslignificação, observou-se um ganho de produtividade, com incremento do rendimento depurado, que é consistente com a literatura técnica, que reporta ganhos entre 1% e 5% para polpas de folhosas (Almeida et al, 2004; Firesova et al., 2006; Santiago et al., 2008; Hart et al., 2014). O mecanismo responsável por essa preservação da biomassa é a oxidação dos grupos terminais redutores dos polissacarídeos pela AQ, inibindo a reação de despolimerização terminal conhecida como *peeling* (Anita et al., 2021b; Firesova et al., 2006; Vendoya et al., 2022; Cicekler et al., 2023). Assim, a AQ atua de forma seletiva, protegendo as hemiceluloses e a celulose enquanto intensifica a remoção da fração fenólica (Santiago et al., 2008, Gomide et al., 2011; Manji, 1996).

A eficiência no aproveitamento dos reagentes químicos também foi otimizada, como demonstra a queda do álcali efetivo residual (AER) na amostra com 0,10% de AQ, refletindo um uso mais eficaz do NaOH disponível e permitindo a redução do AA e mantendo o nível de deslignificação (Vivian et al, 2017; Firesova et al., 2006). Sob a ótica da sustentabilidade operacional, a redução dos sólidos suspensos representa um alívio crítico para o balanço de massa da caldeira de recuperação, mitigando gargalos de queima em fábricas que operam no limite de sua capacidade (Hart et al., 2014; Almeida et al., 2004; Almeida et al., 2014; Mocelin et al., 2005).

A Amostra 6 consolidou-se como a condição de melhor desempenho técnico, atingindo o menor Kappa e o maior consumo específico de madeira (C.E.M.), parâmetro de desempenho do processo de polpação (Santiago et al., 2008; Vivian et al., 2017; Almeida et al., 2015). Os resultados estabelecem que a maximização da eficiência técnica via aditivação com AQ não apenas otimiza o consumo específico de madeira, mas também cria um cenário crítico ideal para os subsequentes estudos de segurança química e avaliação de migração residual.

A Figura 2 compara as curvas de cozimento Kraft com e sem antraquinona, revelando uma correlação e ganhos operacionais na eficiência do processo. Os gráficos permitem visualizar o efeito catalítico da AQ através do deslocamento da curva. Para uma mesma carga alcalina, a curva aditivada situa-se abaixo da curva de referência, indicando uma deslignificação mais intensa (Vivian et al., 2017), com o mesmo nível de deslignificação, preservando mais carboidratos e melhor aproveitamento dos reagentes aplicados (Gomide et al., 2011; Vivian et al., 2017). Os ganhos de rendimento e a redução de número Kappa não são resultado do acaso, mas da ação direta do aditivo catalítico, confirmado pela alta confiabilidade do coeficiente de determinação com o uso de AQ (Vivian et al., 2017; Vedoya et al., 2022).

Figura 2 – Curva de polpação com (a) e sem (b) o uso de antraquinona.

3.2. Migração Total

A avaliação da segurança química da polpa celulósica produzida com a adição de 0,10% de antraquinona foi conduzida inicialmente por meio do ensaio de migração total em água deionizada (Almeida et al., 2014, Hart et al., 2014, Anita et al., 2021b).

A migração total (MT) foi de 2,36 mg/dm², evidenciando a presença de massa extraível no meio aquoso, contudo, a migração total é um ensaio não específico. O resíduo obtido reflete a transferência de uma gama diversificada de substâncias, que podem incluir extrativos naturais da madeira, frações de carboidratos hidrossolúveis, partículas finas de celulose e eventuais resíduos químicos do processo de polpação Kraft (Stormer et al., 2024).

Dada a reclassificação da AQ e as restrições impostas por órgãos internacionais, a conformidade regulatória plena exige a transição para ensaios de migração específica. Tais protocolos, fundamentados em técnicas de alta sensibilidade como a Cromatografia Líquida de Alta Eficiência (HPLC), garantem que o residual do aditivo não ultrapasse limites rigorosos, assegurando assim que o ganho de rendimento industrial não comprometa a segurança toxicológica do consumidor final (Anita et al., 2021a; Stormer et al., 2024).

3.3. Migração Específica

A investigação da presença residual de antraquinona nos extratos de migração foi conduzida por meio de Cromatografia Líquida de Alta Eficiência (HPLC), visando assegurar a sensibilidade analítica necessária para a conformidade com as exigências de segurança química. A robustez do método, visto na Figura 3, foi inicialmente validada pelo emprego de um padrão comercial de AQ, que apresentou um pico cromatográfico bem resolvido com tempo de retenção de aproximadamente 7,0 minutos; simultaneamente, o extrato obtido diretamente do aditivo utilizado no processo exibiu um sinal em 6,8 minutos, confirmando a seletividade e a capacidade de detecção do sistema cromatográfico para a molécula em questão quando presente em concentrações detectáveis (Revenga et al., 1995).

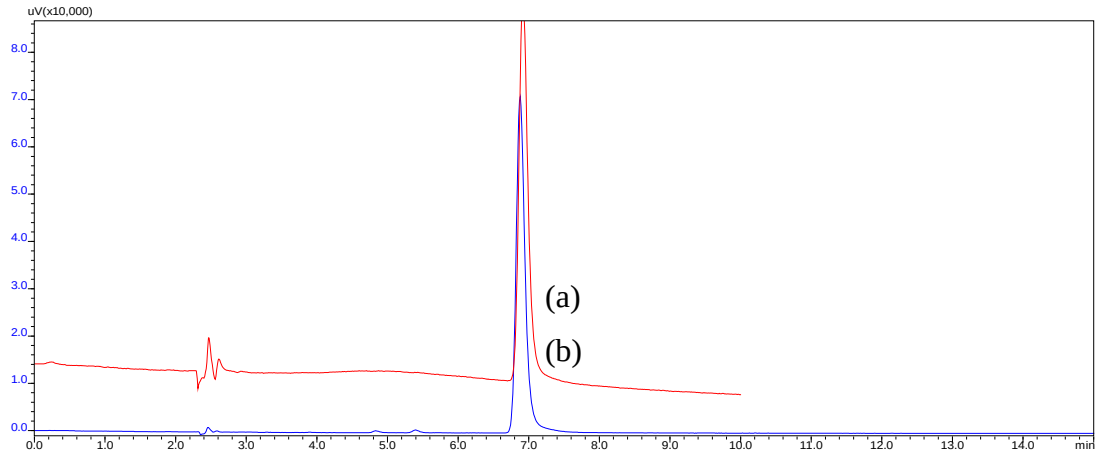


Figura 3 – Cromatograma comparativo dos extratos aquosos do padrão comercial de AQ (a) do processo (b).

Sob as condições de exposição avaliadas, a antraquinona não é liberada da matriz celulósica em quantidades mensuráveis para a água pura. Tal comportamento é tecnicamente corroborado pela literatura, que destaca a natureza hidrofóbica da AQ e sua baixíssima solubilidade em meios aquosos neutros, o que dificulta sua partição para o simulante (Dimmel et al., 2003; Noble et al., 1978).

3.4. Segurança e Conformidade

A literatura corrobora que a AQ, após o ciclo redox na polpação, tende a permanecer fortemente adsorvida à lignina dissolvida no licor negro ou aprisionada em estruturas remanescentes, sendo majoritariamente removida durante as etapas de lavagem e branqueamento (Anita et al., 2021a; 2021b).

Este resultado preliminar não garante a ausência de riscos em situações reais de contato com alimentos de diferentes naturezas químicas. A solubilidade e a mobilidade de extrativos e aditivos podem variar drasticamente em alimentos gordurosos ou ácidos que possuem um poder extrativo muito superior à água para moléculas lipofílicas como a antraquinona, podendo revelar residuais latentes na matriz (Stormer et al., 2024). Essa investigação aprofundada é necessária frente às restrições de órgãos internacionais, que estabelecem limites de migração específica (Hart et al., 2014).

4. Conclusões

A incorporação de antraquinona (AQ) ratifica a eficácia deste catalisador na otimização da polpação Kraft de folhosas, demonstrando uma aceleração pronunciada da cinética de deslignificação e um expressivo incremento no rendimento total e depurado. Há indicativo de um melhor aproveitamento dos reagentes químicos, permitindo a redução da carga alcalina aplicada sem prejuízos à seletividade do processo. A investigação por específica não identificou a presença de antraquinona nos extratos aquosos em níveis detectáveis. Apesar desses resultados preliminares favoráveis, é necessário validar o método cromatográfico para limites de detecção rigorosos e realizar ensaios complementares com simulantes representativos de alimentos ácidos e gordurosos, nos quais a mobilidade da antraquinona pode ser significativamente superior à observada em água pura.

5. Agradecimentos

Os autores agradecem a Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, ao Laboratório de Biorrefinaria Lignocelulósica, ao Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia InovaLigno, a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico e a Fundação Carlos Chagas Filho de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro pelo apoio técnico e financeiro.

6. Referências bibliográficas

Adiwinata, J., & Brogdon, B. N. (2011). A review of deresinators as digester additives for kraft pulping. In *TAPPI PEERS Conference Proceedings*. TAPPI Press.

Akadiri, O. (2010). *Role of surfactants in kraft pulping process* (Dissertação de Mestrado), McGill University.

Almeida, J. M., & Silva, D. J. (2004). Avaliação técnica do uso de antraquinona na polpação kraft e suas perspectivas econômicas. *O Papel*, *65*(2), 30–50.

Almeida, D. P. (2014). *Polpação soda com aditivos e cinética da deslignificação kraft* (Tese de doutorado), Universidade Federal de Viçosa.

Almeida, D. P., Gomide, J. L., Colodette, J. L., & Oliveira, R. C. (2015). Soda pulping with additives. In *7th International Colloquium on Eucalyptus Pulp*.

Anita, Y., Putra, A. S., Tanifuji, K., Nakagawa-Izumi, A., Ohi, H., & Evelyn. (2021a). Kraft cooking with teak wood extract and determining residual 2-methylantraquinone in Eucalyptus pulp. *Japan TAPPI Journal*, *75*(2), 153–163.

Anita, Y., Syelvia, P. U., Ohi, H., & Evelyn, E. (2021b). Mutagenicity of Tectona grandis wood extracts and their ability to improve carbohydrate yield for kraft cooking Eucalyptus wood. *Molecules*, *26*(23), 7171. https://doi.org/10.3390/molecules26237171

Biswas, D., Misbahuddin, M., Roy, U., Francis, R. C., & Bose, S. K. (2011). Effect of additives on fiber yield improvement for kraft pulping of kadam (Anthocephalus chinensis). *Bioresource Technology*, *102*(2), 1284–1288. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.08.059

Dash, S., Bhavanam, A., & Gera, P. (2023). Parametric optimization of kraft pulping of wheat straw for extraction of lignin using response surface methodology. *Biomass Conversion and Biorefinery*, *14*, 18165–18182. https://doi.org/10.1007/s13399-023-04011-4

Dimmel, D. R., Anderson, S., & Izsak, P. (2003). A study aimed at understanding the AQ-Polysulfide synergistic effect in alkaline pulping. *Journal of Wood Chemistry and Technology*, *23*(2), 141–159.

Fiserova, M., Gigac, J., & Melník, P. (2006). Application of AQ in kraft pulping of beech wood. *Wood Research*, *51*(4), 67–72.

Gomide, J. L., Colodette, J. L., & Almeida, D. P. (2011). Kraft pulping of eucalyptus to the optimum technical and economical level. In *5th International Colloquium on Eucalyptus Pulp Proceedings*.

Hart, P. W., & Rudie, A. W. (2014). Anthraquinone, a review of the rise and fall of a pulping catalyst. *TAPPI Journal*, *13*(10), 23–31.

Luo, K., Nishimoto, T., & Matsushita, Y. (2024). Influences of 2-ethylanthraquinone on lignin degradation in alkaline cooking of Eucalyptus pellita wood. *Journal of Wood Science*, *70*(1), 34. https://doi.org/10.1186/s10086-024-02149-x

Manji, A. (1996). Kraft pulping of coastal softwood from British Columbia using AQ and a digester additive. *TAPPI Journal*, *79*(10), 147–152.

Mocelin, E. Z. (2005). *Antraquinona e surfactante para otimização do processo kraft com Pinus Spp.* (Dissertação de mestrado), Universidade Federal do Paraná.

Noble, A. K. (1978). *The effects of anthraquinone on kraft pulping* (Trabalho de conclusão de curso), Western Michigan University.

Revenga, J., Rodríguez, F., & Tijero, J. (1995). Determination of 9,10-dihydroxyanthracene and anthraquinone in kraft pulping liquor by high performance liquid chromatography. *Journal of Chromatography A*, *712*(2), 372–377.

Santiago, A. S., & Pascoal Neto, C. (2008). Impact of kraft process modifications on Eucalyptus globulus pulping performance and polysaccharide retention. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, *47*(22), 8814–8822. http://doi.org/10.1021/ie071488g

Störmer, A., Hetzel, L., & Franz, R. (2024). A critical review of test methods and alternative scientific approaches to compliance and safety evaluation of paper and board for food contact. *Frontiers in Chemistry*, *12*, 1397913. http://doi.org/10.3389/fchem.2024.1397913

Vedoya, C. M. I., Area, M. C., Raffaeli, N., & Felissia, F. E. (2022). Study on Soda-Ethanol delignification of pine sawdust for a biorefinery. *Sustainability*, *14*(11), 6660. https://doi.org/10.3390/su14116660

Vivian, M. A., & Silva Júnior, F. G. (2017). Efeito da antraquinona na curva de cozimento kraft para madeira do híbrido Eucalyptus grandis x Eucalyptus urophylla. *Pesquisa Florestal Brasileira*, *37*(92), 457–464. http://doi.org/10.4336/2017.pfb.37.92.1267

Batista, A. C. G., Eufrade-Junior, H. J., Paes, S. T. S., Silva, L. D., & Silva Júnior, F. G. (2023). Trande-offs between sulfidity and physicochemical Properties of recovered *Eucalyptus* kraft lignin. Nordic Pulp & Paper Research Journal. https://doi.org/10.1515/npprj-2025-0048

Argyropoulos, D., Crestini, C., Dahlstrand, C., Furusjö, E., Gioia, C., Jedvert, K., Henriksson, G., Hulteberg, C. P., Lawoko, M., Pierrou, C., Samec, J. S. M., Subbotina, E., Wallmo, H., & Wimby, M. (2023). Kraft lignin: A valuable, sustainable resource, opportunities and challenges. ChemSusChem, 16(18). https://doi.org/10.1002/cssc.202300492

Nonaka, H., & Takahashi, M. (2017). Preparation of lignin composite kraft pulp based on black liquor absorption and the following acidification. Japan TAPPI Journal, 71(5), 556–561. https://doi.org/10.2524/jtappij.71.556

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Polpação kraft modificada de resíduos de eucalipto para produção de papel Kraftliner

Vítor Orçai de Azevedo[1]; Marcelo Moreira da Costa[1]

[1] Universidade Federal de Viçosa, Departamento de Engenharia Florestal
Autor correspondente: vitor.azevedo@ufv.br

Resumo: Este estudo avaliou a polpação kraft modificada de ponteiras e costaneiras de eucalipto para obtenção de polpas de alto número kappa destinadas a Kraftliner. Madeira convencional e resíduos foram impregnados por seis dias a 60 °C com licor preto fraco ajustado para 12 g/L de álcali efetivo e cozidos a 161 °C, fator H 1250, com distribuição do álcali em três parcelas. A costaneira apresentou número kappa 91,0, rendimento depurado de 65,0% e consumo específico de 1,38 t/tsa. As ponteiras sem e com casca atingiram números kappa 114,3 e 108,8, rendimentos de 58,0 e 56,7% e consumos de 1,55 e 1,59 t/tsa, respectivamente. Folhas não refinadas de 154,5 a 161,8 g/m² apresentaram, para os resíduos, índices de tração de 20,9 a 25,3 N·m/g, RCT de 0,90 a 1,08 kN/m e CMT de 77,1 a 115,3 N. Os resultados demonstram potencial de substituição parcial da madeira convencional, com necessidade de refino e otimização da consolidação das folhas para ampliar as resistências de ligação e compressão.

Palavras-chave: Impregnação; Propriedades; Físico-mecânicas.

Modified kraft pulping of eucalyptus residues for Kraftliner paper production

Abstract: This study evaluated modified kraft pulping of eucalyptus treetops and slabwood to obtain high-kappa pulps for Kraftliner. Conventional wood and residues were impregnated for six days at 60 °C with weak black liquor adjusted to 12 g/L effective alkali and cooked at 161 °C, H-factor 1250, with the alkali divided into three portions. Slabwood reached kappa number 91.0, screened yield 65.0%, and specific wood consumption 1.38 t/air-dry t. Bark-free and bark-containing treetops reached kappa numbers 114.3 and 108.8, yields 58.0 and 56.7%, and consumptions 1.55 and 1.59 t/air-dry t, respectively. Unrefined sheets of 154.5–161.8 g/m² produced from the residues showed tensile indices of 20.9–25.3 N·m/g, RCT of 0.90–1.08 kN/m, and CMT of 77.1–115.3 N. The results demonstrate potential for partial replacement of conventional wood, while refining and improved sheet consolidation remain necessary to develop bonding and compression strength.

Keywords: Impregnation; Properties; Physical-mechanics.

1. Introdução

A demanda por papéis para embalagem amplia o interesse por matérias-primas que conciliem resistência, rendimento de polpação e regularidade operacional. No Kraftliner, o desempenho resulta da interação entre morfologia fibrosa, formação, densificação, refino e ligação interfibras, e não apenas do comprimento das fibras (Biermann, 1996; Gullichsen & Paulapuro,

2000; Smook, 2016). Polpas kraft não branqueadas de eucalipto já demonstraram desempenho compatível com aplicações de embalagem, sobretudo após refino e consolidação da folha (Torres et al., 2020; Simões et al., 2023; Araújo et al., 2023).

Ponteiras e costaneiras podem ampliar a base fibrosa e elevar o aproveitamento da biomassa, mas diferem da madeira convencional em densidade, composição, presença de casca e geometria dos cavacos. Essas características afetam impregnação, deslignificação, rendimento e propriedades do papel (Neiva et al., 2015). A penetração e a difusão do licor dependem da estrutura da madeira, espessura dos cavacos, concentração alcalina e tempo de contato (Malkov et al., 2003). A distribuição da carga alcalina pode reduzir picos de concentração e favorecer uniformidade e preservação de carboidratos, conforme os princípios dos cozimentos modificados (Marcoccia et al., 1998; Sixta, 2006).

O objetivo deste trabalho foi avaliar a aplicação de impregnação prolongada, redução da temperatura máxima e distribuição da carga alcalina na polpação kraft de ponteiras e costaneiras de eucalipto. Foram determinados número kappa, rendimentos, rejeitos e consumo específico de madeira, além das propriedades estruturais e físico-mecânicas de folhas laboratoriais não refinadas, com foco no potencial de substituição parcial da madeira convencional em polpas para Kraftliner.

2. Materiais e métodos

a. Matérias-primas e caracterização

Foram avaliados cavacos de madeira convencional de *Eucalyptus urophylla* × *Eucalyptus grandis*, ponteiras do mesmo híbrido e costaneiras de *Eucalyptus* sp., fornecidos por empresa parceira. As ponteiras foram processadas sem casca e com 6,41% de casca em massa seca; a fração com casca não foi caracterizada separadamente. Nas matérias-primas sem casca determinaram-se densidade básica, cinzas, material insolúvel em HCl, pentosanas, extrativos, lignina, relação siringila/guaiacila e carboidratos por cromatografia líquida. Os resultados principais constam na Tabela 1.

Tabela 1. Caracterização físico-química resumida das matérias-primas sem casca

Matéria-prima	Densidade básica (t/m³)	Cinzas (%)	Pentosanas (%)	Extrativos totais (%)	Lignina total (%)	Carboidratos totais (%)
Madeira convencional – *E. urophylla* × *E. grandis*	0,466	0,17	14,0	1,13	29,59	59,25
Ponteira – *E. urophylla* × *E. grandis*	0,454	0,17	16,5	1,92	29,01	59,15
Costaneira – *Eucalyptus* sp.	0,590	0,21	11,7	1,58	28,72	61,95

b. Licores e Impregnação

Foram empregados licores industriais. O licor verde apresentava álcali efetivo de 39,22 g/L e sulfidez de 67,6%, enquanto o licor preto fraco apresentava 12,25% de sólidos. Para a impregnação, a concentração de álcali efetivo do licor preto fraco foi ajustada de 6 g/L para 12 g/L utilizando o licor verde. Os cavacos foram impregnados por seis dias a 60 °C, com relação licor/madeira de 6:1. Não houve circulação durante essa etapa. Ao final, os cavacos seguiram diretamente para o cozimento, sem lavagem, e o licor retido foi considerado no ajuste da relação licor/madeira do digestor.

c. Condições de polpação

Os cozimentos foram realizados em digestor MK Systems de 10 L, com circulação de licor e 600 g de madeira absolutamente seca. A relação licor/madeira no cozimento foi 4:1, a sulfidez foi aproximadamente 28% e a carga de álcali efetivo, expresso como NaOH, foi 4,5% sobre a madeira seca. O cozimento-controle foi conduzido a 175 °C, com rampa de 60 min e 47 min na temperatura máxima. Na condição modificada, a temperatura máxima foi reduzida para 161 °C, com rampa de 15 min e 171,5 min na temperatura máxima. Ambas as condições corresponderam a fator H 1250.

Na condição modificada, a carga de álcali efetivo foi dividida em três parcelas iguais, correspondentes a volumes iguais de licor e a 1/3 da carga total em cada etapa, mantendo-se a relação licor/madeira final em 4:1: a primeira foi adicionada antes da rampa de aquecimento, a segunda ao término da rampa, quando o sistema atingiu 161 °C, e a terceira na metade do tempo de cozimento. Os valores do controle em número kappa 90 foram obtidos por interpolação das relações entre carga alcalina, número kappa e variáveis de rendimento. As condições principais são resumidas na Tabela 2 e na Figura 1.

Tabela 2. Condições de impregnação e polpação kraft

Etapa/condição	Temperatura	Tempo	Relação L/M	Distribuição do álcali	Observações
Impregnação	60 °C	6 dias	6:1	–	Licor preto fraco ajustado para 12 g/L de AE
Controle	175 °C	47 min	4:1	Carga integral	Rampa de 60 min; fator H = 1250
Modificado	161 °C	171,5 min	4:1	1/3 + 1/3 + 1/3	Rampa de 15 min; fator H = 1250

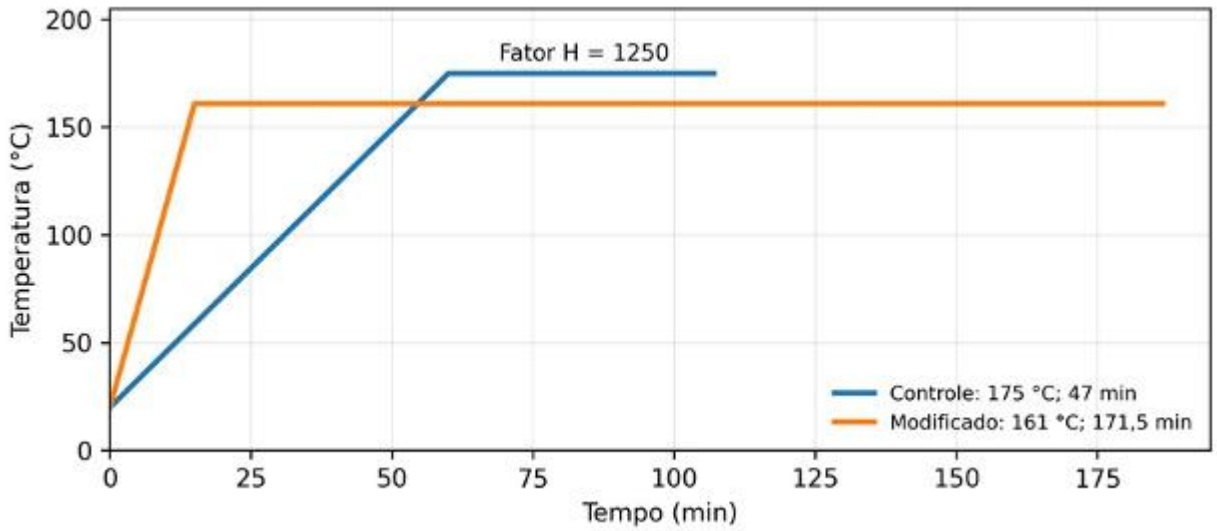


Figura 1. Perfis de temperatura dos cozimentos controle e modificado, ambos com Fator H 1250.

d. Processamento das polpas e cálculos

Após o cozimento, as polpas foram lavadas para remoção do licor residual, desagregadas em hydrapulper, despastilhadas em equipamento Bauer, depuradas em tela com abertura de 0,2 mm e centrifugadas. Os rejeitos foram secos em estufa a 100 °C, e todas as massas foram expressas em base absolutamente seca. Determinaram-se rendimento depurado, teor de rejeitos, rendimento total e número kappa conforme procedimentos laboratoriais baseados em métodos TAPPI e ISO (International Organization for Standardization, 2015). O consumo específico de madeira foi calculado em tonelada de madeira seca por tonelada de polpa seca ao ar, considerando 90% de consistência: CE = 0,90/(RD/100).

e. Formação das folhas e ensaios físico-mecânicos

Foram formadas folhas laboratoriais com as polpas de eucalipto: madeira convencional, ponteira sem casca, ponteira com casca e costaneira. As polpas não foram refinadas. As folhas, com gramatura nominal próxima de 150 g/m², foram preparadas conforme o procedimento para folhas de maior gramatura destinadas a papéis para embalagem descrito na TAPPI T 205 (Technical Association of the Pulp and Paper Industry, 2024). Após a formação e prensagem

padronizada, as folhas foram condicionadas por 24 h a 23 °C e 50% de umidade relativa, conforme TAPPI T 402 (Technical Association of the Pulp and Paper Industry, 2026).

Foram determinados gramatura, espessura, volume específico aparente, resistência à passagem do ar, arrebentamento, rasgo, tração, resistência à compressão em anel (Ring Crush Test – RCT) e resistência à compressão do miolo ondulado (Corrugating Medium Test – CMT). A resistência ao ar foi medida pelo método Gurley em equipamento PAG1000. Os demais ensaios seguiram procedimentos baseados nas normas TAPPI T 403, T 410, T 411, T 414, T 460 e T 494. Para o RCT, utilizaram-se tiras de 152,4 mm de comprimento por 12,7 mm de largura, e a força máxima registrada em newtons foi convertida em resistência à compressão em anel pela relação RCT = F/152,4, em kN/m, conforme ISO 12192 e TAPPI T 822. Para o CMT, tiras com as mesmas dimensões foram onduladas em equipamento Regmed LF-21 e, em seguida, comprimidas entre pratos rígidos, registrando-se a força máxima em newtons conforme TAPPI T 809.

Os resultados físico-mecânicos são apresentados como média e desvio-padrão dos corpos de prova. Como os cozimentos foram conduzidos em caráter exploratório, sem número suficiente de repetições independentes, os dados de polpação e de papel foram discutidos descritivamente, sem inferência estatística entre matérias-primas.

3. Resultados e discussão

a. Caracterização das matérias-primas

A madeira convencional e a ponteira apresentaram densidades básicas próximas, 0,466 e 0,454 t/m³, enquanto a costaneira atingiu 0,590 t/m³. Os teores de lignina total variaram de 28,72 a 29,59%, e os extrativos totais permaneceram abaixo de 2%, indicando que as diferenças tecnológicas não podem ser atribuídas apenas à composição global. A ponteira apresentou o maior teor de pentosanas (16,5%), e a costaneira o maior teor total de carboidratos (61,95%). Em materiais de eucalipto, rendimento e propriedades das folhas também dependem de densidade, anatomia, acessibilidade do licor e morfologia fibrosa. A variação entre espécies e materiais observada por Neiva et al. (2015) reforça que composição química, rendimento kraft, volume específico e resistências devem ser analisados de forma integrada.

b. Desenvolvimento da condição modificada

Tabela 3. Desenvolvimento da condição de polpação com madeira convencional de eucalipto

Condição	Número kappa	RD (%)	Rejeitos (%)	RT (%)	CE (t/tsa)
Controle	90,0	28,9	44,9	73,7	3,11
Impregnação + 175 °C	57,0	53,3	4,4	57,8	1,69
Impregnação + 161 °C + álcali distribuído	97,5	55,6	11,6	67,2	1,62

RD: rendimento depurado; RT: rendimento total; CE: consumo específico de madeira. O controle em número kappa 90 foi obtido por interpolação.

A impregnação seguida do cozimento a 175 °C reduziu fortemente os rejeitos e o consumo específico, mas levou o número kappa a 57, indicando deslignificação mais intensa que a desejada para uma polpa marrom de alto rendimento. A redução da temperatura para 161 °C e a distribuição do álcali elevaram o número kappa para 97,5, preservando rendimento depurado superior a 50%. A comparação direta entre essas condições deve considerar a diferença de grau de deslignificação; ainda assim, os resultados mostram que a impregnação e o perfil alcalino alteraram a uniformidade do cozimento e possibilitaram operar em menor temperatura, com fator H mantido.

A distribuição em três etapas limita a concentração alcalina instantânea e tende a reduzir reações localizadas excessivas, enquanto a impregnação prolongada amplia o tempo disponível para penetração e difusão do licor. Esses mecanismos são coerentes com os princípios de impregnação uniforme e cozimento modificado descritos por Malkov et al. (2003), Marcoccia et al. (1998) e Sixta (2006).

c. Polpação das ponteiras e costaneira

Tabela 4. Resultados de polpação da madeira convencional, ponteiras e costaneira de eucalipto

Matéria-prima	Número kappa	RD (%)	Rejeitos (%)	RT (%)	CE (t/tsa)
Madeira convencional – controle[1]	90,0	28,9	44,9	73,7	3,11
Ponteira sem casca	114,3	58,0	10,2	68,2	1,55
Ponteira com 6,41% de casca	108,8	56,7	11,8	68,5	1,59
Costaneira	91,0	65,0	11,3	76,3	1,38

[1]Controle sem impregnação, interpolado em número kappa 90. Os resíduos foram processados com impregnação por seis dias, 161 °C e distribuição do álcali em três etapas.

A costaneira apresentou o resultado mais favorável de polpação. Em número kappa praticamente igual ao controle, o rendimento depurado aumentou de 28,9 para 65,0%, os rejeitos diminuíram de 44,9 para 11,3% e o consumo específico caiu de 3,11 para 1,38 t/tsa. Parte dessa diferença decorre do elevado teor de rejeitos no controle e da maior uniformidade da condição modificada, mas o resultado demonstra que a costaneira não apresentou penalização intrínseca de rendimento. O rendimento total de 76,3% foi o maior entre os materiais avaliados.

As ponteiras apresentaram rendimentos depurados de 58,0% sem casca e 56,7% com casca, com consumos específicos de 1,55 e 1,59 t/tsa. A inclusão de 6,41% de casca reduziu o número kappa de 114,3 para 108,8 e elevou os rejeitos em 1,6 ponto percentual. Entretanto, a diferença entre os dois materiais foi moderada e não permite atribuir causalidade à casca, pois não houve caracterização química separada nem repetições independentes de cozimento. Em conjunto, os resultados indicam potencial de incorporação das ponteiras à alimentação industrial, desde que a variabilidade de casca e geometria dos cavacos seja controlada.

d. Propriedades físico-mecânicas das folhas de eucalipto

Tabela 5. Propriedades estruturais e índices de resistência das folhas laboratoriais não refinadas

Matéria-prima	Gramatura (g/m²)	Espessura (µm)	VEA (cm³/g)	Gurley (s/100 cm³)	Índice de arrebentamento (kPa·m²/g)	Índice de rasgo (mN·m²/g)	Índice de tração (N·m/g)
Madeira convencional	161,8	323 ± 4	2,00 ± 0,02	1,41 ± 0,09	0,80 ± 0,06	12,72 ± 3,11	27,06 ± 0,96
Ponteira sem casca	161,8	291 ± 6	1,80 ± 0,04	2,22 ± 0,21	0,50 ± 0,08	6,66 ± 1,24	20,94 ± 3,54
Ponteira com casca	154,5	274 ± 8	1,77 ± 0,05	1,84 ± 0,18	0,67 ± 0,10	8,31 ± 1,86	25,31 ± 1,29
Costaneira	158,4	334 ± 11	2,11 ± 0,07	0,73 ± 0,09	0,54 ± 0,12	9,16 ± 2,55	22,22 ± 2,81

VEA: volume específico aparente.

Tabela 6. Propriedades de compressão das folhas laboratoriais não refinadas

Matéria-prima	RCT (kN/m)	Índice RCT (N·m/g)	CMT (N)	Índice CMT (N·m²/g)
Madeira convencional	1,15 ± 0,12	7,11 ± 0,73	103,5 ± 9,9	0,64 ± 0,06
Ponteira sem casca	1,07 ± 0,07	6,60 ± 0,46	105,5 ± 12,0	0,65 ± 0,07
Ponteira com casca	1,08 ± 0,08	6,97 ± 0,49	115,3 ± 14,3	0,75 ± 0,09
Costaneira	0,90 ± 0,04	5,71 ± 0,23	77,1 ± 6,0	0,49 ± 0,04

As gramaturas variaram de 154,5 a 161,8 g/m². A costaneira apresentou o maior volume específico aparente (2,11 cm³/g), a menor resistência ao ar (0,73 s/100 cm³) e os menores RCT e CMT, indicando estrutura mais aberta e menor consolidação. Apesar disso, seu índice de rasgo (9,16 mN·m²/g) superou o das ponteiras. A madeira convencional apresentou os maiores índices de tração, arrebentamento e rasgo. Entre os resíduos, a ponteira com casca exibiu o melhor equilíbrio, com tração de 25,31 N·m/g, arrebentamento de 0,67 kPa·m²/g, RCT de 1,08 kN/m e CMT de 115,3 N. Como não houve repetições independentes de cozimento nem caracterização específica da casca, não se atribui efeito causal à sua presença.

Os índices de tração (20,94–27,06 N·m/g) e arrebentamento (0,50–0,80 kPa·m²/g) foram inferiores aos valores de 50–52 N·m/g e 3,5–4,0 kPa·m²/g reportados para polpa de eucalipto refinada a 25–30 °SR, enquanto o rasgo (6,66–12,72 mN·m²/g) abrangeu o intervalo industrial

de 7,0–7,5 mN·m²/g (Torres et al., 2020). A comparação é indicativa, pois as folhas deste estudo eram não refinadas, de alto número kappa, sem aditivos e produzidas em laboratório. O refino amplia flexibilidade, fibrilação e área ligada, afetando especialmente tração e arrebentamento (Fardim & Durán, 2005; Smook, 2016).

O RCT variou de 0,90 a 1,15 kN/m, abaixo de 1,40 kN/m reportado para Kraftliner industrial de eucalipto sem aplicação superficial de amido (Torres et al., 2020), mas coerente com a baixa consolidação observada. A espessura da ponteira com casca foi 274 µm; para papéis abaixo de 280 µm, o RCT pode incluir contribuição de flambagem, exigindo cautela na comparação de pequenas diferenças (International Organization for Standardization, 2011). Em conjunto, os resultados mostram que os resíduos formaram folhas resistentes, embora a condição não refinada tenha limitado principalmente tração, arrebentamento e compressão. Estudos recentes confirmam o potencial de polpas kraft não branqueadas de eucalipto para liner e miolo quando a rede fibrosa é adequadamente consolidada (Simões et al., 2023; Araújo et al., 2023).

4. Conclusões

A impregnação por seis dias a 60 °C, seguida de cozimento a 161 °C, fator H 1250 e distribuição do álcali em três etapas, permitiu produzir polpas de alto número kappa a partir de ponteiras e costaneira. A costaneira apresentou o melhor desempenho de polpação, com número kappa 91,0, rendimento depurado de 65,0% e consumo específico de 1,38 t/tsa; as ponteiras apresentaram rendimentos superiores a 56% e consumos inferiores a 1,60 t/tsa. Nas folhas não refinadas, os resíduos atingiram índices de tração de 20,94 a 25,31 N·m/g, RCT de 0,90 a 1,08 kN/m e CMT de 77,1 a 115,3 N. Os resultados sustentam a substituição parcial da madeira convencional por esses resíduos em polpas marrons para Kraftliner, devendo-se avaliar refino, formação e aditivos para ampliar as resistências de ligação e compressão.

5. Agradecimentos

Os autores agradecem à Empresa Brasileira de Pesquisa e Inovação Industrial (EMBRAPII), ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), à Universidade Federal de Viçosa e à empresa parceira que forneceu as matérias-primas e os licores industriais.

6. Referências bibliográficas

- Araújo, C. S., Silva, J. C., Alexandre, L. A. C., Ferreira, M. L., & Vieira, O. (2023). Impact of the recycling process on Kraftliner paper properties: A comparative study between eucalypts and pine fibers. *O Papel, 84*(4), 73–80.

- Biermann, C. J. (1996). *Handbook of pulping and papermaking* (2nd ed.). Academic Press.
- Fardim, P., & Durán, N. (2005). Influences of surface chemical composition on the mechanical properties of pulp as investigated by SEM, XPS and multivariate data analysis. *Journal of the Brazilian Chemical Society, 16*(2), 163–170. https://doi.org/10.1590/S0103-50532005000200007
- Gullichsen, J., & Paulapuro, H. (2000). *Papermaking Science and Technology, Book 18: Paper and Board Grades*. Fapet Oy.
- International Organization for Standardization. (2011). *ISO 12192:2011: Paper and board—Determination of compressive strength—Ring crush method*. ISO.
- International Organization for Standardization. (2015). *ISO 302:2015: Pulps—Determination of Kappa number*. ISO.
- Malkov, S., Tikka, P., & Gullichsen, J. (2003). *Towards complete impregnation of wood chips with aqueous solutions. Part 1: A retrospective and critical evaluation of the penetration. Paperi ja Puu – Paper and Timber, 85*(8), 460–466.
- Marcoccia, B. S., Laakso, R., & McClain, G. (1998). Lo-Solids pulping: Principles and results. *TAPPI Journal, 81*(6), 111–120.
- Neiva, D., Fernandes, L., Araújo, S., Lourenço, A., Gominho, J., Simões, R., & Pereira, H. (2015). Chemical composition and kraft pulping potential of 12 eucalypt species. *Industrial Crops and Products, 66*, 89–95. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2014.12.016
- Simões, R. M. S., Ferreira, C. I. A., Pires, F., Martins, M., Ramos, A., Sousa, A. P. M., Pinto, P. C. R., & Jorge, R. (2023). Recycling performance of softwood and hardwood unbleached kraft pulps for packaging papers. *TAPPI Journal, 22*(2), 73–86. https://doi.org/10.32964/TJ22.2.73
- Sixta, H. (Ed.). (2006). *Handbook of pulp*. Wiley-VCH. https://doi.org/10.1002/9783527619887
- Smook, G. A. (2016). *Handbook for pulp & paper technologists* (4th ed.). TAPPI Press.
- Technical Association of the Pulp and Paper Industry. (2024). *TAPPI/ANSI T 205 sp-24: Forming handsheets for physical tests of pulp*. TAPPI Press.
- Technical Association of the Pulp and Paper Industry. (2026). *TAPPI/ANSI T 402 sp-26: Standard conditioning and testing atmospheres for paper, board, pulp handsheets, and related products*. TAPPI Press.
- Technical Association of the Pulp and Paper Industry. (2022). Bursting strength of paper (TAPPI/ANSI T 403 om-22).
- Technical Association of the Pulp and Paper Industry. (2023). Grammage of paper and paperboard (weight per unit area) (TAPPI/ANSI T 410 om-23).
- Technical Association of the Pulp and Paper Industry. (2021). Thickness (caliper) of paper, paperboard, and combined board (TAPPI/ANSI T 411 om-21).
- Technical Association of the Pulp and Paper Industry. (2025). Internal tearing resistance of paper (Elmendorf-type method) (TAPPI/ANSI T 414 om-25).

- Technical Association of the Pulp and Paper Industry. (2026). Air resistance of paper (Gurley method) (TAPPI/ANSI T 460 om-26).
- Technical Association of the Pulp and Paper Industry. (2022). Tensile properties of paper and paperboard (using constant rate of elongation apparatus) (TAPPI/ANSI T 494 om-22).
- Technical Association of the Pulp and Paper Industry. (2022). Flat crush of corrugating medium (CMT test) (TAPPI/ANSI T 809 om-22).
- Technical Association of the Pulp and Paper Industry. (2022). Ring crush of paperboard (rigid support method) (TAPPI/ANSI T 822 om-22).
- Torres, F. I., Silva, J. C., Vieira, O., & Quinta, R. S. F. (2020). Eukaliner™: The first 100% hardwood Kraftliner in the world. In *Proceedings of the 53rd ABTCP International Pulp and Paper Congress and Exhibition*. ABTCP.

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Potencial Antifúngico do Extrativo da Madeira de *Ziziphus joazeiro* contra o complexo *Sporothrix*

Giovane Guimarães Farias[1]; Ana Cristina Almeida dos Santos[1]; Carlos Augusto Cardoso Fernandes[1]; Ana Helise Abreu Rodrigues da Silva[1]; Rickson Alves Marques de Oliveira; Rosimeire Cavalcante dos Santos[1]; Águida Aparecida de Oliveira[1]; Natália Dias de Souza[1]

[1] Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro

Resumo: A esporotricose constitui uma crescente ameaça à saúde pública e demanda a prospecção de novas fontes de agentes antifúngicos. Este estudo teve como objetivo investigar o potencial do extrato metanólico do lenho de *Ziziphus joazeiro*, uma biomassa subexplorada da Caatinga, como fonte de compostos ativos contra *S. brasiliensis* e *S. schenckii*. A atividade antifúngica foi determinada pela Concentração Inibitória Mínima (CIM) via microdiluição em caldo (CLSI, M60-S1). O extrato da madeira de *Z. joazeiro* inibiu o crescimento da cepa de *S. brasiliensis* (CIM = 3750 µg / mL), assim como da cepa de *S. schenckii* (CIM = 1880 µg / mL). Os resultados confirmaram o perfil de resistência da cepa de *S. brasiliensis* ao Itraconazol. Conclui-se que o extrato da madeira de *Z. joazeiro* apresenta atividade antifúngica frente ao complexo *Sporothrix*, validando esta fonte natural como um ponto de partida estratégico para o desenvolvimento de novas terapias para o tratamento da esporotricose.

Palavras-chave: Esporotricose; Azóis; Produto natural; Polifenóis.

Antifungal Potential of *Ziziphus joazeiro* Wood Extract against the *Sporothrix* Complex

Abstract: Sporotrichosis constitutes a growing threat to public health and demands the prospection of new sources of antifungal agents. This study aimed to investigate the potential of the methanolic wood extract of *Ziziphus joazeiro*, an underexplored Caatinga biomass, as a source of active compounds against *S. brasiliensis* and *S. schenckii*. Antifungal activity was determined by the Minimum Inhibitory Concentration (MIC) via broth microdilution (CLSI, M60-S1). The wood extract of *Z. joazeiro* inhibited the growth of the *S. brasiliensis* strain (MIC = 3750 µg/mL), as well as the *S. schenckii* strain (MIC = 1880 µg/mL). The results confirmed the resistance profile of the *S. brasiliensis* strain to Itraconazole. It is concluded that the wood extract of *Z. joazeiro* exhibits antifungal activity against the *Sporothrix* complex, validating this natural source as a strategic starting point for the development of new therapies for the treatment of sporotrichosis.

Keywords: Sporotrichosis; Azoles; Natural product; Polyphenols.

1 Introdução

O aumento global da resistência microbiana aos agentes terapêuticos representa uma das maiores ameaças à saúde pública contemporânea. No campo das infecções fúngicas, o uso indiscriminado de antifúngicos e a descontinuidade dos tratamentos têm acelerado o surgimento de cepas resistentes, comprometendo a eficácia clínica (Campos et al., 2020). Neste cenário, espécies do gênero *Sporothrix* têm se destacado por sua capacidade de desenvolver resistência aos tratamentos convencionais. Em particular, *Sporothrix brasiliensis*, o principal agente etiológico da esporotricose zoonótica no Brasil, exibe uma notável plasticidade genética que favorece a aquisição de mecanismos de resistência, tornando a busca por novos agentes anti-*Sporothrix* uma prioridade urgente (Waller et al., 2021; Manso et al., 2022).

Neste contexto, a investigação de produtos naturais, especialmente de fontes vegetais, surge como uma estratégia promissora para a descoberta de novas moléculas antifúngicas. Extratos de plantas representam uma fonte vasta e quimicamente diversa de compostos bioativos, como os polifenóis, que frequentemente demonstram potentes atividades antimicrobianas com baixa citotoxicidade (Ribeiro et al., 2018; Manso et al., 2022). Além da atividade intrínseca, muitos fitoquímicos podem atuar de forma sinérgica com fármacos existentes, oferecendo uma abordagem terapêutica para contornar a resistência medicamentosa (Nortjie et al., 2022).

Dentre as plantas medicinais, o gênero *Ziziphus* destaca-se por seu amplo uso e diversidade fitoquímica (Sakna et al., 2023), sendo suas espécies, a exemplo do *Z. joazeiro*, consideradas particularmente promissoras para a formulação de novas abordagens terapêuticas (Carvalho et al., 2025). Utilizado mundialmente em práticas tradicionais, este gênero é caracterizado por uma notável diversidade fitoquímica, incluindo a produção de alcaloides, flavonoides, saponinas e terpenoides. Essas duas últimas classes de compostos, em particular, são frequentemente creditadas pelas extensas propriedades antimicrobianas atribuídas ao gênero, tornando suas espécies alvos estratégicos para a bioprospecção de novos agentes antifúngicos (Sakna et al., 2023; Tan et al., 2022).

Apesar do reconhecido potencial do gênero *Ziziphus*, a atividade de espécies nativas do bioma Caatinga, como *Ziziphus joazeiro* Mart., contra patógenos fúngicos de importância clínica como *Sporothrix* permanece pouco explorada. Diante da necessidade de novas terapias para a esporotricose e do embasamento etnofarmacológico e fitoquímico de *Z. joazeiro*, o presente estudo teve como objetivo avaliar a atividade antifúngica do extrato metanólico da madeira desta espécie contra cepas do complexo*Sporothrix*.

2 Material e métodos

O estudo foi desenvolvido na Fazenda Milhã/Poço da Pedra, localizada no estado do Rio Grande do Norte (RN), Brasil. O empreendimento rural é de propriedade particular e possui 1.132,78ha de mata nativa de Caatinga sob manejo florestal sustentável, está situada nas coordenadas 5°35'47.3"S 35°51'59.6"W, na região Agreste, microrregião de Serra Verde/RN. Foram derrubadas quatro árvores da espécie *Z. joazeiro*, sendo retirados discos de madeira nas posições de 0% (junto ao colo da árvore), 25%, 50%, 75% e 100% da altura comercial da árvore.

2.1 Preparo dos extrativos da madeira

Os discos de madeira foram descascados e cavaqueados, excluindo as regiões defeituosas, e em seguida os cavacos sadios foram processados em moinho de facas tipo Willey. A fração que foi utilizada para o preparo dos extrativos foi referente a porção que atravessou a peneira de malha 40 mesh e que se manteve retida na peneira de 60 mesh como preconiza a norma da Technical Association of the Pulp and Paper Industry (TAPPI, 1997).

Foram adicionados 10g de madeira homogeneizada em cartuchos de papel filtro e em seguida os mesmos cartuchos foram submetidos à extração com 250 mL do solvente metanol. Após esse período, contando com um rotavapor, o material contido no balão no qual continha o material solúvel foi concentrado. Os extratos foram transferidos para um recipiente e levados à capela até a completa evaporação do solvente em temperatura ambiente (Abreu et al., 2006).

2.2 Determinação da Concentração Inibitória Mínima (CIM)

A atividade antifúngica do extrato foi avaliada pela determinação da Concentração Inibitória Mínima (CIM) através do método de microdiluição em caldo. O ensaio foi realizado de acordo com as diretrizes do documento M60-S1 do *Clinical and Laboratory Standards Institute* (CLSI, 2017), com as devidas adaptações.

O ensaio foi conduzido em microplacas de 96 poços com fundo em "U", utilizando meio RPMI-1640 (Sigma-Aldrich, St. Louis, MO, EUA) com L-glutamina, tamponado com MOPS, sem bicarbonato de sódio e suplementado com 2% de glicose. O meio foi esterilizado por filtração em membrana de 0.22 µm. As cepas de referência utilizadas foram *Sporothrix schenckii* (INCQS 40286) e *Sporothrix brasiliensis* (INCQS 40360), cultivadas em ágar Sabouraud dextrose a 35 °C.

As soluções-estoque do extrato metanólico (40 mg / mL), do itraconazol (Sigma-Aldrich) e da anfotericina B (Sigma-Aldrich) foram preparadas utilizando dimetilsulfóxido (DMSO) e Tween 80 na proporção 1:1. A partir destas, foram preparadas as soluções de

trabalho em meio RPMI-1640. O ensaio foi realizado adicionando 100 µL das soluções de trabalho nos primeiros poços de cada série, seguida de uma diluição seriada (1:2) nos poços subsequentes, que já continham 100 µL de meio.

O inóculo fúngico foi preparado a partir de culturas frescas (5-7 dias), e a turbidez foi ajustada para 0.5 na escala de McFarland, o que corresponde a uma suspensão de aproximadamente 10^6 a 10^7 UFC / mL. As faixas de concentração finais testadas foram de 7.5 a 0.015 mg / mL para o extrato e de 16 a 0.031 µg / mL para os antifúngicos.

As microplacas foram incubadas a 37 °C por 48 horas. A CIM foi determinada por inspeção visual como a menor concentração do composto capaz de inibir completamente o crescimento fúngico visível. Foram incluídos controles de esterilidade do meio (sem inóculo), de crescimento fúngico (meio + inóculo) e de toxicidade do solvente (meio + inóculo + DMSO e Tween 80 na maior concentração utilizada). Todos os ensaios foram realizados em triplicata em três experimentos independentes.

3 Resultados e discussão

Os valores da Concentração Inibitória Mínima (CIM) do extrato metanólico da madeira de *Ziziphus joazeiro* frente às espécies fúngicas testadas, *Sporothrix schenckii* (INCQS 40286) e *Sporothrix brasiliensis* (INCQS 40360), estão apresentados na Tabela 1.

Tabela 1. Atividade fungiestática (CIM) do extrato metanólico da madeira de *Ziziphus joazeiro* contra as espécies *Sporothrix schenckii* e *Sporothrix brasiliensis.*

		Concentração inibitória (µg / mL)	
Tratamento	Tipo de extrato	*Sporothrix schenckii* (INCQS 40286)	*Sporothrix brasiliensis* (INCQS 40360)
Itraconazol	Controle	16	>0,016
Anfotericina B	Controle	4	8
Extrato da madeira de *Z. joazeiro*	Metanol	1880	3750

Nota: O valor (> 0,016 µg/mL) para o Itraconazol representa a maior concentração tes-tada no ensaio, na qual não foi observada a inibição do crescimento fúngico.

O extrato metanólico da madeira de *Z. joazeiro* demonstrou atividade inibitória contra as cepas de *Sporothrix schenckii* e *S. brasiliensis*, com valores de CIM de 1880 µg/mL e 3750

µg/mL, respectivamente (Tabela 1). Essa constatação inicial confirma o potencial antifúngico da espécie, alinhando-se ao seu uso etnofarmacológico (Andrade et al., 2020). A relevância desses dados, no entanto, é ampliada quando comparada aos fármacos de controle. A Anfotericina B foi eficaz contra ambas as cepas testadas. Em contraste, foi a total resistência da cepa de *S. brasiliensis* ao Itraconazol (Tabela 1)

A eficácia do *Z. joazeiro* contra esta cepa farmacorresistente sugere fortemente que os constituintes ativos do extrato atuam por um mecanismo de ação distinto daquele dos azóis, sendo capazes de contornar as vias de resistência do fungo. Embora o extrato bruto apresente uma CIM superior à da Anfotericina B, uma diferença esperada ao se comparar uma matriz complexa a um fármaco isolado, sua atividade seletiva contra um fenótipo resistente posiciona a madeira de *Z. joazeiro* como uma potente fonte estratégica para a bioprospecção de novos agentes anti-*Sporothrix*.

A atividade biológica observada pode ser atribuída à rica fitoquímica do gênero *Ziziphus*. Tan et al. (2022), por exemplo, descrevem este gênero como notavelmente diverso, produzindo metabólitos como alcaloides, flavonoides, saponinas e terpenoides. De fato, estudos específicos realizados por Andrade et al. (2019a) e Carvalho et al. (2025) já confirmaram a presença de compostos terpenoides, ácidos fenólicos e flavonoides em *Z. joazeiro*. A presença documentada dessas classes, especialmente dos polifenóis, está diretamente associada à potentes atividades antimicrobianas, o que corrobora os resultados aqui encontrados (Manso et al., 2022).

O perfil de resistência da cepa de *S. brasiliensis* ao Itraconazol, um inibidor da síntese de ergosterol, permite inferir sobre o possível alvo dos compostos de *Z. joazeiro*. Conforme sugerido por Manso et al. (2022), se o mecanismo de resistência envolve alterações na via do ergosterol, a eficácia do extrato indica que seus constituintes podem estar agindo em alvos não-ergosterólicos. Os compostos ativos de plantas podem exercer seus efeitos por múltiplos mecanismos, como a desestabilização da membrana e da parede celular, a disrupção de funções mitocondriais ou a inibição da síntese de macromoléculas, oferecendo alternativas robustas para superar a resistência aos fármacos convencionais (Manso et al., 2022; El-Sakhawy et al., 2025).

Além da atividade antifúngica intrínseca, o potencial de extratos vegetais em modular a eficácia de antimicrobianos existentes representa uma fronteira promissora (Nortjie et al., 2022). Fitoquímicos podem atuar de forma sinérgica com fármacos, potencializando seu efeito e ajudando a combater a resistência (Manso, 2022). De fato, um estudo prévio de Andrade et al. (2019b) com extratos aquosos de *Z. joazeiro* já demonstrou a capacidade da espécie de modular

a atividade de antibióticos, sugerindo que a investigação de sinergismo com antifúngicos seria um caminho natural e promissor para trabalhos futuros.

4 Conclusões

- Deve-se considerar o extrato da madeira de *Ziziphus joazeiro* potencialmente antifúngico frente ao complexo *Sporothrix*.
- Diante da crescente incidência da esporotricose a potente atividade do extrato de *Ziziphus joazeiro* contra *S. brasiliensis* representa um avanço significativo.
- A madeira de *Z. joazeiro* pode ser considerada como um ponto de partida para o desenvolvimento de novos fármacos. O foco futuro deve ser o isolamento dos compostos majoritários e a avaliação de seu potencial sinérgico.

5 Agradecimentos

Os autores agradecem ao Laboratório de Micotoxicologia, da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (UFRRJ), pelo apoio técnico e pela infraestrutura disponibilizada para a realização deste trabalho.

6 Referências bibliográficas

Abreu, H. S., Carvalho, A. M., Monteiro, M. B. O., Pereira, R. P. W., Silva, H. R., Souza, K. C. A., Amparo, K. F., & Chalita, D. B. (2006). Métodos de análise química da madeira: Métodos de análise química utilizados no Laboratório de Química da Madeira do Departamento de Produtos Florestais do Instituto de Florestas da UFRRJ. Série Técnica Floresta e Ambiente, 1–20. https://app.periodikos.com.br/article/587fb4d30e88251a6ab65ffe/pdf/stfloram-0-1.pdf

Andrade, J. C., Silva, A. R. P. da, Santos, A. T. L. dos, Freitas, M. A., Matos, Y. M. L. de, Braga, M. F. B. M., Bezerra, C. F., Pereira Gonçalo, M. I. P., Vega Gomez, M. C., Rolón, M., Coronel, C., Vasconcelos Ribeiro, P. R., Brito, E. S. de, & Melo Coutinho, H. D. (2019a). Chemical composition, antiparasitic and cytotoxic activities of aqueous extracts of Ziziphus

joazeiro Mart. Asian Pacific Journal of Tropical Biomedicine, 9(5), 222–226. https://doi.org/10.4103/2221-1691.259003

Andrade, J. C., Silva, A. R. P. da, Santos, A. T. L. dos, Freitas, M. A., Carneiro, J. N. P., Gonçalo, M. I. P., Souza, A. de, Freitas, T. S. de, Ribeiro, P. R. V., Brito, E. S. de, Morais-Braga, M. F. B., & Coutinho, H. D. M. (2019b). UPLC-MS-ESI-QTOF characterization and evaluation of the antibacterial and modulatory antibiotic activity of Ziziphus joazeiro Mart. aqueous extracts. South African Journal of Botany, 123, 105–112. https://doi.org/10.1016/j.sajb.2019.02.001

Andrade, J. C., Silva, A. R. P. da, Freitas, M. A., Ramos, B. de A., Freitas, T. S., Santos, F. de A. G. dos, Leite-Andrade, M. C., Nunes, M., Tintino, S. R., Silva, M. V. da, Correia, M. T. dos S., Lima-Neto, R. G. de, Neves, R. P., & Coutinho, H. D. M. (2019c). Control of bacterial and fungal biofilms by natural products of Ziziphus joazeiro Mart. (Rhamnaceae). Comparative Immunology, Microbiology and Infectious Diseases, 65, 226–233. https://doi.org/10.1016/j.cimid.2019.06.006

Andrade, J. C., Santos, A. T. dos, Silva, A. R. da, Freitas, M. A., Afzal, M. I., Gonçalo, M. I., Fonseca, V. J. A., Costa, M. do S., Carneiro, J. N. P., Sousa, E. O., Matos, Y. M. L. S. de, Freitas, T. S. de, Sousa, A. K. de, Morais-Braga, M. F. B., Coutinho, H. D. M., Ali, S. W., Salehi, B., Imran, M., Umer, M., … Sharifi-Rad, J. (2020). Phytochemical characterization of the Ziziphus joazeiro Mart. metabolites by UPLC-QTOF and antifungal activity evaluation. Cellular and Molecular Biology, 66(4), 127–132. https://doi.org/10.14715/cmb/2020.66.4.17

Carvalho, N. K. G. de, Duarte Leite, D. O., Colares, A. V., Souza, F. A., Calabrese, K. de S., Torres Salazar, G. J., Nascimento, J. B. de, Pereira da Silva, M., Rodrigues, F. F. G., & Costa, J. G. M. de. (2025). Quantification of phenolic compounds by HPLC/DAD and evaluation of the antioxidant, antileishmanial, and cytotoxic activities of ethanolic extracts from

the leaves and bark of Sarcomphalus joazeiro (Mart.). Plants, 14(11), Artigo 1733. https://doi.org/10.3390/plants14111733

Do Nascimento, A. M., Da Fonseca, T. S., Campos, M. F., Silva, T. M. S., Silva, T. G., & Soares, L. A. L. (2020). Ziziphus joazeiro, a saponin-rich Brazilian medicinal plant: Pharmacognostic characterization of bark and leaves. Revista Brasileira de Farmacognosia, 30, 756–764. https://doi.org/10.1007/s43450-020-00109-2

Donadu, M. G., Peralta-Ruiz, Y., Usai, D., Maggio, F., Molina-Hernandez, J. B., Rizzo, D., Bussu, F., Rubino, S., Zanetti, S., Paparella, A., & Chaves-Lopez, C. (2021). Colombian essential oil of Ruta graveolens against nosocomial antifungal resistant Candida strains. Journal of Fungi, 7(5), Artigo 383. https://doi.org/10.3390/jof70503

Dufossé, L., Fouillaud, M., & Caro, Y. (2021). Fungi and fungal metabolites for the improvement of human and animal nutrition and health. Journal of Fungi, 7(4), Artigo 274. https://doi.org/10.3390/jof704027

El-Sakhawy, M. A., Abusalim, G. S., Ashour, A., & Balah, M. A. (2025). Action mechanisms of medicinal plant components as antimycosis: A literature review. Salud, Ciencia y Tecnología, 5, Artigo 1647. https://doi.org/10.56294/saludcyt2025164

Esheli, M., Thissera, B., El-Seedi, H. R., & Rateb, M. E. (2022). Fungal metabolites in human health and diseases—An overview. Encyclopedia, 2(3), 1590–1601. https://doi.org/10.3390/encyclopedia2030108

Gebremeskel, A. F., Ngoda, P. N., Kamau-Mbuthia, E. W., & Mahungu, S. M. (2019). Prevalence and controlling mechanisms of mycotoxin. Cogent Food & Agriculture, 5(1), Artigo 1658978. https://doi.org/10.1080/23311932.2019.1658978

Karpiński, T. M., Ożarowski, M., Seremak-Mrozikiewicz, A., Wolski, H., & Adamczak, A. (2021). Plant preparations and compounds with activities against biofilms formed by Candida spp. Journal of Fungi, 7(5), Artigo 360. https://doi.org/10.3390/jof705036

Manso, T., Lores, M., & De Miguel, T. (2022). Antimicrobial activity of polyphenols and natural polyphenolic extracts on clinical isolates. Antibiotics, 11(1), Artigo 46. https://doi.org/10.3390/antibiotics1101004

Nortjie, E., Basitere, M., Moyo, D., & Nyamukamba, P. (2022). Extraction methods, quantitative and qualitative phytochemical screening of medicinal plants for antimicrobial textiles: A review. Plants, 11(15), Artigo 2011. https://doi.org/10.3390/plants11152011

Ribeiro, M., Simões, L. C., & Simões, M. (2018). Biocides. Em T. M. Schmidt (Ed.), Encyclopedia of microbiology (4ª ed., pp. 478–490). Academic Press. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-809633-8.12118-1

Sakna, S. T., Maghraby, Y. R., Abdel Fattah, M. S., & Abdel-Sattar, E. (2023). Phytochemical diversity and pharmacological effects of triterpenes from genus Ziziphus: A comprehensive review. Phytochemistry Reviews, 22, 1611–1636. https://doi.org/10.1007/s11101-022-09835-y

Schühly, W., Heilmann, J., Çalis, I., & Sticher, O. (1999). New triterpenoids with antibacterial activity from Zizyphus joazeiro. Planta Medica, 65(8), 740–743. https://doi.org/10.1055/s-1999-1405

Tan, L. F., Yap, V. L., Rajagopal, M., Wiart, C., Selvaraja, M., Leong, M. Y., & Tan, P. L. (2022). Plant as an alternative source of antifungals against Aspergillus infections: A review. Plants, 11(22), Artigo 3009. https://doi.org/10.3390/plants1122300

Technical Association of the Pulp and Paper Industry. (1997). Solvent extractives of wood and pulp (TAPPI T 204 cm-97). TAPPI Press. https://www.tappi.or

Waller, S. B., Dalla Lana, D. F., Quatrin, P. M., Ferreira, M. R. A., Fuentefria, A. M., & Mezzari, A. (2021). Antifungal resistance on Sporothrix species: An overview. Brazilian Journal of Microbiology, 52, 73–80. https://doi.org/10.1007/s42770-020-00307-z

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Potencial antifúngico do líquido pirolenhoso de *Eucalyptus urophylla* × *Eucalyptus grandis* frente a fungos do gênero *Candida*

Lucas Valente[1]; Juliana Alves Resende[2]; Mariana Drummond Costa Ignacchiti[2]; Marina Lima da Silveira[2]; Lawrence Pires de Oliveira[1]; Camila da Silva Bonjour[1]; Maria Eduarda Grigolate Campos[1]; João Gilberto Meza Ucella-Filho[1]

[1] Universidade Federal de Viçosa
[2] Universidade Federal do Espírito Santo

Resumo: A candidíase é um importante problema de saúde pública devido ao aumento da resistência aos antifúngicos, o que reforça a necessidade de novas alternativas terapêuticas. Entre os produtos naturais com potencial antimicrobiano destaca-se o líquido pirolenhoso, um subproduto da carbonização da biomassa lignocelulósica rico em compostos fenólicos e ácidos orgânicos. Assim, este estudo avaliou a atividade antifúngica do líquido pirolenhoso obtido da madeira de *Eucalyptus urophylla* × *Eucalyptus grandis* frente a *Candida albicans* e *Candida tropicalis*. O produto apresentou elevado teor de compostos fenólicos e atividade antifúngica, com concentração inibitória mínima (CIM) e concentração fungicida mínima (CFM) de 10% para ambas as espécies. Os resultados indicam que o líquido pirolenhoso possui potencial de compostos bioativos para o desenvolvimento de alternativas naturais no controle de infecções causadas por *Candida*, sendo necessários estudos adicionais para esclarecer seus mecanismos de ação. Tornando desta forma uma pesquisa de relevância para o futuro da ciência.

Palavras-chave: Compostos fenólicos; Candidíase; Madeira de eucalipto.

Antifungal Potential of Bioactive Compounds from Pyroligneous Acid Against *Candida* Species

Abstract: Candidiasis is a major public health concern due to the increasing resistance to antifungal drugs, highlighting the need for new therapeutic alternatives. Among natural products with antimicrobial potential, pyroligneous acid stands out as a by-product of lignocellulosic biomass carbonization, rich in phenolic compounds and organic acids. Therefore, this study evaluated the antifungal activity of pyroligneous acid obtained from *Eucalyptus urophylla* × *Eucalyptus grandis* wood against *Candida albicans* and *Candida tropicalis*. The product exhibited a high content of phenolic compounds and significant antifungal activity, with a minimum inhibitory concentration (MIC) and minimum fungicidal concentration (MFC) of 10% for both species. These findings indicate that pyroligneous acid is a promising source of bioactive compounds for the development of natural alternatives to control *Candida* infections. However, further studies are required to elucidate its mechanisms of action. Therefore, this study represents a valuable contribution to future scientific research.

Keywords: Phenolic compounds; Candidiasis; Eucalyptus wood.

1. Introdução

Nos últimos anos, tem-se observado, um aumento significativo na incidência de infecções causadas por fungos do gênero Candida, os quais são considerados oportunistas e frequentemente associados a infecções nosocomiais (CORNELY *et al.*, 2025). No ser humano, esses microrganismos estão relacionados a diferentes quadros infecciosos, que podem variar de manifestações leves e superficiais a infecções sistêmicas potencialmente fatais. Dentre as espécies, *Candida albicans* destaca-se como uma das principais responsáveis pelos casos de candidíase, sendo considerada um dos patógenos mais relevantes do gênero. Esse fungo pode habitar o organismo humano de forma inofensiva, em uma relação de comensalidade; entretanto, diante de alterações no equilíbrio do hospedeiro, pode tornar-se patogênico, ocasionando infecções que variam desde formas superficiais até quadros sistêmicos graves (FRANÇOIS et al., 2013; RICHARD, 2002).

A candidíase, frequentemente considerada uma infecção simples, representa um importante problema de saúde pública, especialmente devido à sua elevada incidência no sexo feminino, na forma de candidíase vulvovaginal, bem como à sua recorrência. Além disso, observa-se um aumento na prevalência de espécies não-albicans, o que pode agravar o quadro clínico. Diversos fatores contribuem para esse cenário, incluindo alterações hormonais, uso de antibióticos de amplo espectro, disfunções imunológicas e predisposição genética, sendo mais frequentes em grupos vulneráveis, como indivíduos diabéticos, hospitalizados e imunocomprometidos (RAUTEMAA-RICHARDSON et al., 2026).

As infecções causadas por *Candida* estão entre as principais causas de mortalidade associadas a patógenos fúngicos no mundo, especialmente em suas formas invasivas, estima que mais de 1.565.000 pessoas são acometidas por candidíase invasiva anualmente em todo o mundo. Além disso, essas infecções figuram entre as mais comuns da corrente sanguínea em ambiente hospitalar. A persistência desses quadros está relacionada, em parte, ao aumento da resistência aos antifúngicos, frequentemente associado ao uso prolongado desses fármacos, o que favorece o desenvolvimento de cepas resistentes (PERLIN, 2015; RICHARD, 2002).

O tratamento da candidíase geralmente envolve o uso de antifúngicos pertencentes a classes como azóis, polienos e equinocandinas. Embora esses fármacos apresentem eficácia clínica, sua efetividade pode ser reduzida em infecções invasivas, em razão de limitações terapêuticas e atrasos no diagnóstico. Além disso, o aumento da resistência antifúngica, aliado aos possíveis efeitos adversos, tem impulsionado a busca por novas alternativas de tratamento (COWEN et al., 2015).

Nesse contexto, destaca-se a utilização do líquido pirolenhoso, que apresenta propriedades biológicas potencialmente úteis no controle de microrganismos. Também denominado extrato pirolenhoso, esse produto é um subproduto orgânico da pirólise da madeira para a obtenção de carvão vegetal, sendo constituído por uma mistura de compostos líquidos derivados da condensação da fumaça gerada durante a carbonização. Após a coleta, o líquido permanece em repouso por, no mínimo, três meses, formando três fases distintas: uma camada superficial de óleo, uma camada intermediária correspondente ao líquido pirolenhoso e uma camada inferior constituída por alcatrão vegetal (AMARAL et al., 2023; OUATTARA et al., 2024).

O líquido pirolenhoso corresponde à fração aquosa do líquido condensado, apresenta coloração marrom e é composto por pelo menos 80% de água e diversos componentes químicos, entre eles ácido acético, álcool metílico e acetona. Sua obtenção ocorre durante a pirólise ou carbonização da biomassa lignocelulósica, e seu rendimento e composição química dependem diretamente da matéria-prima empregada e da técnica de carbonização utilizada. O produto apresenta elevada diversidade química, contendo principalmente ácidos orgânicos, fenóis, cetonas e derivados fenólicos. Entre os compostos majoritários, destacam-se ácido acético, ácido propiônico, fenol, guaiacol, cresóis, siringol e butirolactona (UCELLA-FILHO et al., 2024). Essa substância proveniente da carbonização da madeira pode ser utilizada para diferentes finalidades na indústria, como fertilizante, nematicida, fungicida e inseticida (SILVA et al., 2017; OUATTARA et al., 2024).

Diante disso, o presente trabalho teve como objetivo avaliar o potencial antifúngico do líquido pirolenhoso obtido da carbonização da madeira de eucalipto frente a *C. albicans* e *C. tropicalis*, bem como determinar seu teor de compostos fenólicos totais, visando contribuir para a investigação de alternativas naturais para o controle de infecções causadas por esses microrganismos.

2. Material e métodos

Obtenção do líquido pirolenhoso

O líquido pirolenhoso (LP) foi obtido a partir da carbonização da madeira do clone I144 (*Eucalyptus urophylla* × *Eucalyptus grandis*), proveniente de árvores com sete anos de idade. As toras, com aproximadamente 1 m de comprimento, foram previamente separadas em três classes diamétricas (10,5; 14,5 e 18,5 cm ± 1,5 cm), visando à padronização do processo de carbonização.

A carbonização foi realizada em um forno experimental de alvenaria com capacidade de 1 m³, operando de acordo com o Sistema Fornos-Fornalha, conforme descrito por Schettini et al. (2022). Para a recuperação do líquido pirolenhoso, foi instalado na lateral da chaminé um sistema de condensação dos gases constituído por uma estrutura metálica, sensores de temperatura e tubos condutores com inclinação de 30°, favorecendo o escoamento do condensado. Os gases gerados durante a carbonização foram conduzidos por um tubo metálico galvanizado acoplado a um tubo de PVC, totalizando 6,6 m de comprimento. Na porção inicial do tubo de PVC foi instalada uma abertura destinada à coleta do condensado formado pelo resfriamento dos gases ao longo da tubulação.

O monitoramento da temperatura foi realizado por meio de cinco termopares do tipo K distribuídos em diferentes pontos do sistema. O aquecimento inicial da carga foi efetuado utilizando resíduos lignocelulósicos em um queimador central, seguido da ignição com resíduos vegetais na porta do forno. A carbonização ocorreu sob controle da entrada de ar e acompanhamento contínuo da temperatura, sendo finalizada quando a frente de carbonização atingiu os últimos pontos de monitoramento.

A coleta do líquido pirolenhoso foi iniciada quando a temperatura registrada no duto alcançou 65 °C, sendo realizada na faixa de 85 a 150 °C, conforme as leituras obtidas por um termopar instalado próximo à entrada da tubulação de condensação. Após a coleta, o líquido foi armazenado e filtrado em cadinho de porosidade nº 2 para remoção do alcatrão.

Determinação do teor de compostos fenólicos totais

O teor de compostos fenólicos totais do líquido pirolenhoso foi determinado pelo método de Folin-Ciocalteu, conforme Singleton (1999), com adaptações. Inicialmente, as amostras foram diluídas na proporção de 1:500, de modo a adequar as leituras à faixa linear de resposta do espectrofotômetro.

Para a reação, foram adicionados em tubos de ensaio 1,0 mL da amostra diluída, 1,0 mL do reagente de Folin-Ciocalteu a 50% (v/v) e 1,0 mL de solução de carbonato de sódio a 10% (m/v). Após cada adição, as misturas foram homogeneizadas em agitador tipo vórtex por aproximadamente 10 segundos. Em seguida, os tubos permaneceram em repouso por 60 minutos, à temperatura ambiente e protegidos da luz.

Ao término do período de incubação, a absorbância foi determinada em espectrofotômetro UV-Vis (Varian Cary®, modelo 50 Probe), no comprimento de onda de 765 nm. A quantificação dos compostos fenólicos foi realizada por meio de curva analítica

construída com dez concentrações de ácido gálico, sendo os resultados expressos em miligramas de equivalentes de ácido gálico por litro de líquido pirolenhoso (mg EAG L^{-1}).

Avaliação da atividade antifúngica

As linhagens de leveduras empregadas neste estudo foram *Candida albicans* (ATCC 24433) e *Candida tropicalis* (ATCC 750). As cepas foram inicialmente reativadas em caldo Sabouraud Dextrose (SDB) e incubadas a 30 ± 2 °C por 24 a 48 horas. Em seguida, foram repicadas em ágar Brain Heart Infusion (BHI) e incubadas nas mesmas condições por 24 horas. A pureza das culturas foi confirmada rotineiramente por meio de cultivo em meio cromogênico.

A atividade antifúngica do líquido pirolenhoso foi avaliada pelo método de microdiluição em caldo, de acordo com as recomendações do Clinical and Laboratory Standards Institute (CLSI, 2008), com adaptações. O inóculo foi padronizado para turbidez equivalente a 0,5 da escala de McFarland, correspondendo aproximadamente a $1,5 \times 10^6$ UFC mL^{-1}.

Os ensaios foram realizados em microplacas, utilizando volume final de 200 µL por poço, constituído por caldo Mueller-Hinton (CMH), líquido pirolenhoso nas concentrações finais de 1,25 a 10% e suspensão padronizada do inóculo. Após o preparo, as placas foram incubadas a 30 ± 2 °C por 24 a 48 horas, sendo o crescimento fúngico avaliado visualmente. A concentração inibitória mínima (CIM) foi definida como a menor concentração capaz de impedir o crescimento visível das leveduras.

Em cada experimento foram incluídos um controle positivo contendo anfotericina B (2 µg mL^{-1}), um controle de crescimento composto pelo inóculo sem tratamento e um controle de esterilidade contendo apenas o meio de cultura. Todos os controles foram submetidos às mesmas condições experimentais.

A concentração fungicida mínima (CFM) foi determinada por meio da semeadura de alíquotas provenientes dos poços correspondentes à CIM e às concentrações superiores em placas contendo ágar Sabouraud Dextrose (SDA). As placas foram incubadas a 30 ± 2 °C por 24 horas, sendo a CFM definida como a menor concentração do líquido pirolenhoso capaz de impedir completamente a formação de colônias visíveis.

Análise estatística

Os dados obtidos foram organizados e tabulados em planilhas eletrônicas para facilitar sua interpretação e apresentação. Os resultados foram expressos de forma descritiva, considerando as repetições experimentais e os critérios estabelecidos para cada ensaio,

permitindo a avaliação da atividade antifúngica e do teor de compostos fenólicos do líquido pirolenhoso.

3. Resultados e discussão

O líquido pirolenhoso obtido da carbonização da madeira de *Eucalyptus urophylla* × *Eucalyptus grandis* apresentou teor de compostos fenólicos totais de 387,39 ± 10,66 mg EAG g^{-1}. Os compostos fenólicos constituem uma importante classe de metabólitos bioativos reconhecidos por apresentarem propriedades antioxidantes e antimicrobianas, sendo frequentemente associados à atividade biológica de extratos vegetais e de produtos oriundos da pirólise da biomassa. Entre os principais compostos identificados em líquidos pirolenhosos provenientes de madeira destacam-se o ácido acético, fenol, guaiacol, cresóis e siringol, substâncias que apresentam reconhecida atividade antimicrobiana (OUATTARA et al., 2024; UCELLA-FILHO et al., 2024).

Tabela 1 – Concentração Inibitória Mínima (MIC) e Concentração Fungicida Mínima (MCF) do LP frente às cepas de *Candida*

Espécie	MIC	MCF
Candida albicans **(ATCC 24433)**	10%	10%
Candida tropicalis **(ATCC 750)**	10%	10%

O líquido pirolenhoso apresentou concentração inibitória mínima (CIM) e concentração fungicida mínima (CFM) de 10% para ambas as espécies avaliadas. A equivalência entre esses valores indica que, na menor concentração capaz de impedir o crescimento visível das leveduras, o produto também promoveu efeito fungicida, eliminando a capacidade de formação de colônias. Esse comportamento demonstra que o líquido pirolenhoso não exerceu apenas efeito fungistático, mas apresentou potencial fungicida frente às cepas de *C. albicans* e *C. tropicalis* nas condições experimentais empregadas.

A atividade antifúngica observada pode estar relacionada à ação conjunta dos diversos compostos presentes no líquido pirolenhoso. Os fenóis e seus derivados apresentam capacidade de interagir com componentes da membrana plasmática e da parede celular dos

microrganismos, promovendo alterações na permeabilidade, desnaturação de proteínas, inibição de enzimas essenciais e comprometimento da integridade celular. Paralelamente, os ácidos orgânicos, especialmente o ácido acético, podem reduzir o pH intracelular e alterar processos metabólicos fundamentais ao crescimento microbiano, potencializando a ação antimicrobiana. Dessa forma, a atividade observada provavelmente resulta do efeito sinérgico entre diferentes compostos bioativos presentes no líquido pirolenhoso, e não da ação isolada de uma única substância (NAZZARO et al., 2013; COWEN et al., 2015; OUATTARA et al., 2024).

Embora o teor de compostos fenólicos totais determinado neste estudo tenha sido elevado, essa análise representa apenas uma estimativa global da quantidade de fenólicos presentes, não permitindo identificar quais moléculas são responsáveis pela atividade antifúngica observada. O reagente de Folin-Ciocalteu quantifica compostos com capacidade redutora, sem distinguir individualmente os diferentes fenóis presentes na amostra. Assim, é possível que compostos como fenol, guaiacol, cresóis e siringol, descritos como constituintes majoritários do líquido pirolenhoso de madeira, tenham contribuído para o efeito observado, embora essa hipótese necessite de confirmação por análises cromatográficas, como cromatografia gasosa acoplada à espectrometria de massas (GC-MS) ou cromatografia líquida de alta eficiência (HPLC) (OUATTARA et al., 2024; UCELLA-FILHO et al., 2024).

Outro aspecto relevante é que ambas as espécies de *Candida* apresentaram comportamento semelhante frente ao tratamento, indicando sensibilidade equivalente ao líquido pirolenhoso nas condições avaliadas. Esse resultado demonstra que o produto possui atividade contra duas espécies clinicamente importantes, incluindo *C. albicans*, principal agente etiológico da candidíase, e *C. tropicalis*, frequentemente associada a infecções invasivas e a pacientes imunocomprometidos (CORNELY et al., 2025). De modo geral, os resultados obtidos demonstram que o líquido pirolenhoso proveniente da carbonização da madeira de *Eucalyptus urophylla* × *Eucalyptus grandis* apresenta potencial como fonte de compostos bioativos com atividade antifúngica frente às espécies de *Candida*.

4. Conclusões

O líquido pirolenhoso obtido da carbonização da madeira de *Eucalyptus urophylla* × *Eucalyptus grandis* apresentou elevado teor de compostos fenólicos totais (387,39 ± 10,66 mg

EAG g^{-1}) e atividade antifúngica frente às cepas de *Candida albicans* e *Candida tropicalis*, com valores de concentração inibitória mínima (CIM) e concentração fungicida mínima (CFM) de 10% para ambas as espécies. Esses resultados demonstram o potencial do líquido pirolenhoso como fonte de compostos bioativos de origem natural, reforçando sua relevância como alternativa promissora para o desenvolvimento de novos produtos destinados ao controle de infecções causadas por espécies do gênero *Candida*.

Embora a atividade observada possa estar relacionada à presença de compostos fenólicos e de outros constituintes bioativos presentes no líquido pirolenhoso, a contribuição individual desses compostos ainda não foi determinada. Assim, estudos futuros devem concentrar-se na caracterização química detalhada do líquido, por meio de técnicas como cromatografia e espectrometria de massas, visando identificar os compostos responsáveis pela atividade antifúngica e investigar possíveis efeitos sinérgicos entre seus constituintes. Além disso, são necessários ensaios para elucidar os mecanismos de ação envolvidos, avaliar a citotoxicidade e a segurança do produto.

Como perspectivas futuras, o líquido pirolenhoso poderia ser investigado para a produção de formulações antifúngicas, como cremes, pomadas, géis vaginais ou formulações para candidíase oral. Outra possibilidade seria identificar, por técnicas como GC-MS e HPLC, quais compostos são responsáveis pela atividade antifúngica e posteriormente isolá-los para utilização como possíveis princípios ativos. Também seria interessante avaliar sua associação com antifúngicos convencionais, buscando possíveis efeitos sinérgicos. Entretanto, todas essas aplicações dependeriam de estudos posteriores de mecanismo de ação, citotoxicidade, segurança e eficácia

5. Agradecimentos

Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG), Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001 e a Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação do Espírito Santo (FAPES).

6. Referências bibliográficas

AGATONOVIĆ-KUŠTRIN, S., Gegechkori, V., Morton, D. W., & Vladimirov, V. (2020). Essential oil quality and purity evaluation via FT-IR spectroscopy and pattern recognition techniques. *Applied Sciences, 10*(20), 7294. https://doi.org/10.3390/app10207294

AMARAL, R. do, Kunst, S. R., Soares, L. G., et al. (2023). Estudo preliminar do processo de anodização de alumínio com líquido pirolenhoso em modos galvanostático e potenciostático pela técnica de hard anodization. *Matéria, 28*(4). https://doi.org/10.1590/1517-7076-RMAT-2023-0244

BENNETT, J. E., Dolin, R., & Blaser, M. J. (Eds.). (2020). *Mandell, Douglas, and Bennett's principles and practice of infectious diseases* (9th ed.). Elsevier. 10.1016/S1473-3099(24)00749-7

BHARGAVA, A., Klamer, K., Sharma, M., Ortiz, D., & Saravolatz, L. (2025). *Candida auris*: A continuing threat. *Microorganisms, 13*(3), 652. https://doi.org/10.3390/microorganisms13030652

BOUHLEL, W., et al. (2026). Investigation of the microbiocidal, antioxidant, and cytotoxic effects of *Cinnamomum verum* (cinnamon), *Origanum onites* (oregano balls), and *Origanum vulgare* (black oregano) hydrosols: A model food environment-driven usability study. *Food and Bioprocess Technology*. https://doi.org/10.1007/s11947-026-04258-5

BROWN, G. D., et al. (2012). Hidden killers: Human fungal infections. *Science Translational Medicine, 4*(165), 165rv13. https://doi.org/10.1126/scitranslmed.3004404

Calderone, R. A., & Clancy, C. J. (Eds.). (2012). *Candida and candidiasis* (2nd ed.). ASM Press.

ÇEBI, N., Sagdic, O., Karaduman, A. B., & Yetisemiyen, A. (2021). The famous Turkish rose essential oil: Characterization and authenticity monitoring by FTIR, Raman and GC-MS techniques combined with chemometrics. *Food Chemistry, 354*, 129495. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.129495

CHAI, X., Liu, Y., Zhang, Y., et al. (2023). Comparative study of E-nose, GC-MS, and GC-IMS to distinguish star anise essential oil extracted using different extraction methods. *Separations, 10*(4), 256. https://doi.org/10.3390/separations10040256

CORNELY, Oliver A. *et al.* Global guideline for the diagnosis and management of candidiasis: an initiative of the ECMM in cooperation with ISHAM and ASM. The Lancet Infectious Diseases, v. 25, p. e280–e293, 2025. DOI: 10.1016/S1473-3099(24)00749-7.

COUTINHO, I. D., Kataoka, V. M. F., Honda, N. K., et al. (2009). Gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS) and evaluation of antioxidant and antimicrobial activities of

essential oil of *Campomanesia adamantium*. *Brazilian Journal of Pharmaceutical Sciences, 45*(4), 767–776. https://doi.org/10.1590/S1984-82502009000400022

COWEN, L. E., et al. (2015). Mechanisms of antifungal drug resistance. *Cold Spring Harbor Perspectives in Medicine, 5*(7), a019752. https://doi.org/10.1101/cshperspect.a019752

JENKS, J., Tobin, E. H., & Zahra, F. (2026). *Candida auris*. In *StatPearls*. StatPearls Publishing.

NAZZARO, F., et al. (2013). Effect of essential oils on pathogenic bacteria. *Pharmaceuticals, 6*(12), 1451–1474. https://doi.org/10.3390/ph6121451

OUATTARA, H. A. A., Niamke, B. F., Ahoke, M. E. M. F., et al. (2024). Physicochemical characterization, chemical composition and antioxidant activities of pyroligneous acids from cocktails of wood and agricultural residues from Ivory Coast. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 181*, 106629. https://doi.org/10.1016/j.jaap.2024.106629

PERLIN, D. S. (2015). Echinocandin resistance in *Candida*. *Clinical Infectious Diseases, 61*(Suppl. 6), S612–S617. https://doi.org/10.1093/cid/civ791

RAUTEMAA-RICHARDSON, R., Sobel, J. D., Stone, N., et al. (2026). *Candida auris* and antifungal resistance. *Clinical Infectious Diseases*. https://doi.org/10.1093/cid/ciaf673

SILVA, C. J., Karsburg, I. V., Dias, P. C., & Arruda, T. P. M. (2017). Pyroligneous liquor effect on *in* and *ex vitro* production of *Oeceoclades maculata* (Lindl.) Lindl. *Revista Caatinga, 30*(4), 947–954. https://doi.org/10.1590/1983-21252017v30n415rc

UCELLA-FILHO, J. G. M. et al. Antiviral potential of bio-oil from *Citrus sinensis* waste wood as a therapeutic approach against COVID-19. *Journal of Cleaner Production*, v. 447, art. 141583, 2024. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.141583

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Potencial Antioxidante e Neuroprotetor do extrato da casca de *Anacardium occidentale* L.

Lara Luísa Mendes Nascimento[1]; Tatiane Kelly Barbosa de Azevêdo[2]; João Paulo Viana Leite[1]; João Victor da Costa Santos[1]; Guilherme Viana[1]; Camila da Silva Bonjour[1]; Lucas José de Oliveira Valente[1]; João Gilberto Meza Ucella-Filho[1]

[1] Universidade Federal de Viçosa
[2] Universidade Federal do Rio Grande do Norte

Resumo: A doença de Alzheimer é uma das principais enfermidades neurodegenerativas no mundo. Diante disso, a busca por compostos naturais com potencial antioxidante e anticolinesterásico vem crescendo, visando à identificação de bioativos para o desenvolvimento de fármacos. Nesse contexto, a casca de *Anacardium occidentale* L. (cajueiro) constitui uma fonte promissora de metabólitos bioativos. Assim, este estudo teve como objetivo avaliar a atividade antioxidante e a capacidade de inibição da acetilcolinesterase (AChE) do extrato da casca da espécie. A atividade antioxidante foi determinada pelo método DPPH, com cálculo do IC_{50}, enquanto a atividade anticolinesterásica foi avaliada pelo método de Ellman, utilizando fisostigmina como controle positivo. O extrato apresentou IC_{50} de 11,53 ± 1,41 mg mL^{-1} e promoveu 77,67% de inibição da AChE na concentração de 400 µg mL^{-1}. Os resultados indicam que a casca de *A. occidentale* possui potencial antioxidante e anticolinesterásico, indicando potencial para estudos farmacológicos futuros.

Palavras-chave: Alzheimer; Compostos fenólicos; DPPH.

Antioxidant and Neuroprotective Potential of *Anacardium occidentale* L. Bark Extract

Abstract: Alzheimer's disease is one of the main neurodegenerative disorders worldwide. In this context, the search for natural compounds with antioxidant and anticholinesterase potential has been increasing, aiming to identify bioactive compounds for drug development. In this regard, the bark of *Anacardium occidentale* L. (cashew tree) represents a promising source of bioactive metabolites. Therefore, this study aimed to evaluate the antioxidant activity and acetylcholinesterase (AChE) inhibitory capacity of the bark extract of this species. Antioxidant activity was determined using the DPPH assay, with the IC_{50} calculated, while

anticholinesterase activity was evaluated using Ellman's method, with physostigmine as the positive control. The extract showed na IC_{50} of 11.53 ± 1.41 mg mL^{-1} and promoted 77.67% inhibition of AChE at a concentration of 400 µg mL^{-1}. The results indicate that the bark of *A. occidentale* has antioxidant and anticholinesterase potential, supporting its potential for future pharmacological studies.

Keywords: Alzheimer; Phenolic compounds; DPPH.

1) Introdução

Os radicais livres são moléculas altamente reativas produzidas naturalmente durante o metabolismo celular, caracterizadas pela presença de elétrons desemparelhados, o que lhes confere elevada instabilidade (BIANCHI; ANTUNES, 1999). Quando produzidos em excesso, em decorrência de fatores como exposição prolongada à radiação solar, tabagismo e dietas ricas em gordura, podem desencadear o estresse oxidativo, caracterizado pelo desequilíbrio entre a formação dessas espécies reativas e a capacidade do organismo de neutralizá-las (CHANDIMALI et al., 2025). Esse processo promove danos a lipídios, proteínas e ao DNA, estando associado ao desenvolvimento de diversas doenças neurodegenerativas, entre elas a doença de Alzheimer.

Nesse contexto, substâncias antioxidantes podem contribuir para a neutralização de espécies reativas. Devido à vulnerabilidade dos neurônios ao estresse oxidativo, resultante de sua intensa atividade metabólica e de sua limitada capacidade de regeneração, a ação antioxidante pode contribuir para a proteção do tecido nervoso, favorecendo efeitos neuroprotetores (RIZWANA; AGARWAL; NUNE, 2022). Dessa forma, compostos antioxidantes de origem natural têm despertado crescente interesse científico em razão de seu potencial na prevenção de danos oxidativos e de doenças neurodegenerativas (SANTOS et al., 2018).

Nesse cenário, o Brasil destaca-se por sua ampla biodiversidade, que abriga inúmeras espécies vegetais com elevado potencial antioxidante, contribuindo significativamente para o avanço das pesquisas nessa área (DUTRA et al., 2016). Muitas dessas espécies apresentam metabólitos secundários de reconhecida importância farmacológica, como flavonoides e saponinas, tornando o país uma importante fonte para a prospecção de novos compostos bioativos (OLIVEIRA et al., 2009). Dentre essas espécies, destaca-se o cajueiro (*Anacardium occidentale* L.), planta nativa do Brasil, especialmente da região Nordeste. A casca dessa

espécie foi selecionada para este estudo por constituir uma rica fonte de compostos fenólicos e taninos, metabólitos associados a atividades antioxidante, anti-inflamatória e antimicrobiana, evidenciando seu potencial para aplicações terapêuticas e farmacológicas (COSTA et al., 2020).

Embora a casca de *A. occidentale* seja reconhecida como uma fonte rica em compostos fenólicos e apresente atividades antioxidante e anti-inflamatória já demonstradas, as pesquisas concentram-se principalmente em sua composição fitoquímica, havendo poucos estudos que investiguem especificamente seu potencial anticolinesterásico ou sua possível aplicação em doenças neurodegenerativas (ENCARNAÇÃO et al., 2024). Revisões recentes também indicam que os efeitos terapêuticos mais explorados da casca estão relacionados às atividades antimicrobiana, anti-inflamatória, cicatrizante e antioxidante, enquanto sua possível aplicação na prevenção ou no tratamento de doenças neurodegenerativas permanece pouco investigada (NUNES et al., 2025). Assim, a investigação da atividade antioxidante e da capacidade de inibição da acetilcolinesterase da casca do cajueiro pode ampliar o conhecimento sobre seu potencial biológico e subsidiar futuras pesquisas voltadas ao desenvolvimento de compostos bioativos.

Diante do exposto, este trabalho teve como objetivo avaliar a atividade antioxidante e a atividade anticolinesterásica do extrato da casca de *A. occidentale*, por meio dos ensaios de sequestro do radical DPPH e de inibição da acetilcolinesterase.

2) Material e métodos

2.1. Obtenção do extrato

O extrato da casca de *A. occidentale*, espécie comum em florestas secas do Brasil, foi obtido a partir de cascas secas e moídas, submetidas à extração conforme a metodologia de Mori et al. (2003). Foram utilizados 100 g do material vegetal em solução contendo água destilada e 3% de sulfito de sódio, mantida em banho-maria a 70 °C por 3 horas. Após esse período, a mistura foi filtrada a vácuo para obtenção do extrato. Em seguida, o extrato foi submetido à secagem em estufa de circulação de ar a 60 °C até massa constante. Após a secagem, o material foi triturado para obtenção do extrato seco.

2.2. Ensaio de eliminação do radical DPPH

A atividade antioxidante do extrato foi determinada pelo método de sequestro do radical DPPH, conforme Brand-Williams et al. (1995). Inicialmente, foi preparada uma solução de DPPH a 0,1 mM em metanol. A partir de uma solução estoque do extrato na concentração de 10

mg mL^{-1}, foram preparadas diluições seriadas para obtenção das concentrações de 4,0; 2,0; 1,0; 0,5; 0,25 e 0,125 mg mL^{-1}.

Os ensaios foram realizados em microplacas de 96 poços, adicionando-se 25 µL da amostra e 175 µL da solução de DPPH em cada poço. Como controles, foram preparados: (i) o branco da amostra, contendo 25 µL da amostra e 175 µL de metanol; e (ii) o controle do reagente, composto por 25 µL de metanol e 175 µL da solução de DPPH. Todas as determinações foram realizadas em triplicata.

Após incubação por 60 minutos, a absorbância foi determinada a 517 nm. A atividade antioxidante foi expressa em porcentagem de inibição do radical DPPH, calculada pela seguinte equação:

Atividade antioxidante (%) = [1 - ((Absamostra - Absbranco) / Abscontrole)] x 100

Em seguida, foi determinada a concentração inibitória capaz de neutralizar 50% dos radicais DPPH (IC_{50}), por meio da construção de curvas dose–resposta relacionando a concentração do extrato com a porcentagem de inibição.

2.3 Avaliação da atividade anticolinesterásica

A atividade inibitória da acetilcolinesterase (AChE) foi determinada pelo método colorimétrico descrito por Ellman et al. (1961), com adaptações. Foi utilizada a enzima acetilcolinesterase de enguia elétrica (*Electrophorus electricus*), tipo VI (0,025 U mL^{-1}), tendo como substrato o iodeto de acetiltiocolina (0,3 mM). O reagente de Ellman (DTNB; 0,29 mM) foi empregado como agente cromogênico. Todos os reagentes foram adquiridos da Sigma-Aldrich, exceto o DTNB, obtido da Thermo Fisher Scientific.

A enzima foi reconstituída em tampão Tris-HCl 50 mM (pH 8,0), contendo 0,01% (m/v) de albumina sérica bovina (BSA). Os ensaios foram conduzidos em microplacas de 96 poços, em triplicata, a 37 °C, com tempo de reação de 30 minutos. As leituras foram realizadas a 412 nm em leitor de microplacas (Molecular Devices SpectraMax M5), utilizando o software SoftMax Pro 6.

O extrato foi solubilizado em dimetilsulfóxido (DMSO) e avaliado na concentração de 400 µg mL^{-1}. A fisostigmina foi utilizada como controle positivo. A leitura inicial foi considerada como branco (background) e seu valor foi subtraído da absorbância obtida ao final da reação. A porcentagem de inibição da AChE foi calculada pela seguinte equação:

Inibição da AChE (%) = [(Abscontrole - Absamostra) / Abscontrole)] x 100

2.4 Análise estatística

Os dados obtidos nos ensaios foram organizados em planilhas eletrônicas para tabulação e processamento das informações experimentais. Os resultados foram expressos como média ± desvio padrão das determinações realizadas em triplicata.

3) Resultado e Discussão

A caracterização química por cromatografia líquida de alta eficiência (HPLC), realizada por Ucella-Filho et al. (2024), identificou diversos compostos fenólicos no extrato da casca, entre eles os ácidos gálico, cafeico, ferúlico e p-cumárico, além dos flavanóis catequina, da rutina e dos flavonoides quercetina, kaempferol, naringenina e apigenina. O ácido gálico e a catequina foram os compostos majoritários, podendo contribuir para a elevada capacidade antioxidante atribuída ao extrato. Esses metabólitos apresentam elevada capacidade de doar elétrons ou átomos de hidrogênio para neutralizar espécies reativas de oxigênio, reduzindo processos oxidativos que comprometem a integridade celular (OLIVEIRA, 2015). Além disso, flavonoides como quercetina, rutina e kaempferol possuem atividades antioxidante e anti-inflamatória amplamente descritas na literatura e, em alguns modelos experimentais, também apresentam potencial neuroprotetor, sugerindo que os efeitos biológicos observados resultam da ação conjunta desses compostos (RIZWANA; AGARWAL; NUNE, 2022; MORALES et al., 2022).

Estudos realizados por Ucella-Filho et al. (2024) demonstraram que a casca de *Anacardium occidentale* apresenta elevado teor de fenóis totais (92,2 mg equivalentes de ácido gálico por grama de casca seca – mg GAE g^{-1}), evidenciando seu potencial como fonte de compostos bioativos. Os autores também determinaram uma concentração de aproximadamente 143 mg equivalentes de catequina por grama de casca (mg CE g^{-1}) de taninos condensados, indicando que essa classe de metabólitos representa grande parte dos compostos fenólicos presentes. Em estudo anterior, Ucella-Filho et al. (2022) determinaram um índice de Stiasny de 94% para a casca de A. occidentale, indicando elevada proporção de taninos condensados reativos e confirmando o potencial da espécie como fonte de taninos. A elevada concentração desses metabólitos é relevante, uma vez que compostos fenólicos são reconhecidos por suas propriedades antioxidantes e anti-inflamatórias, além de estarem associados à proteção contra danos celulares provocados pelo estresse oxidativo.

A atividade antioxidante do extrato foi avaliada pelo método de sequestro do radical DPPH, apresentando valor de IC_{50} de 11,53 ± 1,41 mg mL^{-1}. Esse resultado demonstra a capacidade do extrato em neutralizar radicais livres, uma vez que o ensaio de DPPH mede a habilidade de compostos antioxidantes em reduzir um radical estável por meio da doação de elétrons ou átomos de hidrogênio (OLIVEIRA, 2015). A atividade antioxidante observada pode estar relacionada ao elevado teor de compostos fenólicos descrito para a casca da espécie, especialmente ácido gálico, catequina e flavonoides, reconhecidos por sua elevada eficiência na neutralização de espécies reativas de oxigênio. Esse aspecto possui relevância biológica, considerando que o estresse oxidativo é um dos principais fatores envolvidos na degeneração neuronal, promovendo danos a lipídios, proteínas e ácidos nucleicos. Dessa forma, compostos com atividade antioxidante podem contribuir para minimizar esses danos e constituem alvos promissores para estudos relacionados às doenças neurodegenerativas (CASSIDY et al., 2020; SIMUNKOVA et al., 2019).

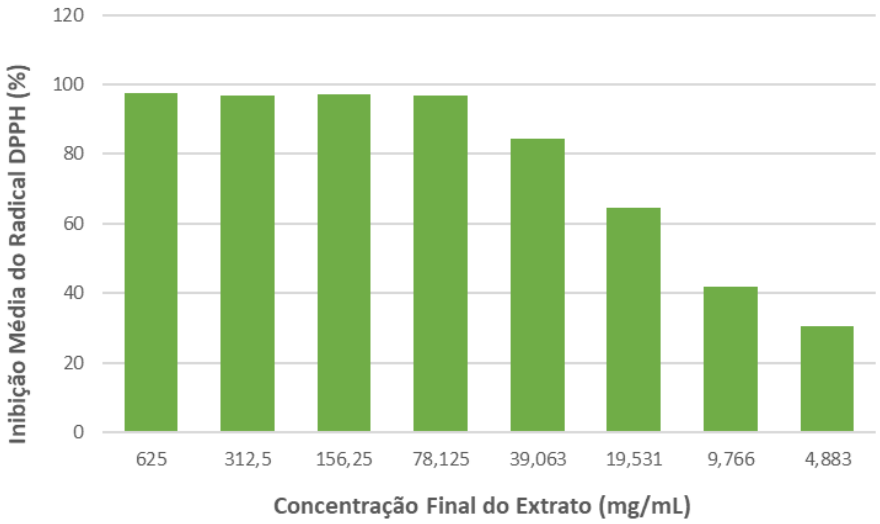


Figura 1 — Atividade antioxidante do LP determinada pelo método DPPH.

O extrato da casca de *A. occidentale* apresentou 77,67 ± 4,54% de inibição da acetilcolinesterase (AChE), enquanto o controle positivo (fisostigmina) apresentou 97,94 ± 0,23% de inibição. Embora inferior ao controle positivo, o extrato demonstrou capacidade de inibição enzimática na concentração avaliada, indicando a presença de compostos bioativos capazes de interferir na atividade da AChE. Estudos recentes indicam que compostos fenólicos, flavonoides e outros metabólitos secundários presentes em espécies vegetais podem inibir essa enzima e contribuir para a redução do estresse oxidativo, mecanismos considerados relevantes

para pesquisas relacionadas à doença de Alzheimer (MORSY et al., 2023; MORALES et al., 2022). Assim, a elevada concentração desses compostos na casca de *A. occidentale* pode explicar, ao menos em parte, a atividade anticolinesterásica observada neste estudo.

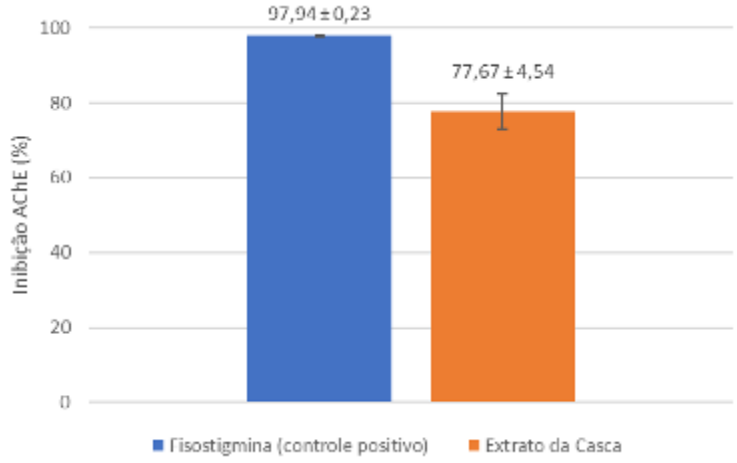


Figura 2 — Atividade inibitória do extrato sobre a acetilcolinesterase (AChE).

Em conjunto, os resultados obtidos e as evidências disponíveis na literatura reforçam o potencial biológico da casca de *A. occidentale* como fonte de metabólitos bioativos, especialmente compostos fenólicos e taninos condensados. Embora os resultados obtidos demonstrem atividade antioxidante e elevada capacidade de inibição da acetilcolinesterase in vitro, são necessários estudos adicionais para confirmar esses efeitos em modelos biológicos mais complexos e esclarecer seus mecanismos de ação. Ainda assim, a espécie apresenta potencial para futuras investigações voltadas ao desenvolvimento de produtos de interesse farmacêutico.

4. Conclusões

O extrato da casca de *Anacardium occidentale* apresentou atividade antioxidante e elevada capacidade de inibição da acetilcolinesterase in vitro, indicando seu potencial como fonte de compostos bioativos. Com base em estudos prévios, a elevada concentração de compostos fenólicos presente na casca da espécie pode estar relacionada às atividades biológicas observadas, uma vez que esses metabólitos são reconhecidos por sua capacidade de neutralizar radicais livres e modular a atividade da acetilcolinesterase. Assim, a casca de *A. occidentale*, um resíduo agroindustrial, apresenta potencial para futuras investigações visando aplicações farmacêuticas e funcionais, em consonância com as limitações dos ensaios in vitro

realizados. Entretanto, são necessários estudos adicionais para identificar os compostos responsáveis por essas atividades e confirmar sua eficácia e segurança em modelos *in vivo* e clínicos.

5. Agradecimentos

À Universidade Federal de Viçosa (UFV), ao Departamento de Engenharia Florestal (DEF), ao Laboratório de Resíduos da Indústria Florestal (LABRIF), à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG – Projeto APQ-02997-25), ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES – Código de Financiamento 001) pelo apoio à realização deste trabalho.

6. Referências bibliográficas

Bianchi, M. L. P., & Antunes, L. M. G. (1999). Radicais livres e os principais antioxidantes da dieta. Revista de Nutrição, 12(2), 123–130. https://doi.org/10.1590/S1415-52731999000200001

Brand-Williams, W., Cuvelier, M. E., & Berset, C. (1995). Use of a free radical method to evaluate antioxidant activity. LWT – Food Science and Technology, 28(1), 25–30. https://doi.org/10.1016/S0023-6438(95)80008-5

Cassidy, L., Fernandez, F., Johnson, J. B., Naiker, M., Owoola, A. G., & Broszczak, D. A. (2020). Oxidative stress in Alzheimer's disease: A review on emergent natural polyphenolic therapeutics. Complementary Therapies in Medicine, 49, 102294. https://doi.org/10.1016/j.ctim.2019.102294

CHANDIMALI, N. et al. Free radicals and their impact on health and antioxidant defenses: a review. Cell Death Discovery, v. 11, art. 19, 2025. DOI: 10.1038/s41420-024-02278-8. Nature - Cell Death Discovery

Costa, A. R., Silva, J. R. L., Oliveira, T. J. S., Silva, T. G., Pereira, P. S., Borba, E. F. O., Brito, E. S., Ribeiro, P. R. V., Almeida-Bezerra, J. W., Calixto Júnior, J. T., Kamdem, J. P., Duarte, A. E., & Barros, L. M. (2020). Phytochemical profile of Anacardium occidentale L. (cashew tree) and the cytotoxic and toxicological evaluation of its bark and leaf extracts. South African Journal of Botany, 135, 355–364. https://doi.org/10.1016/j.sajb.2020.09.017

Dutra, R. C., Campos, M. M., Santos, A. R. S., & Calixto, J. B. (2016). Medicinal plants in Brazil: Pharmacological studies, drug discovery, challenges and perspectives. Pharmacological Research, 112, 4–29. https://doi.org/10.1016/j.phrs.2016.01.021

Ellman, G. L., Courtney, K. D., Andres, V., Jr., & Featherstone, R. M. (1961). A new and rapid colorimetric determination of acetylcholinesterase activity. Biochemical Pharmacology, 7(2), 88–95. https://doi.org/10.1016/0006-2952(61)90145-9

Encarnação, S., Lima, K., Malú, Q., Caldeira, G. I., Duarte, M. P., Rocha, J., Lima, B. S., & Silva, O. (2024). An integrated approach to the anti-inflammatory, antioxidant, and genotoxic potential of Portuguese traditional preparations from the bark of Anacardium occidentale L. Plants, 13(3), 420. https://doi.org/10.3390/plants13030420

Mori, F. A., Mori, C. L. S. O., Mendes, L. M., Silva, J. R. M., & Melo, V. M. (2003). Influência do sulfito de sódio e hidróxido de sódio na quantificação de taninos da casca de barbatimão (Stryphnodendron adstringens). Floresta e Ambiente, 10(1), 86–92.

Nunes, R. S. A., Castro, A. P., Silva, J. R. P., & Nóbrega, F. R. R. (2025). Compostos bioativos da casca do cajueiro (Anacardium occidentale L.) e seus efeitos terapêuticos: Uma revisão sistemática. Revista Brasileira de Filosofia e História, 14(4), 2359–2365. https://doi.org/10.18378/rbfh.v14i4.11875

Oliveira, A. C., Valentim, I. B., Goulart, M. O. F., Silva, C. A., Bechara, E. J. H., & Trevisan, M. T. S. (2009). Fontes vegetais naturais de antioxidantes. Química Nova, 32(3), 689–702. https://doi.org/10.1590/S0100-40422009000300013

Oliveira, G. L. S. (2015). Determinação da capacidade antioxidante de produtos naturais in vitro pelo método do DPPH: Estudo de revisão. Revista Brasileira de Plantas Medicinais, 17(1), 36–44. https://doi.org/10.1590/1983-084X/12_165

Rizwana, N., Agarwal, V., & Nune, M. (2022). Antioxidant for neurological diseases and neurotrauma and bioengineering approaches. Antioxidants, 11(1), Article 72. https://doi.org/10.3390/antiox11010072

Santos, J. A. S., Sena, T. J. O., Costa, M. L. A., Santos, K. B. S., Santos, K. C. B. S., & Santos, A. F. (2018). Estudo do potencial antioxidante de Anacardium occidentale L. e determinação de seus compostos fenólicos. Diversitas Journal, 3(2), 455–474. https://doi.org/10.17648/diversitas-journal-v3i2.637

Simunkova, M., Alwasel, S. H., Alhazza, I. M., Jomova, K., Kollar, V., Rusko, M., & Valko, M. (2019). Management of oxidative stress and other pathologies in Alzheimer's

disease. Archives of Toxicology, 93(9), 2491–2513. https://doi.org/10.1007/s00204-019-02538-y

Ucella-Filho, J. G. M., Lourenço, M. S., Souza, E. C., Costa, G. M., Piccoli, R. H., Dias Júnior, A. F., & Mori, F. A. (2022). Tannin-rich tree bark extracts inhibit the development of bacteria associated with bovine mastitis. BioResources, 17(4), 6578–6587. https://doi.org/10.15376/biores.17.4.6578-6587

Ucella-Filho, J. G. M., Lourenço, M. S., Silva, B. R. F., Ferreira, V. R. F., Monteiro, J. R. B., Ferreira, N. S., Cardoso, M. G., Kitagawa, R. R., Resende, J. A., Dias Júnior, A. F., Piccoli, R. H., & Mori, F. A. (2024). Exploring the potential of tannin-rich tree bark extracts in combating foodborne diseases and gastric cancer. Food Bioscience, 57, 103559. https://doi.org/10.1016/j.fbio.2023.103559

Potencial bioativo do líquido pirolenhoso obtido em sistema forno-fornalha: atividade antioxidante e compostos fenólicos

Eric Rodrigues de Araújo[1]; Lawrence Pires de Oliveira[1]; Angélica de Cássia Oliveira Carneiro[1]; João Paulo Viana Leite[1]; Camila da Silva Bonjour[1]; Guilherme Viana[1]; João Victor da Costa Santos[1]; João Gilberto Meza Ucella-Filho[1]

[1] Universidade Federal de Viçosa - UFV

Resumo: A busca por antioxidantes naturais tem aumentado devido aos riscos dos antioxidantes sintéticos. O líquido pirolenhoso, coproduto da carbonização da madeira, destaca-se por ser rico em compostos fenólicos. Este estudo objetivou determinar o teor de fenólicos e avaliar a atividade antioxidante desse material. O líquido foi obtido na carbonização de toras do clone I144 (*Eucalyptus urophylla* × *Eucalyptus grandis*). A carbonização foi realizada em sistema experimental do tipo forno-fornalha. Os fenólicos totais foram determinados pelo método de Folin-Ciocalteu. A atividade antioxidante foi avaliada pelos ensaios FRAP e DPPH. O líquido apresentou 270,06 ± 9,97 mg EAG g^{-1} de fenólicos totais. No ensaio FRAP, apresentou 16,40 ± 1,03 µmol TE g^{-1}. No ensaio DPPH, o IC_{50} foi de 0,43 ± 0,09 mg mL^{-1}. Os resultados evidenciam seu potencial como fonte de antioxidantes naturais. Além disso, contribuem para a valorização desse coproduto da carbonização da madeira.

Palavras-chave: Carbonização; Biomassa florestal; Compostos bioativos.

Bioactive Potential of Pyroligneous Liquid Obtained in a Kiln-Furnace System: Antioxidant Activity and Phenolic Compounds

Abstract: The search for natural antioxidants has increased due to concerns about synthetic antioxidants. Pyroligneous liquid, a co-product of wood carbonization, is rich in phenolic compounds. This study evaluated its phenolic content and antioxidant activity. The liquid was obtained from I144 clone logs (*Eucalyptus urophylla* × *Eucalyptus grandis).* Carbonization was performed in an experimental kiln-furnace system. Total phenolics were determined by the Folin–Ciocalteu method. Antioxidant activity was evaluated using FRAP and DPPH assays. The liquid contained 270.06 ± 9.97 mg GAE g^{-1} of phenolics. FRAP and DPPH showed 16.40 ± 1.03 µmol TE g^{-1} and IC_{50} of 0.43 ± 0.09 mg mL^{-1}, respectively. These results highlight its potential as a natural antioxidant source.

Keywords: Carbonization; Forest biomass; Bioactive compounds.

1. Introdução

Atualmente, antioxidantes sintéticos são os mais utilizados pela indústria para retardar processos oxidativos e aumentar a estabilidade de diversos produtos. No entanto, os potenciais riscos associados ao seu uso têm impulsionado a busca por antioxidantes alternativos,

principalmente de origem natural, considerados mais seguras e sustentáveis (Xu et al., 2021). Entre as fontes naturais de compostos com atividade antioxidante destaca-se o líquido pirolenhoso, um coproduto obtido durante a carbonização da madeira, rico quimicamente, em especial compostos fenólicos.

O líquido pirolenhoso é formado pela condensação dos vapores liberados durante a carbonização da biomassa lignocelulósica, processo que gera uma mistura complexa de água, compostos orgânicos e substâncias bioativas. Em sistemas tradicionais, esses vapores são normalmente liberados para a atmosfera, enquanto tecnologias como o sistema forno-fornalha permitem sua condensação e recuperação, reduzindo os impactos ambientais do processo e possibilitando o aproveitamento desse coproduto (Schettini et al., 2022).

Os compostos fenólicos presentes no líquido pirolenhoso são formados, em sua maioria, a partir da degradação térmica da lignina durante o processo de pirólise (Chang et al., 2025; Cândido et al., 2023). Entre esses compostos, alguns apresentam potencial antioxidante, atribuído à presença de anéis aromáticos ligados a grupos hidroxila, capazes de doar hidrogênio e elétrons para neutralizar radicais livres, moléculas altamente instáveis e reativas. Além disso, o anel aromático contribui para a estabilização dos radicais formados, favorecendo a atividade antioxidante desses compostos (Fu et al., 2023).

Diante desse contexto, este trabalho teve como objetivo determinar o teor de compostos fenólicos presentes no líquido pirolenhoso obtido em sistema forno-fornalha e avaliar sua atividade antioxidante. Os resultados poderão contribuir para ampliar o conhecimento sobre o potencial de aproveitamento desse coproduto como fonte de antioxidantes naturais.

2. Material e métodos

Obtenção do líquido pirolenhoso

O líquido pirolenhoso (LP) foi obtido a partir da carbonização da madeira do clone I144 (*Eucalyptus urophylla* S.T. Blake × *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden), com sete anos de idade. Para padronizar o processo, utilizaram-se toras com aproximadamente 1 m de comprimento, classificadas em três classes de diâmetro (10,5; 14,5 e 18,5 cm ± 1,5 cm). A carbonização foi realizada em um forno experimental de alvenaria com capacidade de 1 m³, operando conforme o Sistema Fornos-Fornalha (Schettini et al., 2022).

Para a recuperação do LP, foi acoplado à lateral da chaminé um sistema de condensação de gases constituído por estrutura metálica, sensores de temperatura e tubos condutores inclinados a 30°, favorecendo o escoamento do condensado. Os gases foram conduzidos por um

tubo metálico galvanizado conectado a um tubo de PVC, totalizando 6,6 m de extensão. Uma abertura localizada no início da tubulação de PVC permitiu a coleta do líquido condensado durante o resfriamento dos gases.

O monitoramento da temperatura foi realizado por meio de cinco termopares do tipo K distribuídos ao longo do sistema. A ignição inicial ocorreu com resíduos lignocelulósicos em um queimador central e, posteriormente, com resíduos vegetais na porta do forno. A carbonização foi conduzida mediante controle da entrada de ar e monitoramento da temperatura, sendo finalizada quando a frente de carbonização atingiu os últimos controladores. A coleta do líquido pirolenhoso foi iniciada quando a temperatura no duto atingiu 65 °C, sendo realizada na faixa de 65 a 85 °C, conforme medições obtidas por um termopar instalado próximo à entrada da tubulação. Posteriormente, o líquido coletado foi armazenado e filtrado em cadinho de porosidade nº 2 para remoção do alcatrão.

Determinação do teor de fenólicos totais

O teor de compostos fenólicos totais foi determinado pelo método de Folin-Ciocalteu, conforme Singleton et al. (1999), com modificações. Inicialmente, as amostras de líquido pirolenhoso foram diluídas em etanol na proporção de 1:500 (v/v), de forma a adequar sua concentração à faixa de linearidade do espectrofotômetro.

Em tubos de ensaio, adicionaram-se 1 mL da amostra diluída, 1 mL do reagente Folin-Ciocalteu a 50% (v/v) e 1 mL de carbonato de sódio a 10% (m/v), realizando-se agitação em vórtex por 10 segundos após cada adição. Em seguida, as amostras permaneceram em repouso por 1 hora, à temperatura ambiente e protegidas da luz.

A absorbância foi determinada a 765 nm em espectrofotômetro UV-Vis (Varian Cary, modelo 50 Probe). Paralelamente, foi construída uma curva analítica utilizando ácido gálico em dez concentrações distintas, sendo os resultados expressos em mg de equivalentes de ácido gálico por litro (mg EAG L^{-1}) de líquido pirolenhoso.

Poder Antioxidante Redutor Férrico (FRAP)

A atividade antioxidante pelo método FRAP foi determinada conforme Benzie e Strain (1996), com adaptação para microplacas de 96 poços. O reagente FRAP foi preparado pela mistura de tampão acetato (0,3 mol L^{-1}; pH 3,6), solução de TPTZ (10 mmol L^{-1} em HCl 40 mmol L^{-1}) e cloreto férrico (20 mmol L^{-1}), na proporção de 10:1:1.

As amostras foram solubilizadas em metanol nas concentrações de 100 e 200 mg mL^{-1}. Em cada poço foram adicionados 20 µL da amostra, 180 µL do reagente FRAP e 60 µL de metanol. Também foram preparados dois controles: o controle da amostra, contendo 20 µL da amostra e 240 µL de metanol, e o branco do reagente, composto por 180 µL do reagente FRAP e 80 µL de metanol.

Após a adição dos reagentes, as microplacas foram incubadas a 37 °C durante 30 minutos. Em seguida, a absorbância foi determinada a 595 nm. A atividade antioxidante foi expressa em equivalentes de Trolox, utilizando-se uma curva padrão construída com diferentes concentrações desse composto.

Ensaio de eliminação de radicais livres (DPPH)

A capacidade antioxidante foi avaliada pelo método de sequestro do radical DPPH, conforme Brand-Williams et al. (1995). Para isso, preparou-se uma solução de DPPH a 0,1 mmol L^{-1} em metanol.

A partir de uma solução estoque do líquido pirolenhoso a 10 mg mL^{-1}, foram realizadas diluições seriadas para obtenção das concentrações finais de 4,0; 2,0; 1,0; 0,5; 0,25 e 0,125 mg mL^{-1}. As reações foram conduzidas em microplacas de 96 poços, adicionando-se 25 µL da amostra e 175 µL da solução de DPPH em cada poço.

Foram utilizados dois controles: o controle da amostra, composto por 25 µL da amostra e 175 µL de metanol, e o controle do reagente, contendo 25 µL de metanol e 175 µL da solução de DPPH. Todas as determinações foram realizadas em triplicata.

Após incubação por 1 hora, a absorbância foi determinada a 517 nm. A atividade antioxidante foi calculada pela seguinte equação:

$$Atividadeantioxidante\,(\%) = \left[1 - (Absamostra - Absbranco)/Abscontrole\right] \times 100 \quad (1)$$

A concentração inibitória capaz de neutralizar 50% dos radicais DPPH (IC_{50}) foi determinada a partir das curvas dose-resposta, construídas com base na relação entre a concentração da amostra e a porcentagem de atividade antioxidante.

3. Resultados e discussão

Teor de compostos fenólicos

A determinação do teor de compostos fenólicos totais revelou que o líquido pirolenhoso apresentou 270,06 ± 9,97 mg EAG g^{-1}. A presença desses compostos está diretamente relacionada à degradação térmica da lignina durante a pirólise, processo que promove a ruptura de ligações químicas e a formação de compostos aromáticos posteriormente condensados no líquido pirolenhoso (Lu & Gu, 2022; Chang et al., 2025). Essa expressiva formação de fenólicos é favorecida pelo teor de lignina total característico da madeira do híbrido *Eucalyptus urophylla* × *Eucalyptus grandis*, que varia entre 28% e 31% (Gomes et al., 2024). Entre os compostos fenólicos predominantes nesse coproduto destacam-se derivados guaiacílicos, como o 2-metoxifenol (guaiacol), o 4-etil-2-metoxifenol e o creosol, reconhecidos como importantes constituintes da fração fenólica do líquido pirolenhoso (Ucella-Filho et al., 2024). Dessa forma, a lignina constitui o principal precursor desses compostos, influenciando diretamente a composição química e, consequentemente, a atividade antioxidante desse coproduto.

Atividade antioxidante

A atividade antioxidante determinada pelo método FRAP foi de 16,40 ± 1,03 µmol TE g^{-1}. Esse resultado demonstra a capacidade dos compostos fenólicos presentes no líquido pirolenhoso de transferir elétrons ao complexo férrico (Fe^{3+}-TPTZ), reduzindo-o à forma ferrosa (Fe^{2+}), mecanismo empregado por esse ensaio para estimar o poder antioxidante (Benzie & Strain, 1996). Essa capacidade está associada principalmente à presença de grupos hidroxila ligados aos anéis aromáticos dos compostos fenólicos, que favorecem a transferência de elétrons e conferem elevado poder redutor (Fu et al., 2023).

No ensaio DPPH, observou-se aumento da porcentagem de inibição dos radicais livres com o incremento da concentração da amostra (Figura 1). Esse comportamento é atribuído à maior disponibilidade de compostos antioxidantes capazes de doar hidrogênio ou elétrons ao radical DPPH, promovendo sua neutralização. Como consequência, foi obtido um IC_{50} de 0,43 ± 0,09 mg mL^{-1}, indicando elevada eficiência antioxidante, uma vez que baixas concentrações do líquido pirolenhoso foram suficientes para promover 50% de inibição dos radicais livres (Brand-Williams et al., 1995; Fu et al., 2023). Em conjunto, os resultados demonstram que a elevada concentração de compostos fenólicos está diretamente relacionada à atividade antioxidante observada nos ensaios FRAP e DPPH, evidenciando o potencial do líquido pirolenhoso obtido em sistema forno-fornalha como fonte de antioxidantes naturais e reforçando as perspectivas de valorização desse coproduto da carbonização da madeira. No entanto, como o líquido pirolenhoso bruto é uma matriz complexa que reúne compostos com diferentes funções (como ação antimicrobiana, fotoprotetora, retardante de chamas, carreadora,

entre outras), a avaliação desse extrato sem tratamento exige cautela. Assim, embora os resultados indiquem um bom potencial bioativo, etapas futuras de purificação ou fracionamento serão importantes para isolar as frações de interesse e permitir sua aplicação em produtos específicos.

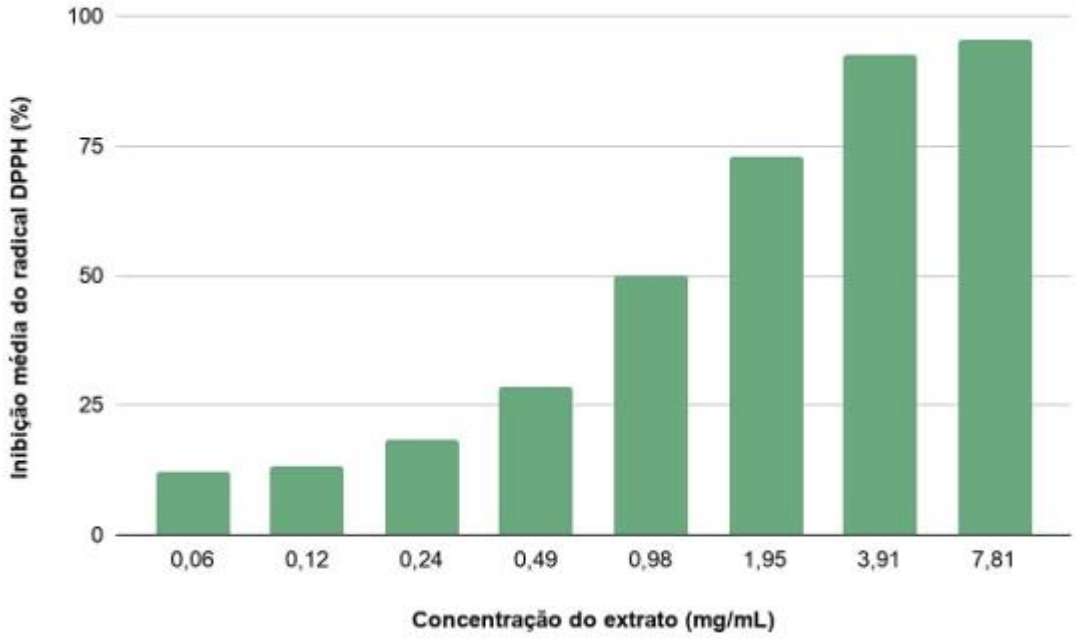


Figura 1 - Atividade antioxidante do líquido pirolenhoso em diferentes concentrações determinada pelo método DPPH.

4. Conclusões

O líquido pirolenhoso obtido durante a carbonização da madeira do clone I144 (*Eucalyptus urophylla* × *Eucalyptus grandis*) em sistema forno-fornalha apresentou elevado teor de compostos fenólicos e expressiva atividade antioxidante, evidenciada pelos ensaios FRAP e DPPH. Esses resultados demonstram o potencial desse coproduto como fonte de antioxidantes naturais, agregando valor ao processo de produção de carvão vegetal e favorecendo o aproveitamento sustentável da biomassa florestal. Além disso, o estudo fornece subsídios para futuras pesquisas voltadas ao isolamento e à caracterização dos compostos bioativos presentes no líquido pirolenhoso, bem como à avaliação de suas potenciais aplicações nas indústrias de alimentos, farmacêutica, cosmética e agrícola.

5. Agradecimentos

Á Universidade Federal de Viçosa (UFV), ao Departamento de Engenharia Florestal (DEF), ao Laboratório de Painéis e Energia da Madeira (LAPEM), ao Laboratório de Resíduos da Indústria Florestal (LABRIF), ao Laboratório de Biodiversidade (BIOPROS), à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG), ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

6. Referências bibliográficas

Benzie, I. F. F., & Strain, J. J. (1996). The ferric reducing ability of plasma (FRAP) as a measure of antioxidant power: The FRAP assay. *Analytical Biochemistry, 239*(1), 70–76. https://doi.org/10.1006/abio.1996.0292

Brand-Williams, W., Cuvelier, M. E., & Berset, C. (1995). Use of a free radical method to evaluate antioxidant activity. *LWT – Food Science and Technology, 28*(1), 25–30. https://doi.org/10.1016/S0023-6438(95)80008-5

Cândido, N. R., Pasa, V. M. D., Vilela, A. de O., Campos, Â. D., de Fátima, Â., & Modolo, L. V. (2023). Understanding the multifunctionality of pyroligneous acid from waste biomass and the potential applications in agriculture. *Science of the Total Environment, 881*, 163519. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.163519

Chang, Z., Xu, Q., Yan, S., Liu, Y., Geng, F., Yuan, S., Yao, X., Ma, N., Wang, K., Song, G., & Jiang, J. (2025). Film based on chitosan and wood vinegar with superior antioxidant, UV-shielding, and bacteriostatic properties for food packaging. *Food Hydrocolloids, 167*, 111430. https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2025.111430

Fu, Y. H., Zhang, Y., Wang, F., Zhao, L., Shen, G. B., & Zhu, X. Q. (2023). Quantitative evaluation of the actual hydrogen atom donating activities of O-H bonds in phenols: Structure–activity relationship. *RSC Advances, 13*(5), 3295–3305. https://doi.org/10.1039/D2RA06877J

Gomes, G. S. L., Oliveira Neto, S. N., Carneiro, A. C. O., Lopes, L. S. S., Leite, H. G., & Caldeira, M. V. W. (2024). Influence of spacing between trees on wood and charcoal quality indicators. *Cerne, 30*, e-103270. https://doi.org/10.1590/01047760202430013270

Igliński, B., Kujawski, W., & Kiełkowska, U. (2023). Pyrolysis of waste biomass: Technical and process achievements, and future development—A review. *Energies, 16*(4), 1829. https://doi.org/10.3390/en16041829

Lu, X., & Gu, X. (2022). A review on lignin pyrolysis: Pyrolytic behavior, mechanism, and relevant upgrading for improving process efficiency. *Biotechnology for Biofuels and Bioproducts, 15*, 106. https://doi.org/10.1186/s13068-022-02203-0

Schettini, B. L. S., Jacovine, L. A. G., Torres, C. M. M. E., Carneiro, A. de C. O., Villanova, P. H., Rocha, S. J. S. S. da, Rufino, M. P. M. X., Silva, L. B., & Castro, R. V. O. (2022). Furnace-kiln system: How does the use of new technologies in charcoal production affect the carbon balance? *Industrial Crops and Products, 187*, 115330. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2022.115330

Singleton, V. L., Orthofer, R., & Lamuela-Raventós, R. M. (1999). Analysis of total phenols and other oxidation substrates and antioxidants by means of Folin-Ciocalteu reagent. *Methods in Enzymology, 299*, 152–178. https://doi.org/10.1016/S0076-6879(99)99017-1

Wang, W., Xiong, P., Zhang, H., Zhu, Q., Liao, C., & Jiang, G. (2021). Analysis, occurrence, toxicity and environmental health risks of synthetic phenolic antioxidants: A review. *Environmental Research, 201*, 111531. https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.111531

Xu, X., Liu, A., Hu, S., Ares, I., Martínez-Larrañaga, M. R., Wang, X., Martínez, M., Anadón, A., & Martínez, M. A. (2021). Synthetic phenolic antioxidants: Metabolism, hazards and mechanism of action. *Food Chemistry, 353*, 129488. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.129488

Ucella-Filho, J. G. M., Oliveira, A. C., Silva, M. R., Santos, F. A., & Costa, L. M. (2024). Purified pyroligneous extract from Citrus sinensis waste wood: Chemical characterization and antibacterial activity against Staphylococcus aureus associated with bovine mastitis. *Industrial Crops and Products, 218*, 118854. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2024.118854

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Potencial biotecnológico da casca residual de *Eucalyptus cloeziana* F. Muell. como fonte de compostos antimicrobianos

Camila da Silva Bonjour[1]; Juliana Alves Resende[2]; Nicolly Soares Ferreira[2]; Eric Rodrigues de Araújo[1]; Lara Luísa Mendes Nascimento[1]; Lucas José de Oliveira Valente[1]; Maria Eduarda Grigolate Campos[1]; João Gilberto Meza Ucella-Filho[1]

[1] Universidade Federal de Viçosa
[2] Universidade Federal do Espírito Santo

Resumo: A casca residual de *Eucalyptus cloeziana* F. Muell. representa uma biomassa florestal com potencial para obtenção de compostos bioativos. Desse modo, este estudo avaliou o potencial antimicrobiano do extrato da casca residual. A casca foi seca, moída e submetida à extração sequencial com diclorometano e etanol. O teor de taninos condensados foi determinado pelo índice de Stiasny, a atividade antimicrobiana foi avaliada por concentração inibitória mínima (CIM), bactericida mínima (CBM) e fungicida mínima (CFM), utilizando *Staphylococcus aureus*, *Escherichia coli* e *Candida albicans*. A casca apresentou 4,02% de taninos condensados e índice de Stiasny de 93,79%. O extrato apresentou atividade bactericida contra *S. aureus* a 0,625% (6,25 mg mL^{-1}) e contra *E. coli* a 5% (50 mg mL^{-1}), enquanto para *C. albicans* foi observado apenas efeito fungistático parcial. Os resultados demonstram que a casca residual de *E. cloeziana* constitui uma fonte promissora de taninos com atividade predominantemente antibacteriana, reforçando seu potencial para valorização biotecnológica de resíduos florestais.

Palavras-chave: Bioatividade; Taninos condensados; Valorização de resíduos.

Biotechnological potential of residual bark from *Eucalyptus cloeziana* F. Muell. as a source of antimicrobial compounds

Abstract: Residual bark from *Eucalyptus cloeziana* F. Muell. represents a forest biomass with potential as a source of bioactive compounds. This study evaluated the antimicrobial potential of bark extract obtained from this biomass. The bark was dried, ground, and subjected to sequential extraction with dichloromethane and ethanol. Condensed tannin content was determined using the Stiasny index, and antimicrobial activity was assessed by broth microdilution against *Staphylococcus aureus*, *Escherichia coli*, and *Candida albicans*. The bark contained 4.02% condensed tannins and exhibited a Stiasny index of 93.79%. The extract showed bactericidal activity against S. aureus at 0.625% (6.25 mg mL^{-1}) and against *E. coli* at 5% (50 mg mL^{-1}), whereas only a partial fungistatic effect was observed against *C. albicans*. These findings demonstrate that residual bark from E. cloeziana is a promising source of bioactive compounds with predominantly antibacterial activity, highlighting its potential for the biotechnological valorization of forest residues.

Keywords: Bioactivity; Condensed tannins; Waste valorization.

1. Introdução

As doenças infecciosas causadas por microrganismos patogênicos permanecem entre os principais desafios à saúde global, cenário agravado pela disseminação progressiva da resistência aos agentes antimicrobianos. O uso extensivo e, muitas vezes, inadequado desses fármacos tem favorecido a seleção de populações resistentes, reduzindo a eficácia dos tratamentos disponíveis e restringindo as alternativas terapêuticas para infecções bacterianas e fúngicas (Qadri et al., 2022; Arip et al., 2022). Paralelamente, a limitada disponibilidade de novos agentes capazes de superar mecanismos de resistência reforça a necessidade de explorar fontes químicas ainda subaproveitadas. Nesse contexto, os produtos naturais de origem vegetal têm despertado crescente interesse por constituírem reservatórios de moléculas estrutural e funcionalmente diversas, capazes de atuar sobre diferentes alvos microbianos. Compostos fenólicos, flavonoides, taninos, terpenoides, alcaloides e saponinas podem comprometer membranas celulares, interferir em proteínas e enzimas essenciais e modular mecanismos associados à resistência, sendo que a atividade dos extratos frequentemente resulta da ação conjunta desses metabólitos (Wink et al., 2012; Fik-Jaskółka et al., 2024; Laskoski et al., 2022).

Entre os grupos vegetais com maior potencial destaca-se o gênero *Eucalyptus*, reconhecido tanto por sua importância econômica quanto por sua diversidade fitoquímica. Suas espécies apresentam ampla variedade de compostos voláteis e não voláteis, incluindo terpenos e fenólicos, cuja composição varia conforme a espécie, o tecido vegetal e o método de extração (Barbosa et al., 2016). Essa diversidade se reflete em atividades antibacterianas e antifúngicas já demonstradas para diferentes espécies do gênero (Fayez et al., 2023; Sabo & Knežević, 2019). Nesse contexto, *Eucalyptus cloeziana* F. Muell. destaca-se pela presença de fenólicos, flavonoides, terpenoides, taninos, alcaloides, quinonas e saponinas (Alamu et al., 2025), enquanto sua casca residual representa uma biomassa de interesse por concentrar compostos bioativos e ser gerada em grande quantidade durante o processamento da madeira. Estudos com outras espécies de *Eucalyptus* demonstram que a casca constitui uma fonte promissora de compostos fenólicos, favorecendo a valorização de resíduos florestais em consonância com os princípios da bioeconomia circular (Sartori et al., 2018; Salem et al., 2026).

Apesar desse potencial, a atividade antimicrobiana da casca residual de *E. cloeziana* ainda permanece pouco conhecida. Embora cascas de outras espécies apresentem atividade frente a bactérias e fungos (Luís et al., 2014; Salem et al., 2026), a composição química e a bioatividade dos extratos dependem da espécie, do tecido vegetal e do método de extração, limitando a extrapolação desses resultados. Diante disso, o presente estudo teve como objetivo

avaliar o potencial antimicrobiano do extrato obtido da casca residual de *E. cloeziana*, contribuindo para a caracterização de sua bioatividade e para a valorização biotecnológica de um resíduo da cadeia florestal.

2. Material e métodos

2.1. Obtenção e processamento da casca

A casca residual de *Eucalyptus cloeziana*, proveniente de uma empresa do setor florestal localizada em Itamarandiba, Minas Gerais, foi processada no Laboratório de Resíduos da Indústria Florestal do Departamento de Engenharia Florestal da Universidade Federal de Viçosa (UFV). O material foi seco em estufa com circulação forçada de ar a 60 °C até massa constante, moído em moinho tipo Wiley e classificado granulometricamente.

Para obtenção dos extratos, 50 g da casca foram submetidos à extração sequencial por percolação exaustiva, inicialmente com diclorometano e, posteriormente, com etanol. Os extratos obtidos foram concentrados para remoção dos solventes e armazenados até a realização das análises microbiológicas.

Para a determinação dos taninos condensados, foi preparado um extrato aquoso por refluxo. Após a extração, o sistema foi resfriado à temperatura ambiente e o extrato foi inicialmente filtrado em tecido tipo flanela para separação do resíduo sólido. Em seguida, realizou-se filtração a vácuo para remoção de partículas finas, sendo o extrato concentrado em chapa aquecedora até um volume aproximado de 100 mL.

2.2. Determinação do teor de taninos condensados

O teor de taninos condensados foi determinado por meio da quantificação do teor de sólidos totais (TST), do índice de Stiasny (IS) e do teor de taninos condensados (TTC).

Para determinação do TST, uma alíquota de 20 mL do extrato foi seca em estufa a 103 ± 2 °C por 24 horas, sendo posteriormente resfriada em dessecador até massa constante. O teor de sólidos totais foi calculado pela equação:

$$\text{TST (\%)} = (\text{massa seca do extrato} / \text{massa seca da amostra}) \times 100$$

O índice de Stiasny foi determinado conforme o método proposto por Guangcheng et al. (1991). Para isso, foram adicionados 4 mL de formaldeído e 1 mL de ácido clorídrico concentrado (HCl) a uma alíquota de 20 mL do extrato. A mistura foi aquecida por 35 minutos,

filtrada a vácuo e o precipitado obtido foi seco em estufa a 103 ± 2 °C. O índice de Stiasny foi calculado pela equação:

IS (%) = (massa do precipitado seco / massa seca dos sólidos na alíquota) × 100

O teor de taninos condensados foi obtido pela relação:

$$TTC\ (\%) = (TST \times IS) / 100$$

2.3. Avaliação da atividade antimicrobiana

A atividade antimicrobiana foi avaliada frente às cepas *Staphylococcus aureus* ATCC 25923, *Escherichia coli* ATCC 25922 e *Candida albicans* ATCC 24433, utilizando o método de microdiluição em caldo adaptado das diretrizes do Clinical and Laboratory Standards Institute (CLSI).

As suspensões microbianas foram padronizadas para turbidez equivalente a 0,5 da escala de McFarland e expostas, em triplicata, às concentrações de 0,625 a 10% (6,25 a 100 mg mL^{-1}) do extrato.

Em razão da coloração natural da amostra, a viabilidade microbiana foi confirmada pelo plaqueamento de alíquotas de 10 µL em meio sólido. A concentração inibitória mínima (CIM) e as concentrações bactericida mínima (CBM) e fungicida mínima (CFM) foram determinadas conforme as recomendações do CLSI para ensaios de microdiluição e avaliação da atividade bactericida e fungicida (CLSI, 1999; CLSI, 2017; CLSI, 2024).

Os ensaios incluíram controle de esterilidade (caldo sem inóculo), controle de crescimento (inóculo sem tratamento), controle do extrato sem inóculo, para verificação de possível interferência da coloração, e controle positivo antimicrobiano. A CBM e a CFM foram definidas como as menores concentrações capazes de impedir completamente o crescimento microbiano após o plaqueamento, enquanto reduções parciais no número de colônias foram interpretadas como efeito bacteriostático ou fungistático.

3. Resultados e discussão

A casca residual de *Eucalyptus cloeziana* apresentou teor de sólidos totais de 4,29%, índice de Stiasny de 93,79% e teor de taninos condensados de 4,02%. A elevada proximidade entre os valores de TST e TTC indica que aproximadamente 94% da fração aquossolúvel

correspondeu a compostos reativos ao formaldeído, evidenciando a predominância de taninos condensados entre os constituintes extraídos. Embora o rendimento global de sólidos tenha sido relativamente baixo, a elevada pureza da fração fenólica obtida sugere que a casca constitui uma fonte concentrada desses metabólitos. Esse resultado está em consonância com estudos que demonstram que cascas de espécies de *Eucalyptus* podem acumular elevadas concentrações de compostos fenólicos, especialmente taninos, associados a diferentes atividades biológicas, incluindo ação antimicrobiana (Yılmaz et al., 2024).

O extrato apresentou atividade antimicrobiana distinta entre os microrganismos avaliados, evidenciando maior eficácia frente à bactéria Gram-positiva *Staphylococcus aureus*. Para essa espécie, a CIM e a CBM coincidiram na menor concentração testada (0,625%; 6,25 mg mL^{-1}), indicando que o extrato foi capaz não apenas de inibir, mas também de eliminar completamente o crescimento bacteriano nessa concentração. Em contraste, Escherichia coli apresentou CIM e CBM de 5% (50 mg mL^{-1}), demonstrando menor suscetibilidade ao extrato e exigindo concentração aproximadamente oito vezes superior para obtenção do mesmo efeito bactericida.

Tabela 1 – Concentração Inibitória Mínima (CIM), Concentração Bactericida Mínima (CBM), Concentração Fungicida Mínima (CFM) e Atividade Antimicrobiana do Extrato da Casca Residual de *Eucalyptus cloeziana* Frente aos Microrganismos Avaliados

Microrganismo	**CIM**	**CBM/CFM**	**Atividade observada**
Staphylococcus aureus	0,625% (6,25 mg mL^{-1})	0,625% (6,25 mg/mL^{-1})	Bactericida
Escherichia coli	5% (50 mg mL^{-1})	5% (50 mg/mL^{-1})	Bactericida
Candida albicans	—	Não observada	Fungistática parcial

Nota: CFM não foi observada para *Candida albicans* nas concentrações avaliadas.

Essa diferença de suscetibilidade é compatível com o padrão frequentemente descrito para extratos vegetais. A maior resistência de bactérias Gram-negativas está relacionada, em parte, à presença da membrana externa rica em lipopolissacarídeos, que atua como barreira física à difusão de diversos compostos bioativos. Em contrapartida, bactérias Gram-positivas, como *S. aureus*, possuem parede celular mais permeável a metabólitos fenólicos, favorecendo

sua interação com alvos intracelulares. Diferenças semelhantes entre *S. aureus* e *E. coli* foram relatadas por Packer et al. (2015) e Moungang et al. (2023), reforçando que a arquitetura celular exerce influência significativa sobre a suscetibilidade aos extratos vegetais.

Para *Candida albicans*, não foi observada atividade fungicida nas concentrações avaliadas, uma vez que células viáveis permaneceram presentes após o plaqueamento. Entretanto, a redução do número de colônias em relação ao controle de crescimento evidencia que o extrato exerceu efeito fungistático parcial, indicando capacidade de limitar a proliferação celular sem promover a eliminação completa do microrganismo. Esse comportamento sugere que os constituintes presentes no extrato interferem em processos fisiológicos do fungo, embora em intensidade insuficiente para produzir efeito fungicida nas condições experimentais empregadas (Bhargava et al., 2025; Rautemaa-Richardson et al., 2026).

Em conjunto, os resultados demonstram que a casca residual de *E. cloeziana* constitui uma fonte promissora de compostos bioativos com atividade predominantemente antibacteriana. A presença de taninos condensados observada fornece uma explicação química para a atividade antimicrobiana, uma vez que esses compostos apresentam reconhecida capacidade de interagir com proteínas, enzimas e componentes estruturais da parede e da membrana celular microbiana promovendo alterações na permeabilidade celular, desnaturação de proteínas e inibição de enzimas essenciais ao metabolismo microbiano (Bouhlel et al., 2026; Otify et al., 2022). Entretanto, a atividade de extratos vegetais raramente pode ser atribuída a um único grupo de metabólitos. É mais provável que o efeito observado resulte da atuação conjunta de diferentes constituintes fenólicos e não fenólicos, incluindo flavonoides, terpenoides e outros metabólitos secundários, cujas interações podem produzir efeitos aditivos ou sinérgicos sobre múltiplos alvos celulares (Newman & Cragg, 2020; Bouhlel et al., 2026).

Destaca-se que a atividade antimicrobiana foi avaliada utilizando o extrato bruto, sem fracionamento químico ou identificação individual dos compostos bioativos. Dessa forma, embora os resultados demonstrem claramente o potencial biológico da casca residual de *E. cloeziana*, não é possível estabelecer quais metabólitos são diretamente responsáveis pela atividade observada. Estudos futuros envolvendo o fracionamento do extrato, a caracterização química por técnicas cromatográficas e espectrométricas e a avaliação frente a um conjunto mais amplo de microrganismos poderão aprofundar a compreensão dos mecanismos envolvidos e ampliar as perspectivas de aplicação biotecnológica desse resíduo florestal (Chai et al., 2023; Bouhlel et al., 2026; Otify et al., 2022).

4. Conclusões

A casca residual de *E. cloeziana* apresentou potencial como fonte de compostos bioativos, evidenciado pela presença de taninos condensados e pela atividade antimicrobiana do extrato. O efeito foi mais pronunciado contra *S. aureus*, para o qual o extrato apresentou ação bactericida na menor concentração avaliada, enquanto *E. coli* demonstrou menor suscetibilidade e *C. albicans* apresentou apenas resposta fungistática parcial. Os resultados demonstram que a casca residual de *Eucalyptus cloeziana* representa uma matéria-prima promissora para obtenção de compostos antimicrobianos de origem natural, reforçando seu potencial de inserção em estratégias de valorização de resíduos e bioeconomia circular.

Estudos futuros envolvendo o fracionamento do extrato, a identificação química dos compostos bioativos e a avaliação de sua atividade frente a outros microrganismos poderão ampliar a compreensão dos mecanismos envolvidos e expandir o potencial de aplicação desse resíduo florestal.

5. Agradecimentos

À Universidade Federal de Viçosa (UFV), ao Departamento de Engenharia Florestal (DEF), ao Laboratório de Resíduos da Indústria Florestal (LABRIF), à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG – Projeto APQ-02997-25), ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES – Código de Financiamento 001) pelo apoio à realização deste trabalho.

6. Referências bibliográficas

Alamu, O. T., Nwogwugwu, J. O., & Ayandokun, A. E. (2025). Termite resistance and phytochemical profiles of three Eucalyptus species and Corymbia (Eucalyptus) citriodora. Journal of Wood Chemistry and Technology, 45(2), 63–70. https://doi.org/10.1080/02773813.2025.2468637

Arip, M., Selvaraja, M., R, M., Tan, L. F., Leong, M. Y., Tan, P. L., Yap, V. L., Chinnapan, S., Tat, N. C., Abdullah, M., K, D., & Jubair, N. (2022). Review on plant-based management in combating antimicrobial resistance: Mechanistic perspective. Frontiers in Pharmacology, 13, 879495. https://doi.org/10.3389/fphar.2022.879495

Barbosa, L. C. A., Filomeno, C. A., & Teixeira, R. R. (2016). Chemical variability and biological activities of Eucalyptus spp. essential oils. Molecules, 21(12), 1671. https://doi.org/10.3390/molecules21121671

Bhargava, A., Klamer, K., Sharma, M., Ortiz, D., & Saravolatz, L. (2025). Candida auris: A continuing threat. Microorganisms, 13(3), 652. https://doi.org/10.3390/microorganisms13030652

Bouhlel, W., Doğan, M., Yetiman, A. E., Horzum, M., & Kanbur, E. (2026). Investigation of the microbiocidal, antioxidant, and cytotoxic effects of Cinnamomum verum (cinnamon), Origanum onites (oregano balls), and Origanum vulgare (black oregano) hydrosols: A model food environment-driven usability study. Food and Bioprocess Technology, 19, Article 166. https://doi.org/10.1007/s11947-026-04258-5

Chai, X., Huang, X., Zhang, T., Wu, K., Duan, X., Yu, H., & Liu, X. (2023). Comparative study of E-nose, GC-MS, and GC-IMS to distinguish star anise essential oil extracted using different extraction methods. Separations, 10(4), 256. https://doi.org/10.3390/separations10040256

Clinical and Laboratory Standards Institute. (1999). Methods for determining bactericidal activity of antimicrobial agents (CLSI Guideline M26-A). Clinical and Laboratory Standards Institute.

Clinical and Laboratory Standards Institute. (2017). Reference method for broth dilution antifungal susceptibility testing of yeasts (4th ed., CLSI Standard M27). Clinical and Laboratory Standards Institute.

Clinical and Laboratory Standards Institute. (2024). Methods for dilution antimicrobial susceptibility tests for bacteria that grow aerobically (12th ed., CLSI Standard M07). Clinical and Laboratory Standards Institute.

Fayez, S., Gamal El-Din, M. I., Moghannem, S. A., Azam, F., El-Shazly, M., Korinek, M., Chen, Y.-L., Hwang, T.-L., & Fahmy, N. M. (2023). Eucalyptus-derived essential oils alleviate microbes and modulate inflammation by suppressing superoxide and elastase release. Frontiers in Pharmacology, 14, 1218315. https://doi.org/10.3389/fphar.2023.1218315

Fik-Jaskółka, M., Mittova, V., Motsonelidze, C., Vakhania, M., Vicidomini, C., & Roviello, G. N. (2024). Antimicrobial metabolites of Caucasian medicinal plants as alternatives to antibiotics. Antibiotics, 13(6), 487. https://doi.org/10.3390/antibiotics13060487

Laskoski, L. V., Bandeira, D. M., Batista, J. M., da Costa, W. F., Baeza, L. C., Kuo, L. H., & da S. Pinto, F. G. (2022). Phytochemical prospection and evaluation of antimicrobial, antioxidant and antibiofilm activities of extracts and essential oil from leaves of Myrsine umbellata Mart.

(Primulaceae). Brazilian Journal of Biology, 82, e263865. https://doi.org/10.1590/1519-6984.263865

Luís, Â., Neiva, D. M., Pereira, H., Gominho, J., Domingues, F., & Duarte, A. P. (2014). Stumps of Eucalyptus globulus as a source of antioxidant and antimicrobial polyphenols. Molecules, 19(10), 16428–16446. https://doi.org/10.3390/molecules191016428

Moungang, L. M., Ndemangou, B., Ache, R. N., Sidjui, L. S., Ngandjui, Y. A., Ngueukam, N., Kamga, H. G., & Ngameni, B. (2023). Phytochemical screening and potential antibacterial, antifungi and antioxidative activities of the leaves extracts of Piperomia pellucida (Piperaceae). Journal of Applied Life Sciences International, 26(5), 35–46. https://doi.org/10.9734/jalsi/2023/v26i5617

Newman, D. J., & Cragg, G. M. (2020). Natural products as sources of new drugs over the nearly four decades from 01/1981 to 09/2019. Journal of Natural Products, 83(3), 770–803. https://doi.org/10.1021/acs.jnatprod.9b01285

Otify, A. M., Serag, A., Porzel, A., Wessjohann, L. A., & Farag, M. A. (2022). NMR metabolome-based classification of Cymbopogon species: A prospect for phyto-equivalency of its different accessions using chemometric tools. Food Analytical Methods, 15, 2095–2106. https://doi.org/10.1007/s12161-022-02257-8

Packer, J. M., Naz, T., Yaegl Community Elders, Harrington, D., Jamie, J. F., & Vemulpad, S. R. (2015). Antimicrobial activity of customary medicinal plants of the Yaegl Aboriginal community of northern New South Wales, Australia: A preliminary study. BMC Research Notes, 8, 276. https://doi.org/10.1186/s13104-015-1258-x

Qadri, H., Shah, A. H., Ahmad, S. M., Alshehri, B., Almilaibary, A., & Mir, M. A. (2022). Natural products and their semi-synthetic derivatives against antimicrobial-resistant human pathogenic bacteria and fungi. Saudi Journal of Biological Sciences, 29(9), 103376. https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2022.103376

Rautemaa-Richardson, R., Sobel, J. D., Stone, N., De Seta, F., Cassone, A., Vieira-Baptista, P., Comar, M., Warris, A., & Roselletti, E. (2026). State-of-the-art review: Managing vulvovaginal candidiasis. Clinical Infectious Diseases, 82(3), 371–382. https://doi.org/10.1093/cid/ciaf673

Sabo, V. A., & Knežević, P. (2019). Antimicrobial activity of Eucalyptus camaldulensis Dehn. plant extracts and essential oils: A review. Industrial Crops and Products, 132, 413–429. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2019.02.051

Salem, M. Z. M., Elshaer, M. A. A., Mohamed, A. A., Abd-Elraheem, M. A. M., Abd-Elhamed, W., & Emam, T. M. (2026). Phytochemical analysis of green-branch bark extract and the brown gum exudates “kinos” from Eucalyptus camaldulensis by HPLC and GC–MS with their antifungal activity. Scientific Reports, 16, 7480. https://doi.org/10.1038/s41598-026-38109-2

Sartori, C. J., Mota, G. S., Miranda, I., Mori, F. A., & Pereira, H. (2018). Tannin extraction and characterization of polar extracts from the barks of two Eucalyptus urophylla hybrids. BioResources, 13(3), 4820–4831. https://doi.org/10.15376/biores.13.3.4820-4831

Wink, M., Ashour, M. L., & El-Readi, M. Z. (2012). Secondary metabolites from plants inhibiting ABC transporters and reversing resistance of cancer cells and microbes to cytotoxic and antimicrobial agents. Frontiers in Microbiology, 3, 130. https://doi.org/10.3389/fmicb.2012.00130

Yılmaz, B., Tabbouche, S., Deniz, İ., Kılıç, A. O., & Can, Z. (2024). Investigation of some tree bark extracts and essential oils for antioxidant, antimicrobial and anti-quorum sensing activities. Kastamonu University Journal of Forestry Faculty, 24(3), 292–301. https://doi.org/10.17475/kastorman.1599973

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Potencial da casca de Corymbia citriodora x Corymbia torelliana na produção sustentável de adesivos

Giovanna Sabino de Andrade[1]; Davi Souza Vieira[2]; Arthur Vieira Fantauzzi[2]; Gustavo Pereira Santos[2]; Ana Márcia Macedo Ladeira Carvalho[2].

[1] Universidade Federal de Viçosa (UFV)
[2] Universidade Federal de Viçosa (UFV)

Resumo: A crescente preocupação ambiental e a necessidade de investimento em meios sustentáveis de produção tornaram-se um grande incentivo para a realização de pesquisas no âmbito florestal, com o objetivo de descobrir bioprodutos e reaproveitar materiais considerados resíduos. Nesse contexto, objetivou-se neste estudo caracterizar o potencial de taninos condensáveis presentes na casca de híbridos de Corymbia citriodora x Corymbia torelliana para a produção de adesivos, visando a reutilização deste subproduto e introdução de uma matéria-prima de baixo custo. Para isso, foram realizados testes para quantificar a composição química do material, como o Índice de Stiasny, e para determinar a maneira mais eficiente de extrair as substâncias tânicas presentes na casca. Assim, observou-se a correlação entre três fatores, sendo eles a adição de diferentes porcentagens de sulfito de sódio anidro, em três tempos de reação, à três temperaturas distintas. Desta forma, foi possível observar que a casca do híbrido C. citriodora x C. torelliana possui um potencial químico geral altamente rentável para o setor produtivo florestal, podendo ser aplicado em diversas zonas industriais. No entanto, o baixo teor de sólidos totais (inferior a 1,5%) e baixo Índice de Stiasny, não ultrapassando 30%, mostra um resultado não satisfatório para utilização do híbrido visando a obtenção de produtos tânicos para produção de adesivos para madeira.

Palavras-chave: taninos; bioprodutos; extração.

Potential of Corymbia citriodora x Corymbia torelliana bark for sustainable adhesive production

Abstract: Growing environmental concerns and the need to invest in sustainable production methods have spurred forestry research aimed at discovering bioproducts and repurposing materials previously considered waste. In this context, this study aimed to characterize the potential of condensed tannins found in the bark of *Corymbia citriodora* x *Corymbia torelliana* hybrids for adhesive production, seeking to reuse this byproduct and introduce a low-cost raw material. To this end, tests were conducted to quantify the material's chemical composition—such as the Stiasny Index—and to determine the most efficient method for extracting the tannic substances present in the bark. The study examined the interplay of three factors: the addition of varying percentages of anhydrous sodium sulfite, three different reaction times, and three distinct temperatures. The results indicated that the bark of the *C. citriodora* x *C. torelliana* hybrid holds significant chemical potential for the forestry sector, with possible applications across various industries. However, the low total solids content (below 1.5%) and the low Stiasny Index (not exceeding 30%) suggest that this hybrid is not a suitable source of tannins for the production of wood adhesives.

Keywords: tannins; bioproducts; extraction.

1. Introdução

A crescente preocupação com as mudanças climáticas e a busca por alternativas sustentáveis têm impulsionado o desenvolvimento de tecnologias voltadas ao melhor aproveitamento dos recursos florestais e à reutilização de resíduos gerados pelo setor. Nesse contexto, a indústria florestal é responsável pela geração de cerca de 28.000 toneladas/ano de resíduos (NATALLI, 2020), o que reforça a necessidade de agregar valor a subprodutos por meio de aplicações industriais.

Assim, a casca destaca-se como um material de elevado potencial, por apresentar quantidades significativas de celulose, hemicelulose, lignina, cinzas e extrativos, entre os quais se sobressaem os taninos condensáveis (MISHRA; MOHANTY, 2018). Além de representar uma matéria-prima de baixo custo, sua utilização possibilita a produção de bioprodutos, biocombustíveis e compostos bioquímicos, contribuindo para a economia circular e para a redução do desperdício (ABRAHAM et al., 2020).

Os taninos são compostos polifenólicos capazes de formar complexos estáveis com diferentes macromoléculas, característica que favorece sua aplicação na indústria de couro, alimentos e, principalmente, na produção de adesivos para madeira (CHAVES et al., 2021). Nesse cenário, os adesivos à base de taninos surgem como uma alternativa para os adesivos de origem petroquímica, mostrando-se altamente competitivos, na esfera ambiental e econômica (ARIAS et al., 2022).

Entre as possíveis fontes desses compostos, destacam-se os híbridos do gênero *Corymbia*. O híbrido *Corymbia citriodora* × *Corymbia torelliana* apresenta rápido crescimento, elevada resistência a pragas e doenças e amplo potencial de utilização industrial (DAS et al., 2020).

Dessa forma, este estudo teve como objetivo caracterizar quimicamente a casca do híbrido *Corymbia citriodora* × *Corymbia torelliana*, para quantificar seu potencial para extração de taninos condensáveis e avaliar a sua viabilidade como matéria-prima sustentável e de baixo custo para geração de bioprodutos.

2. Material e métodos

2.1 Caracterização química da casca

A casca do híbrido *Corymbia citriodora* × *Corymbia torelliana* foi caracterizada quimicamente por meio de metodologias padronizadas (TAPPI, SCAN, Pereira, Scott e EN 15104), abrangendo a determinação de extrativos totais, suberina, ácidos urônicos,

carboidratos, lignina solúvel e insolúvel, cinzas, composição elementar (CNHS-O), composição mineral e poder calorífico superior (PCS).

2.2 Extração de taninos

Para realizar a extração de taninos, foram pesadas 20 g (% a.s.) da casca do híbrido e adicionados a béqueres, juntamente com água, em uma proporção de água/casca de 20:1 (m/m). Em seguida, acrescentou-se as porcentagens de sulfito de sódio anidro P.A/ACS, em relação a massa seca da casca, em quatro tratamentos, mantendo uma testemunha a 0% e as demais a 2%, 4% e 6%.

Depois de adicionado o sal, os béqueres foram tampados com papel alumínio e levados para extração em banho maria. Foram aquecidos em três variações de temperatura e tempo, além de serem preparadas triplicatas para cada tratamento, sendo eles 60º C, 75º C e 90º C, com os tempos de 90, 120 e 180 minutos, respectivamente.

Por fim, após o banho maria, o extrato resultante foi filtrado com a utilização de uma peneira com malha de 1,0 mm², e a solução obtida foi deixada em repouso durante 24 horas. Posteriormente, foi retirado o sobrenadante formado e o líquido foi novamente filtrado. A solução resultante foi condensada em um extrator soxhlet até atingir 150 mL.

2.3 Determinação do teor de sólidos

A partir da solução concentrada formada, pode-se realizar a determinação do teor de sólidos. Foram preparadas duplicatas em placas de Petri, contendo 5 g do extrato concentrado e levadas para a estufa à temperatura de 105º C ± 5º C, até que as amostras atingissem massa constante. Depois de atingido o equilíbrio, o teor de sólidos (equação 1) pôde ser calculado a partir da diferença de massa.

$$TS = \frac{(M2 - M1)}{M1} \times 100 \qquad (1)$$

Onde TS: teor de sólidos (%); M1: massa inicial do extrato (g); M2: massa final do extrato (g).

2.4 Determinação de polifenóis pela reação de Stiasny

Para determinação de polifenóis pela reação de Stiasny, foram misturados 20 g do extrato concentrado, 10 g de água deionizada, 4 mL de formaldeído P.A - ACS (37% m/m) e 2 mL de HCl 10N. A amostra pronta foi adicionada a um balão de fundo chato e levada para aquecimento durante 30 minutos em uma chapa aquecedora com agitação mecânica e um condensador. A mistura foi mantida sob refluxo.

Em seguida, o extrato resultante foi filtrado em um cadinho de vidro sinterizado com porosidade 3 e levado para estufa a 105º C ± 5º C, até atingir massa constante, para posteriormente ser pesado e calculado o Índice de Stiasny (equação 2).

$$I.S = \left(\frac{M2}{M1} \times 100 \right) \qquad (2)$$

Onde: I.S = Índice de Stiasny (%); M1 = massa total de sólidos em 20 g de extrato (g); M2 = massa seca do precipitado tanino-formaldeído (g).

a. 2.5 Análise química das cascas via Cromatografia Gasosa acoplada a Espectrometria de Massas por Pirólise (Py-GC/MS)

Para realizar a análise química das cascas por cromatografia gasosa acoplada a espectrometria de massa por pirólise (Py-GC/MS), foram necessários 0,1 mg de serragem para realização da pirólise em um pirolisador de micro-forno, com um sistema GC-MS (Shimadzu, modelo QP2020).

Dessa forma, a pirólise foi feita a 550º C com a interface da válvula a 290º C. Para isso, o GC foi configurado com temperatura do injetor à 250º C; temperatura inicial do forno à 40º C durante 5 minutos e a aquecida a 6º C/min até atingir 280º C, durante 15 minutos; gás de arraste hélio (1 mL/min) em modo split em proporção de 20:1; e coluna capilar UltraALLOY (30 m x 0,25 mm ID, espessura do filme de 0,25 µm).

Já o espectrômetro de massa, foi utilizado em modo de ionização por impacto de elétrons a 70 eV e varredura de massa no intervalo de 30-500 m/z. Os resultados obtidos foram comparados com a biblioteca espectral GC-MS (NIST17), avaliando os compostos liberados de modo a identificá-los. A análise foi realizada em duplicata, avaliando os 60 picos que tiveram maior área e, destes foram considerados apenas os que obtiveram área superior a 1% e similaridade superior a 90% com a biblioteca. A metodologia utilizada foi adaptada de David et al. (2021).

2.6 Delineamento experimental

A avaliação dos resultados do experimento foi realizada através do Delineamento Inteiramente Casualizado (DIC). Ele foi feito em duplicatas, com fatorial triplo, onde foram analisados a temperatura (60, 75 e 90º C), o tempo (90, 120 e 180 minutos), e a adição de sal (0%, 2%, 4% e 6%) para obtenção do rendimento em sólidos totais, do Índice de Stiasny e do rendimento de taninos e não taninos.

Os dados foram submetidos aos testes de Lilliefors para testar a normalidade da variância, e Cochran para testar a homogeneidade da variância. Posteriormente, foi realizada a

análise de variância pelo teste F, com comparação das médias pelo teste Tukey a 95% de probabilidade, utilizando o software Sisvar.

3. Resultados e discussão

3.1 Caracterização química da casca

A caracterização química da casca do híbrido *Corymbia citriodora* × *Corymbia torelliana* evidenciou predominância de carboidratos (50,9%), seguidos por lignina total (24,75%), suberina (10,03%) e extrativos totais (8,86%). Também foram determinados os teores de cinzas (3,65%) e a composição elementar, composta por 47,75% de carbono, 5,52% de hidrogênio, 42,82% de oxigênio, 0,19% de nitrogênio e 0,07% de enxofre.

Os extrativos totais foram constituídos, principalmente, por compostos extraídos em solventes polares (água e acetona), como glicerol e ácido gálico, formando 85,89% do total, enquanto uma menor fração foi obtida em solventes apolares (diclorometano), como o ácido palmítico. Com base no estudo de Pena-Vergara et al. (2022), que analisou resíduos de espécies de *Eucalyptus*, observou-se um teor de 11% de extrativos, 24% de lignina total e 4% de cinzas, que se assemelham aos resultados obtidos para o híbrido de *Corymbia citriodora* x *Corymbia torelliana*.

Em relação à composição mineralógica, foram observadas maiores concentrações de cálcio, potássio e magnésio, minerais essenciais ao desenvolvimento vegetal e frequentemente encontrados em cascas de espécies florestais (Zielenkiewicz et al., 2017). O Poder Calorífico Superior (PCS) foi de 18,3 MJ kg^{-1}, valor semelhante ao relatado para o híbrido de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* obtidos por Neiva et al. (2018).

3.2 Análise química por Py-GC/MS

A análise por Cromatografia Gasosa acoplada à Espectrometria de Massas por Pirólise (Py-GC/MS) permitiu identificar os principais compostos formados durante a pirólise da casca. Entre aqueles com maior abundância destacaram-se o dióxido de carbono (15,09%), ácido acético (12,96%), levoglucosana (9,98%), aldeído glicólico (7,05%) e metilglioxal (5,93%).

A alta porcentagem de CO_2 obtida na casca do híbrido, torna-o um potencial para geração de energia e mitigação de emissões de carbono (ZHANG et al., 2023). O ácido acético também foi encontrado em alta porcentagem e pode ser utilizado em inúmeras indústrias, como as têxteis, farmacêuticas e alimentícias (MARTÍN-ESPEJO et al., 2022). O aldeído glicólico ($C_2H_4O_2$) e o metilglioxal ($C_4H_4O_2$) foram os principais aldeídos encontrados na casca do híbrido.

3.3 Rendimento em Sólidos Totais

De acordo com a análise de variância, o rendimento em sólidos totais foi afetado apenas pela interação entre a variação da temperatura e a adição de diferentes porcentagens do sulfito de sódio, e também pelo efeito individual do tempo de extração dos taninos da casca do híbrido estudado.

O rendimento em sólidos totais aumentou conforme a adição de sulfito de sódio anidro, independente da temperatura de extração. Isso acontece devido a características do sal extrator, que conforme o aumento de sua porcentagem, é favorecida a extração de taninos, já que eles aumentam a superfície de contato entre o tanino e o solvente (SOUSA et al., 2019). Ademais, a interação do sal com o tanino, promove a quebra das ligações entre as cadeias dos taninos.

Da mesma forma, o aumento da temperatura independente da quantidade do sal extrator, também promove o maior rendimento de sólidos totais. Isso ocorre devido ao fato de maiores temperaturas viabilizarem a extração de diversos compostos ativos, como terpenos, taninos, flavonóides, quinonas e fenóis, já que aumentam a sua solubilidade (IYLIA et al., 2019).

Com relação a variação do tempo de extração, os tempos de 90 e 120 minutos não apresentaram diferença estatística entre si, enquanto o tempo de extração de 180 minutos obteve um rendimento em sólidos totais maior e diferente dos demais. Este comportamento pode ser explicado pelo fato de que o contato prolongado do solvente com o soluto, favorece a solubilidade e extração de compostos (DEWI et al., 2019).

3.4 Índice de Stiasny

A reação de Stiasny é realizada com o intuito de quantificar o teor de taninos para a produção de adesivos para madeira. Essa análise é realizada através da reação entre o extrato produzido e o formaldeído em meio ácido (CARNEIRO, 2007).

A análise de variância mostrou que não houveram interações duplas ou triplas entre os fatores. O Índice de Stiasny foi afetado apenas pelos efeitos individuais dos fatores de adição do sal extrator e do incremento na temperatura para a extração de compostos tânicos na casca do híbrido.

Em relação a adição do sulfito de sódio anidro, observou-se que o incremento de 2% do sal extrator resultou no aumento do Índice de Stiasny, no entanto, com o aumento do percentual de Na_2SO_3 houve a redução do índice. Dessa forma, a redução do Índice indica que maiores concentrações do sal extrator promoveram a extração de substâncias não tânicas, favorecendo o decaimento do Índice de Stiasny. Carneiro et al. (2007) observou em seu estudo a mesma variação no índice, onde o incremento percentual do sal extrator resultou na redução do Índice de Stiasny.

Os efeitos observados em relação a variação na temperatura, revelaram que ocorreu um incremento significativo no Índice de Stiasny conforme o aumento da temperatura. Isso pode ser explicado pelo fato de que quanto maior a temperatura, mais fácil se torna a solubilização dos compostos através da maior transferência de massa (RAJHA et al., 2014).

No entanto, de acordo com Feria-Reyes et al. (2023), os resultados do Índice de Stiasny para a casca do híbrido *Corymbia citriodora* x *Corymbia torelliana* obtidos neste estudo não foram suficientes, já que, para os autores, seriam necessários valores acima de 65% para serem considerados rentáveis para extração de taninos condensáveis para a indústria de adesivos.

3.5 Rendimento em Substâncias Tânicas

De acordo com a análise de variância, o rendimento em substâncias tânicas foi afetado pelas interações duplas entre a variação da temperatura e a adição de diferentes porcentagens do sulfito de sódio, e também pelo tempo de extração e temperatura na casca do híbrido estudado. Dessa forma, os maiores rendimentos foram obtidos nas extrações conduzidas a 90 °C, principalmente com a adição de 2% e 6% de sulfito de sódio, não havendo diferença estatística entre esses dois tratamentos, como expresso na tabela 1.

Tabela 1 - Valores médios de rendimento em substâncias tânicas em função da temperatura e percentual de sulfito de sódio anidro.

Temperatura (ºC)	**% Na_2SO_3**				**Média**
	0	**2**	**4**	**6**	
60	2,88 ^{Aa}	4,63 ^{Ba}	4,11 ^{Ba}	3,77 ^{Aab}	3,85 ^{A}
75	3,43 ^{Aba}	6,37 ^{ACb}	5,21 ^{Ba}	6,59 ^{Cb}	5,40 ^{B}
90	4,24 ^{Aba}	8,23 ^{BCc}	7,25 ^{Bb}	7,25 ^{Cc}	7,20 ^{C}
Média	3,52 ^{a}	6,41 ^{c}	5,5 ^{b}	6,48 ^{c}	5,48

Valores médios com a mesma letra maiúscula nas linhas e com a mesma letra minúscula nas colunas não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade.

Em relação ao tempo de extração, verificou-se que o aumento para 180 minutos, na temperatura de 90 °C, proporcionou os maiores rendimentos de substâncias tânicas (Tabela 2), resultado atribuído ao maior tempo de contato entre o solvente e a biomassa, favorecendo a extração dos compostos de interesse.

Tabela 2 - Valores médios de rendimento em substâncias tânicas em função da temperatura e do tempo de extração.

Tempo (min)	Temperatura (ºC)			Média
	60	75	90	
90	4,03 Aa	4,93 Aa	6,18 Ba	5,04 A
120	3,48 Aa	5,44 Ba	7,26 Cb	5,39 A
180	4,05 Aa	5,83 Ba	8,17 Cb	6,01 B
Média	3,85 a	5,40 c	7,20 b	5,49

Valores médios com a mesma letra maiúscula nas linhas e com a mesma letra minúscula nas colunas não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade.

Embora os tratamentos com 2% e 6% de sulfito tenham apresentado rendimentos semelhantes de substâncias tânicas, a utilização de 2% mostrou-se mais vantajosa, uma vez que concentrações mais elevadas favoreceram também a extração de compostos não tânicos. Dewi, Siregar e Kusumayanti (2019) obtiveram o mesmo padrão em relação ao aumento do tempo de extração e aumento do rendimento de substâncias tânicas, corroborando para o presente estudo.

Dessa forma, as análises realizadas permitiram inferir que as melhores médias obtidas para maior rendimento das substâncias tânicas foram conseguidas com a adição de 2% e 6% do sulfito de sódio anidro (sal extrator), no tempo de 180 minutos, à temperatura de 90 ºC.

4. Conclusões

A caracterização química da casca do híbrido *Corymbia citriodora* × *Corymbia torelliana* demonstrou a presença de diversos compostos de interesse industrial, incluindo carboidratos, lignina, suberina e compostos identificados por Py-GC/MS, como ácido acético e levoglucosana, evidenciando o potencial desse resíduo florestal para aplicações em processos de biorrefinaria e na obtenção de produtos de maior valor agregado.

Além disso, foi possível obter as melhores condições para a extração de substâncias tânicas e avaliar os fatores que interferem em sua obtenção. Dessa forma, pode-se perceber que as porcentagens de 2% e 6% do sulfito de sódio anidro (Na_2SO_3) são as que melhor promovem a extração, onde a menor concentração possibilitou menor extração de não tânicos. Assim, dentre os tratamentos analisados, os que apresentaram maior percentual de taninos foram com a adição de 2% do sal extrator, combinado com um tempo de 180 minutos de extração à 90º C.

Entretanto, apesar do sucesso para identificar os melhores fatores para extração dos taninos, o híbrido *Corymbia citriodora* x *Corymbia torelliana* não representou um alto potencial para remoção de substância tânicas e sólidos totais na casca, quando comparado à literatura, tornando-se uma matéria-prima não rentável para este fim.

5. Agradecimentos

Deixamos aqui nosso agradecimento ao Laboratório de Celulose e Papel (LCP), do qual fazemos parte, a nossa coordenadora e professora Ana Márcia Macedo, e a todos os estagiários com os quais dividimos esse aprendizado.

6. Referências bibliográficas

ABRAHAM, A. et al. (2020). Pretreatment strategies for enhanced biogas production from lignocellulosic biomass. **Bioresource Technology**, v. 301, p. 122725.

ARIAS, Ana *et al.* Tannin-based bio-adhesives for the wood panel industry as sustainable alternatives to petrochemical resins. **Journal of Industrial Ecology**, v. 26, n. 2, p. 627–642, 17 nov. 2021.

OLIVEIRA, Carneiro Angélica de Cássia *et al.* Efeito do sulfito de sódio na extração de tanino da casca de *Anadenanthera peregrina*. **Floresta e Ambiente**, v. 14, p. 65–69, 2023.

CHAVES, I. L. S. et al. (2021). Taninos vegetais: Qualidade e rendimento são influenciados pelo ambiente? Em: Sistemas Integrados de Produção: pesquisa e desenvolvimento de tecnologias. **Editora Científica Digital.**

DAS, Atanu Kumar *et al.* Review on tannins: Extraction processes, applications and possibilities. **South African Journal of Botany**, v. 135, p. 58–70, 1 dez. 2020.

DAVID, Geraldo Ferreira *et al.* Fast pyrolysis as a tool for obtaining levoglucosan after pretreatment of biomass with niobium catalysts. **Waste Management**, v. 126, p. 274–282, 27 mar. 2021.

DEWI, A. L.; SIREGAR, V D; KUSUMAYANTI, H. Effect of Extraction Time on Tannin Antioxidant Level and Flavonoid on Pandan Wangi Leaf (Pandanusamary llifolius Roxb) Using Hydrothermal Extractor. **Journal of Physics: Conference Series**, v. 1295, p. 012066, set. 2019.

FERIA-REYES, R. et al. (2023). Pine Bark as a Potential Source of Condensed Tannin: Analysis through Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR), Scanning Electron Microscopy (SEM), and Energy Dispersive X-ray (EDX). **Forests**, v. 14, n. 7.

IYLIA ARINA, M. Z.; Harisun, Y. (2019). Effect of extraction temperatures on tannin content and antioxidant activity of Quercus infectoria (Manjakani). **Biocatalysis and Agricultural Biotechnology**, v. 19, p. 101104.

MARTÍN-ESPEJO, Juan Luis *et al.* Sustainable routes for acetic acid production: Traditional processes vs a low-carbon, biogas-based strategy. **Science of The Total Environment**, v. 840, p. 156663, 20 set. 2022.

MISHRA, R. K.; MOHANTY, K. (2018). Characterization of non-edible lignocellulosic biomass in terms of their candidacy towards alternative renewable fuels. **Biomass Conversion and Biorefinery**, v. 8, n. 4, p. 799–812.

NATALLI, L. H. (2020). Subprodutos das indústrias madeiras como matéria-prima para produção de MDP. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) pela Universidade Estadual do Centro-Oeste.

NEIVA, Duarte M. *et al.* Potential of Eucalyptus globulus industrial bark as a biorefinery feedstock: Chemical and fuel characterization. **Industrial Crops and Products**, v. 123, p. 262–270, nov. 2018.

PENA-VERGARA, G. et al. (2022). Energy from planted forest and its residues characterization in Brazil. Energy, v. 239, p. 122243.

RAJHA, Hiba N. *et al.* Extraction of Total Phenolic Compounds, Flavonoids, Anthocyanins and Tannins from Grape Byproducts by Response Surface Methodology. Influence of Solid-Liquid Ratio, Particle Size, Time, Temperature and Solvent Mixtures on the Optimization Process. **Food and Nutrition Sciences**, v. 05, n. 04, p. 397–409, 2014.

SOUSA, Thaís Brito *et al.* Quantification of Tannins from Curupay Bark. **Floresta e Ambiente**, v. 26, n. 1, 2019.

ZHANG, Zhen *et al.* A carbon-efficient bicarbonate electrolyzer. **Cell Reports Physical Science**, v. 4, n. 11, p. 101662–101662, 1 nov. 2023.

ZIELENKIEWICZ, T. et al. Metals accumulation in scots pine (Pinus sylvestris l.) wood and bark affected with environmental pollution. [s.l: s.n.].

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Potencial da casca de teca (*Tectona grandis* L. f.) como fonte de taninos condensados e compostos fenólicos proveniente de plantio silvicultural no Nordeste brasileiro

Kayo Lucas Batista de Paiva[1]; Tatiane Kelly Barbosa de Azevedo[1]; Paula Evanyn Pessoa do Nascimento[1]; Denys Santos de Souza[1]; Elaine Cristina Alves da Silva[1]; Luan Cavalcanti da Silva[1]; Wilkally Crislian Laynne de Moura[1]; Fernando Hermínio Ferreira Milheiro Nunes[2]

[1] Escola Agrícola de Jundiaí. Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN).
[2] Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro (UTAD).

Resumo: A casca de *Tectona grandis* L. f. constitui uma biomassa florestal com potencial para a obtenção de compostos bioativos. Este estudo objetivou quantificar os teores de compostos fenólicos totais e taninos condensados da casca de teca proveniente de um plantio comercial no Nordeste brasileiro. As amostras foram coletadas no município de Ceará-Mirim - RN. Os compostos fenólicos foram determinados após extração com água, metanol e acetona, enquanto os taninos condensados foram quantificados por extração aquosa sob refluxo. A água apresentou a maior eficiência na extração de compostos fenólicos, atingindo 79,19 mg EAG g^{-1}. O extrato aquoso apresentou 14,23% de sólidos totais, Índice de Stiasny de 15,60% e teor de taninos condensados de 2,20%. Conclui-se que a casca de *T. grandis* apresenta potencial como fonte de compostos fenólicos, porém com baixo potencial para a obtenção de taninos condensados, indicando a necessidade de estudos para identificar os compostos fenólicos de maior interesse tecnológico.

Palavras-chave: Valorização de resíduos; Biomassa florestal; Metabólitos secundários.

Potential of Teak (*Tectona grandis* L. f.) Bark from Commercial Plantations in Northeastern Brazil as a Source of Condensed Tannins and Phenolic Compounds

Abstract: *Tectona grandis* L. f. bark is a forest biomass with potential as a source of bioactive compounds. This study aimed to quantify the total phenolic compound and condensed tannin contents of teak bark obtained from a commercial plantation in northeastern Brazil. Samples were collected in the municipality of Ceará-Mirim, Rio Grande do Norte, Brazil. Total phenolic compounds were determined after extraction with water, methanol, and acetone, whereas condensed tannins were quantified by aqueous reflux extraction. Water was the most efficient solvent for phenolic compound extraction, reaching 79.19 mg GAE g^{-1}. The aqueous extract showed 14.23% total solids, a Stiasny Index of 15.60%, and a condensed tannin content of 2.20%. The results indicate that *T. grandis* bark has potential as a source of phenolic compounds but limited potential for condensed tannin production, highlighting the need for further studies to identify phenolic compounds with greater technological potential.

Keywords: Waste Valorization; Forest Biomass; Secondary Metabolites.

1. Introdução

A teca (*Tectona grandis* L. f.) é uma das espécies florestais tropicais de maior importância econômica, destacando-se pela elevada qualidade da madeira, caracterizada por alta durabilidade, estabilidade dimensional e resistência ao ataque de fungos e cupins (Vyas et al., 2019; Kolli et al., 2022). Em razão dessas características, seu cultivo expandiu-se para diversas regiões tropicais, incluindo o Brasil, onde os plantios comerciais têm apresentado expressivo crescimento e contribuído para o suprimento de madeira de alto valor agregado (Pachas et al., 2019; Oliveira et al., 2020; Lima et al., 2021).

Nesse contesto, além da madeira, o aproveitamento da biomassa residual gerada pelos plantios florestais, especialmente da casca, tem despertado interesse devido ao seu potencial como fonte de compostos fenólicos (Bianchi et al., 2015; Ferreira-Santos et al., 2020). Entre esses compostos, destacam-se os taninos condensados, metabólitos secundários com propriedades antioxidantes, antimicrobianas e adstringentes, amplamente utilizados na produção de bioadesivos, resinas, coagulantes naturais e outros bioprodutos de elevado valor agregado (Geană et al., 2023; Tomasi et al., 2023; Osman et al., 2024; Sillero et al., 2025).

Em *T. grandis*, estudos demonstram que a casca e as folhas apresentam compostos fenólicos associados à elevada atividade antioxidante e ao potencial de aplicação nas áreas farmacêutica, nutracêutica e biotecnológica (Dominique et al., 2014; Asdaq et al., 2021; Montri et al., 2025). Entretanto, ainda são escassos os estudos que caracterizam a composição química da casca proveniente de plantios comerciais brasileiros, especialmente na região Nordeste, limitando o aproveitamento desse resíduo florestal em aplicações de maior valor agregado.

Diante desse contexto, o presente estudo teve como objetivo quantificar os teores de compostos fenólicos totais e de taninos condensados na casca de *T. grandis* proveniente de um plantio comercial no Nordeste brasileiro, contribuindo para a valorização dessa biomassa como fonte renovável de compostos bioativos.

2. Material e métodos

Coleta de cascas

As cascas de teca (*Tectona grandis*) foram coletadas de cinco indivíduos saudáveis estabelecidos em um plantio florestal localizado na Fazenda Pica Pau, no município de Ceará-Mirim, Rio Grande do Norte. As amostras foram retiradas do tronco, fragmentadas, secas ao ar e moídas em moinho tipo Willey. Para as análises, utilizou-se a fração retida entre as peneiras de

16 mesh (1,00 mm) e 60 mesh (0,25 mm). O material foi homogeneizado e teve seu teor de umidade determinado para correção dos resultados em base seca.

Determinação dos compostos fenólicos totais

Para a obtenção dos extratos enriquecidos em compostos fenólicos, , as cascas de *T. grandis* foram previamente moídas, sendo pesados 0,500 g de cada amostra. As extrações foram realizadas utilizando 50,0 mL de três solventes distintos (metanol, água e acetona), em procedimentos independentes, durante 1 hora à temperatura ambiente, sob agitação orbital a 300 rpm. Ao término da extração, os extratos foram filtrados em papel de filtro para remoção do material particulado. Em seguida, uma alíquota de 20,0 mL de cada extrato foi evaporada até a secura, sendo o resíduo obtido destinado ao fracionamento e à caracterização dos taninos condensados.

Os Compostos fenólicos totais foram mensurados pelo método Prussian Blue Test desenvolvido por Price e Butler, (1977). Para as análises foram utilizados 5mL de hexahidrato de cloreto de ferro (III) 0.1M (FeCl3.6H2O) em HCl 0.1M, onde foram adicionados a 50µl de extrato, seguido imediatamente pela adição de 5mL de hexacianoferrato de potássio (III) (K3Fe(CN)6) 0.008M. As absorvâncias foram lidas após 10 min em células de 1 cm de comprimento de onda a 720 nm em espectrofotômetro (Thermo Scientific Genysis 50) que foi zerado com água. Foi elaborada uma curva de calibração do ácido gálico e analisadas seguindo as condições utilizadas nos extratos e os resultados foram expressos em equivalentes de ácido gálico. Todas as análises foram realizadas em triplicata.

Extração para quantificação das substâncias tânicas

Foram utilizadas amostras de 25 g de casca seca submetidas a extração em fervura sob refluxo. Para a extração, empregou-se água destilada como solvente, na proporção inicial de 1:10 (m/v), realizando-se duas extrações sucessivas de 250 mL, totalizando a relação casca de 1:20. As extrações foram conduzidas durante 2 horas.

Após a extração, os extratos foram filtrados em peneira de 200 mesh (0,075 mm), tecido de flanela e funil de vidro sinterizado (porosidade nº 2). Em seguida, foram concentrados para 250 mL por evaporação da água em aparelho tipo Soxhlet.

A determinação do teor de sólidos totais (TST), do índice de Stiasny e do teor de taninos condensados (TTC) foi realizada conforme metodologia adaptada de Guangcheng et al.

(1991). Para o TST, uma alíquota de 50 mL foi seca em estufa a 103 ± 2 °C por 48 h. O índice de Stiasny foi determinado pela reação de 50 mL do extrato com 4 mL de formaldeído (37%) e 1 mL de HCl concentrado, seguida de refluxo por 30 min. O precipitado formado foi filtrado e seco a 103 ± 2 °C por 24 h. O TTC foi obtido pela multiplicação do TST pelo índice de Stiasny.

3. Resultados e discussão

Quantificação dos compostos fenólicos totais

Os teores médios de compostos fenólicos determinados nos extratos da casca de *T. grandis*, obtidos por extração com metanol, acetona e água, estão apresentados na Figura 1. Os resultados demonstram que a água foi o solvente mais eficiente para a extração de compostos fenólicos totais da casca de *T. grandis*, proporcionando rendimento de 79,19 mg EAG g^{-1}, superior aos obtidos com acetona (50,67 mg EAG g^{-1}) e metanol (48,35 mg EAG g^{-1}). Esse comportamento está de acordo com a literatura, que atribui a eficiência da extração à interação entre a polaridade do solvente, a composição química da matriz vegetal e as condições operacionais, não havendo um solvente universalmente mais eficiente para todas as espécies (Roselló-Soto et al., 2019; Salih et al., 2021).

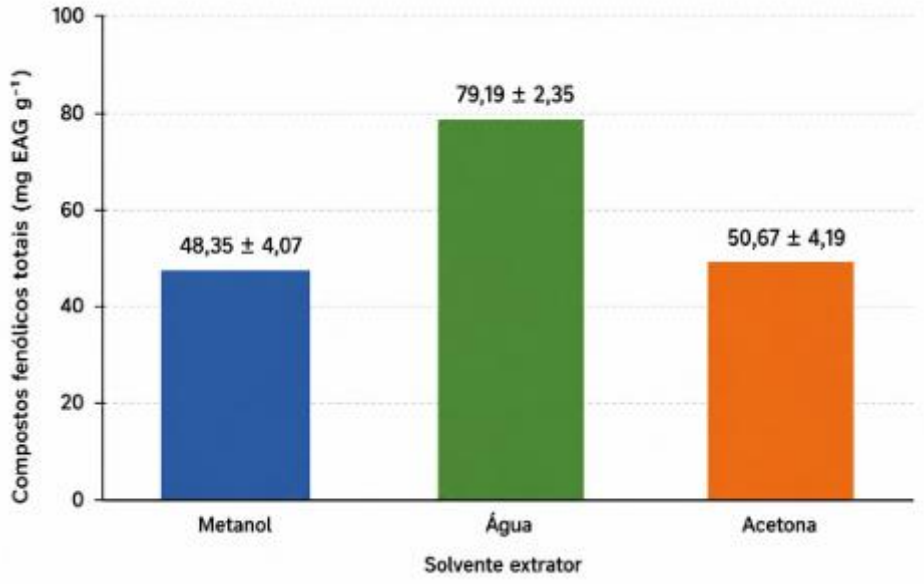


Figura 6 - Determinação do teor de compostos fenólicos totais da casca de *Tectona grandis*.

O maior rendimento obtido com água sugere predominância de compostos fenólicos de caráter polar na casca de teca, cuja solubilização é favorecida em meios altamente polares (Begum et al., 2023). Além disso, a utilização da água como solvente representa uma vantagem

sob a perspectiva tecnológica e ambiental, uma vez que se trata de um solvente de baixo custo, não tóxico, amplamente disponível e de fácil recuperação, reduzindo os custos operacionais e os impactos ambientais associados ao uso de solventes orgânicos. Entretanto, essa superioridade deve ser interpretada como uma resposta específica da matriz avaliada, uma vez que pequenas alterações no solvente ou nas condições de extração podem modificar significativamente o rendimento fenólico (Venkatesan et al., 2019; Salih et al., 2021; Borah et al., 2022).

As comparações com a própria espécie ainda são limitadas devido à escassez de estudos envolvendo a casca de *T. grandis*. Rahman e Lukmandaru (2021) observaram concentrações de 162,16 a 295,24 mg EAG g^{-1} de extrato para a casca de teca juvenil, valores expressivamente superiores aos obtidos neste estudo. Entretanto, essa diferença reflete, em grande parte, a forma de expressão dos resultados, uma vez que os autores quantificaram os fenólicos por unidade de massa do extrato concentrado, enquanto neste estudo os resultados foram expressos por unidade de massa de casca. Assim, embora não seja possível estabelecer uma comparação quantitativa direta, ambos os estudos evidenciam que a casca de *T. grandis* é uma fonte relevante de compostos fenólicos.

Quando comparada a outras biomassas vegetais, a casca de *T. grandis* apresentou resultados competitivos. Rodrigues et al. (2023) reportaram teores de 45,18 mg EAG g^{-1} para bagaço de uva (*Vitis vinífera*) utilizando acetona e EAG g^{-1} utilizando etanol, enquanto Jablonský et al. (2020) obtiveram 73,48 mg EAG g^{-1} para casca de pinus (*Picea abies*) utilizando mistura água/etanol, valores próximos aos observados neste estudo. Por outro lado, espécies nativas do Nordeste brasileiro reconhecidas pelo elevado potencial fenólico apresentaram desempenho superior. *Mimosa tenuiflora* e *Anacardium occidentale* atingiram 141,21 mg EAG g^{-1} e 154,18 mg EAG g^{-1}, respectivamente, evidenciando maior capacidade de acumulação de compostos fenólicos (Ucella-Filho et al., 2022; Nascimento et al., 2026). Embora os teores obtidos para a teca sejam inferiores aos dessas espécies, o aproveitamento da casca proveniente de plantios comerciais representa uma alternativa interessante para obtenção de compostos fenólicos, agregando valor a um resíduo florestal e reduzindo a pressão sobre espécies nativas tradicionalmente exploradas como fontes desses metabólitos.

Quantificação de taninos condensado

Os teores médios de taninos condensados (TTC), índice de Stiasny (IS) e teor de sólidos totais (TST), determinados nos extratos da casca de *T. grandis*, obtidos por extração em fervura sob refluxo, estão apresentados na Tabela 1.

O teor de sólidos totais (TST) de 14,23% indica rendimento moderado de compostos extraíveis da casca de *T. grandis*. Entretanto, o reduzido Índice de Stiasny (15,60%) e o baixo teor de taninos condensados (2,20%) demonstram que apenas uma pequena fração desses sólidos corresponde a taninos condensados reativos ao formaldeído, indicando predominância de compostos não tânicos no extrato (Aires et al., 2016; Ucella-Filho et al., 2022).

Tabela 7 - Teores médios de sólidos totais (TST), Índice de Stiasny (IS) e teor de taninos condensados (TCC) obtidos a partir do extrato aquoso da casca de *Tectona grandis*

Espécie	TST (%)	IS (%)	TCC (%)
Tectona grandis	14,23	15,60	2,20

O teor de taninos condensados obtido para a casca de *T. grandis* foi significativamente inferior ao registrado para espécies amplamente utilizadas na produção comercial de taninos, como *Acacia mearnsii* (39,00%), *Stryphnodendron adstringens* (22,13%) e *Anadenanthera colubrina* (14,50%) (Calegari et al., 2016; Ucella-Filho et al., 2022; Paiva et al., 2024). Da mesma forma, espécies nativas do Nordeste brasileiro, como *Mimosa tenuiflora* e *Anacardium occidentale*, apresentaram teores de 21,90% e 39,54%, respectivamente, evidenciando potencial significativamente superior para obtenção de taninos condensados (Azevêdo et al., 2017; Nascimento et al., 2026).

Essas diferenças refletem, principalmente, a composição química característica de cada espécie. Enquanto *Acacia mearnsii*, *Stryphnodendron adstringens*, *Anadenanthera colubrina* e *Mimosa tenuiflora* acumulam elevadas concentrações de proantocianidinas na casca, responsáveis por sua ampla utilização industrial, os resultados obtidos para *T. grandis*, associados ao teor de fenólicos totais observado anteriormente, sugerem que a casca dessa espécie apresenta predominância de compostos fenólicos não condensados, o que explica o baixo Índice de Stiasny e o reduzido teor de taninos condensados.

4. Conclusões

A casca de *T. grandis* proveniente de plantio comercial no Nordeste brasileiro apresentou potencial como fonte de compostos fenólicos, destacando-se a água como o solvente mais eficiente para sua extração. Por outro lado, os baixos valores de Índice de Stiasny e de teor de taninos condensados indicam que essa biomassa não se destaca como fonte de taninos condensados para aplicações industriais. Assim, recomenda-se que estudos futuros sejam direcionados à identificação e caracterização dos compostos fenólicos presentes na casca,

visando à prospecção de moléculas bioativas com potencial de aplicação em diferentes setores industriais e agregando valor a esse resíduo florestal.

5. Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

6. Referências bibliográficas

Aires, A., Carvalho, R., & Saavedra, M. (2016). Valorization of solid wastes from chestnut industry processing: Extraction and optimization of polyphenols, tannins and ellagitannins and its potential for adhesives, cosmetic and pharmaceutical industry. *Waste management*, 48, 457-464. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.11.019

Asdaq, S. M., Nayeem, N., A., Alam, M. T., Alaqel, S. I., Imran, M., Hassan, E., & Rabbani, S. (2021). *Tectona grandis* L.f: A comprehensive review on its patents, chemical constituents, and biological activities. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 29, 1456 - 1464. https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2021.11.026

Azevêdo, T. K. B. D., Paes, J. B., Calegari, L., & Santana, G. M. (2017). Teor de taninos condensados presente na casca de jurema-preta (*Mimosa tenuiflora*) em função das fenofases. *Floresta e Ambiente*, 24, e00026613.

Begum, S. N., Hossain, M., Adnan, M., Rahaman, C., & Reza, A. (2023). Optimization and Characterization of Phenolic Extraction Conditions and Antioxidant Activity Evaluation of *Adenanthera pavonina* L. Bark. *Plants*, 12. https://doi.org/10.3390/plants12223902

Bianchi, S., Kroslakova, I., Janzon, R., Mayer, I., Saake, B., & Pichelin, F. (2015). Characterization of condensed tannins and carbohydrates in hot water bark extracts of European softwood species. *Phytochemistry*, 120, 53-61 . https://doi.org/10.1016/j.phytochem.2015.10.006

Borah, A., Selvaraj, S., Holla, S. R., & De, S. (2022). Extraction and characterization of total phenolic and flavonoid contents from bark of *Swietenia macrophylla* and their antimicrobial and antioxidant properties. *Arabian Journal of Chemistry*. https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2022.104370

Calegari, L., Lopes, P. J. G., de Oliveira, E., Gatto, D. A., & Stangerlin, D. M. (2016). Quantificação de taninos nas cascas de jurema-preta e acácia-negra. *Pesquisa Florestal Brasileira*, 36(85), 61-69.

Dominique, S. K. C., Moukimou., L. A. O., Pascal, A., Annick, B., Yaya, K., Pierre, N. J. A., & Félicien, A. (2014). Chemical Characterization and Biological Activities of Extracts Ofthree Plants Used in Traditional Medicine in Benin: *Tectona Grandis*, *Uvaria Chameae* and *Justicia Secunda*. *Asian Journal of Pharmaceutical and Clinical Research*, 7, 23-27.

Ferreira-Santos, P., Zanuso, E., Genisheva, Z., Rocha, C. M. R., & Teixeira, J. (2020). Green and Sustainable Valorization of Bioactive Phenolic Compounds from Pinus By-Products. *Molecules*, 25. https://doi.org/10.3390/molecules25122931

Geană, E., Ciucure, C., Tamaian, R., Marinaș, I., Gaboreanu, D., Stan, M., & Chițescu, C. (2023). Antioxidant and Wound Healing Bioactive Potential of Extracts Obtained from Bark and Needles of Softwood Species. *Antioxidants*, 12. https://doi.org/10.3390/antiox12071383

Guangcheng, Z.; Yunlu, L.; Yazaki, Y. Extractive yields, Stiasnyvalues and polyflavonoid contents in barks formsixacacia species in Australia. *Australian Forestry*, Queensland, v.54, n.3, p.154-156, 1991.

Jablonský, M., Majová, V., Strižincová, P., Šima, J., & Jablonský, J. (2020). Investigation of Total Phenolic Content and Antioxidant Activities of Spruce Bark Extracts Isolated by Deep Eutectic Solvents. *Crystals*. https://doi.org/10.3390/cryst10050402

Kolli, P., Obbalareddy, S., Yejella, R., Athili, L. D., & Ponnada, S. (2022). A Review on *Tectona Grandis*. *International Journal of Research in Pharmacy and Chemistry*. https://doi.org/10.33289/ijrpc.12.3.2022.12(39)

Lima, I. L., Ranzini, M., Longui, E., & De Andrade Barbosa, J. (2021). Wood characterization of *Tectona grandis* L. F. cultivated in Brazil: a review of the last 30 years. Research, *Society and Development*. https://doi.org/10.33448/rsd-v10i14.21549

Montri, N., Wanapat, M., Kang, S., Cheas, S., Cherdthong, A., Gunun, P., Gunun, N., Foiklang, S., Kongmun, P., Srithat, D., Tongkasee, P., & Polyorach, S. (2025). Exploring *Tectona grandis* Linn. f. Leaf Extract as a Functional Feed Additive with Antioxidant and Nutraceutical Potential for Livestock. *Animals* : an Open Access Journal from MDPI, 15.

Nascimento, P. E. P., Azevedo, T. K. B., Paiva, K. L. B., Souza, D. S., Nunes, F. H. F. M., Costa, E. D. L. M., ... & Meza-Filho, J. G. U. (2026). Improving the extraction of *Anacardium occidentale* bark tannins by alkaline and sulphitation processes and their efficiency in coagulation: chemical characterization by HPLC. *Ambiente e Agua-An Interdisciplinary Journal of Applied Science*, 21, 1-21.

Oliveira, J. K., Mendoza, Z., Borges, P., Elias, M., Barros, J. M. R., & De Mendoza Morais, P. H. (2020). Basic Specific Mass of *Tectona Grandis* Wood From an Agrosilvipastoral System. 79608-79617. https://doi.org/10.34117/bjdv6n10-404

Osman, Z., Pizzi, A., Elbadawi, M. E., Mehats, J., Mohammed, W., & Charrier, B. (2024). Effect of Technological Factors on the Extraction of Polymeric Condensed Tannins from Acacia Species. *Polymers*, 16. https://doi.org/10.3390/polym16111550

Pachas, A. N., Sakanphet, S., Midgley, S., & Dieters, M. (2019). Teak (*Tectona grandis*) silviculture and research: applications for smallholders in Lao PDR. *Australian Forestry*, 82, 105 - 94. https://doi.org/10.1080/00049158.2019.1610215

Paiva, K.L.B.; Nascimento, P.E.P.; Souza, D.S.; Azevêdo, T.K.B.; Silva, E.C.A.; Junior, S.M.; CANTO, J.L.; Pimenta, A.S.; Silva, L.C. Viabilidade técnica de uma nova metodologia para o processo de extração de taninos condensados. 1. ed. Macaíba: *Editora Científica*, 2024. 44 p. ISBN 978-65-5360-771-2. Disponível em: https://doi.org/10.37885/978-65-5360-771-2.

Price, M. L.; Butler, L. G. Rapid visual estimation and spectrophotometric determination of tannin content of sorghum grain. *Journal of Agricultural and food chemistry*, v. 25, n. 6, p. 1268-1273, 1977. https://doi.org/10.1021/jf60214a034

Rahman, F., & Lukmandaru, G. (2022). Extractive contents of the juvenile stemwood and bark of teak. *Wood Research* 67(1) 2021. https://doi.org/10.37763/wr.1336-4561/67.1.96108

Rodrigues, R. P., Sousa, A. M., Gando-Ferreira, L., & Quina, M. (2023). Grape Pomace as a Natural Source of Phenolic Compounds: Solvent Screening and Extraction Optimization. *Molecules*, 28. https://doi.org/10.3390/molecules28062715

Roselló-Soto, E., Martí-Quijal, F. J., Cilla, A., Munekata, P. E., Lorenzo, J., Remize, F., & Barba, F. (2019). Influence of Temperature, Solvent and pH on the Selective Extraction of Phenolic Compounds from Tiger Nuts by-Products: Triple-TOF-LC-MS-MS Characterization. *Molecules*, 24. https://doi.org/10.3390/molecules24040797

Salih, Abdalrhaman M., et al. "Optimization Method for Phenolic Compounds Extraction from Medicinal Plant (*Juniperus procera*) and Phytochemicals Screening." *Molecules*, vol. 26, 2021, https://doi.org/10.3390/molecules26247454.

Sillero, L., Marcial, M., Olaizola, I., Banales, J., Hernández-Ramos, F., Erdocia, X., & Morales, A. (2025). Sustainable recovery of bioactive compounds from forest residues using microwave-assisted extraction. *Separation and Purification Technology*. https://doi.org/10.1016/j.seppur.2025.134993

Tomasi, I. T., Santos, S., Boaventura, R., & Botelho, C. (2023). Microwave-Assisted Extraction of Polyphenols from Eucalyptus Bark—A First Step for a Green Production of Tannin-Based Coagulants. *Water*. https://doi.org/10.3390/w15020317

Ucella-Filho, J. G. M., Lorenço, M., De Souza, E. C., Da Costa, G. D., Piccoli, R., Júnior, A. D. F., & Mori, F. (2022). Tannin-rich tree bark extracts inhibit the development of bacteria associated with bovine mastitis. *BioResources*. https://doi.org/10.15376/biores.17.4.6578-6587

Venkatesan, T., Choi, Y.-W., & Kim, Y.-K. (2019). Impact of Different Extraction Solvents on Phenolic Content and Antioxidant Potential of *Pinus densiflora* Bark Extract. *BioMed Research International*, 2019. https://doi.org/10.1155/2019/3520675

Vyas, P., Yadav, D., & Khandelwal, P. (2019). *Tectona grandis* (teak) – A review on its phytochemical and therapeutic potential. *Natural Product Research*, 33, 2338 - 2354. https://doi.org/10.1080/14786419.2018.1440217

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Potencial de resíduos do descascamento de toras para produção de biochar: caracterização físico-química

Nicolle De Filippo Brumano[1]; Marisa Nunes Assis da Silva[1]; Raquel Julia Cipriano dos Santos[1]; Luiza Xavier Tomaz[2]; Carlos Henrique Reis dos Santos Silva[3]; Kaike Costa Carvalho[1] ; Maria Eduarda Grigolate Campos[4]; João Gilberto Meza Ucella Filho[1.]
Universidade Federal de Viçosa (UFV)
[1] Departamento de Engenharia Florestal
[2] Departamento de Engenharia Civil
[3] Departamento de Química
[4] Departamento de Engenharia Química

Resumo:

O setor de celulose gera grandes volumes de resíduos orgânicos, dentre eles os resíduos de pátio provenientes do descascamento das toras. Tradicionalmente usados em caldeiras, esses materiais vêm ganhando destaque em alternativas de maior valor agregado, como o biochar, pelo seu potencial de sequestro de carbono. Nesse contexto, objetivou-se realizar a caracterização físico-química desses resíduos visando avaliar seu potencial para a produção de biochar. Os resíduos apresentaram densidade aparente média de 0,185 g cm^{-3} e teor de umidade de 20,81%, além de elevada heterogeneidade granulométrica. A composição química revelou teores de carbono, nitrogênio e enxofre de 45,8%, 0,30% e 0,03%, respectivamente, além de 30,22% de lignina total. O elevado teor de lignina e de carbono presente neste resíduo, evidencia o seu potencial para produção de biochar, favorecendo maior rendimento gravimétrico e a obtenção de um material mais estável.

Palavras-chave: Biomassa, Sustentabilidade, Gestão Ambiental.

Physicochemical characterization of woodyard waste from the Kraft pulp industry

Abstract:

The pulp sector generates large volumes of waste, including material from log debarking. While previously destined for boilers, these materials are now notable for higher-value applications,such as biochar,due to their carbon sequestration potential. In this context, the study aimed to characterize the physicochemical properties of the waste and evaluate its potential for biochar production. The samples exhibited an average bulk density of 0.185 g cm^{-3} and a moisture content of 20.81%, alongside high particle size heterogeneity. Chemical analysis revealed carbon, nitrogen, and sulfur contents of 45.8%, 0.30%, and 0.03%, respectively, along with 30.22% total lignin. The high lignin and carbon content highlights the waste's potential for biochar production, favoring higher gravimetric yield and the generation of a more stable material.

Keywords: Biomass, Sustainability, Environmental management.

1. Introdução

O setor florestal contribui com a economia brasileira e do mundo, como segundo maior produtor de celulose e primeiro maior exportador, sua alta produção demanda uma intensa atividade de plantio e colheita, atingindo a média de 1,8 milhão de árvores plantadas por dia, superando 10 milhões de hectares plantados (IBÁ, 2025). No entanto, o crescente aumento da sua produção reflete em um gargalo ambiental, a alta geração de resíduos orgânicos sem uma destinação adequada.

Na indústria de celulose, o processo Kraft é o mais utilizado. Nesse modelo de polpação, a remoção da casca do eucalipto é feita mecanicamente, podendo ocorrer em campo ou na entrada do pátio de madeira. Manter a casca junto com a madeira prejudica a produtividade, o rendimento do cozimento, gasta mais produtos químicos no digestor e piora a qualidade final da celulose, prejudicando a alvura e a resistência da polpa (Foelkel, 2016). Por isso, a casca é separada, gerando um grande volume de resíduo de pátio, também chamado de resíduo de biomassa.

No geral, os resíduos gerados no pátio pelo processo de descascamento das toras são destinados as caldeiras para geração de vapor e energia térmica, devido ao seu potencial energético comprovado (Carvalho et. al., 2021), embora seja uma rota muito comum para a mitigação do acúmulo de material nos pátios, ela representa um aproveitamento de baixo valor agregado. A combustão da casca de eucalipto apresenta desafios operacionais devido ao elevado teor de cinzas, que pode ultrapassar o limite recomendado e provocar corrosão nos equipamentos e outros problemas na caldeira (Carvalho et al., 2021).

Para tentar resolver essa problemática, pesquisas recentes buscam formas alternativas para agregar valor a esses resíduos, superando o seu uso tradicional e restrito como fonte de geração de energia direta em caldeiras. Esse novo direcionamento baseia-se na complexidade de sua composição química e estrutural. Dentro dessa perspectiva, estudos investigaram as propriedades físico-químicas da casca residual e os achados revelaram que a fração fibrosa da casca, composta por celulose e hemicelulose, apresenta grande potencial na fabricação de painéis de madeira. Outro uso em potencial é a produção de biochar, produto orgânico sólido, rico em carbono, obtido a partir da pirólise de uma biomassa (Oni, Oziegbe, & Olawole, 2019)

Desta forma, devido ao grande investimento da indústria, alta geração de resíduos e seus potenciais alternativos, é de suma importância o estudo e compreensão da sua composição físico-química para a destinação de alternativas de maior valor agregado. Sendo assim, o

objetivo deste trabalho foi realizar a caracterização físico-química dos resíduos de pátio provenientes da etapa de descascamento de toras de uma indústria de celulose Kraft, avaliando suas propriedades e componentes estruturais para viabilizar o seu direcionamento para outras alternativas de uso tecnológico e sustentável.

2. Material e métodos

O Resíduo de Pátio foi coletado em uma fábrica de celulose kraft de uma empresa parceira do Laboratório de Resíduos da Indústria Florestal (LABRIF), no Mato Grosso do Sul. Posteriormente, o material foi enviado à Universidade Federal de Viçosa (UFV) e armazenado no Laboratório de Solos (UEPE – UFV).

Inicialmente, retirou-se uma fração do material *in natura* para a determinação da umidade. O restante do resíduo foi homogeneizado e disposto em lona para secagem prévia, visando à redução do excesso de umidade e posteriormente foi submetido às análises de densidade, granulometria, análise química qstrutural e elementar.

Para a determinação do teor de umidade, uma alíquota de aproximadamente 4,5 g do material foi pesada em balança analítica (Shimadzu, modelo ATX224R) e transferida para um cadinho de porcelana previamente seco em estufa. A amostra foi mantida em estufa a 100 °C até atingir massa constante, sendo o teor de umidade calculado por diferença de massa.

A densidade aparente do material foi determinada utilizando-se um recipiente de volume conhecido (13.515 cm^3). O resíduo foi adicionado até o preenchimento total do recipiente e, em seguida, a massa foi registrada. O cálculo da densidade foi realizado pela razão entre a massa do material e o volume ocupado.

A classificação granulométrica foi determinada com base na norma ISO 17827-1 (ISO, 2024). Para a realização do ensaio, foi separado um volume de 400 mL do material, o qual foi submetido à separação de partículas utilizando um agitador eletromagnético de peneiras adaptado, operando durante 10 minutos a uma rotação de 10 rpm. As peneiras utilizadas no experimento apresentavam aberturas de 101 mm, 76,2 mm, 50,8 mm, 31,5 mm, 19,1 mm, 15,9 mm, 12,7 mm, 9,52 mm e 6,35 mm e um fundo coletor. Após o peneiramento, as frações retidas em cada peneira foram pesadas individualmente utilizando béquer de 1 L como recipiente auxiliar e uma balança analítica.

Para determinação da composição química do resíduo de pátio foram empregadas as amostras já moídas, utilizando-se a fração que passou pela peneira com malha de 40 mesh e ficou retida na peneira com malha de 60 mesh (ASTM, 1982). A determinação do teor absolutamente seco da madeira foi realizada conforme a norma TAPPI 264 om-88 (TAPPI,

1998). Os teores de extrativos foram determinados em duplicatas, de acordo com a norma TAPPI 204 om-88 (TAPPI, 1996), utilizando-se o método de determinação de extrativos totais, apenas substituindo o etanol/benzeno, pelo etanol/tolueno.

Os teores de lignina insolúvel por sua vez, foram determinados em duplicata pelo método Klason, modificado de acordo com o procedimento proposto por Gomide e Demuner (1986). A lignina solúvel foi determinada por espectrometria, conforme Goldschimid (1971), a partir da diluição do filtrado proveniente do procedimento para obtenção da lignina insolúvel. O teor de lignina total foi obtido por meio da soma dos valores de lignina solúvel e insolúvel. O teor de holocelulose foi estimado por diferença, subtraindo-se do total os teores de extrativos e de lignina total.

A porcentagem de cinzas da amostra de resíduos de pátio foi determinada de acordo com a norma ABNT NBR 8112 (ABNT, 1986), substituindo-se o cadinho de platina por cadinho de porcelana e a temperatura de 750°C para 600°C.

A composição química elementar do resíduo foi determinada utilizando o equipamento TruSpec Micro (LECO). As amostras foram previamente peneiradas para obtenção de granulometria entre 40 e 60 mesh. A análise baseia-se na combustão completa do material no interior do aparelho, sob temperaturas que atingem até 1.050 °C, resultando na formação de gases que são conduzidos por filtros até as células de leitura. Em seguida, os elementos químicos são individualizados em sequência induzida, de acordo com a massa molecular de cada um, e quantificados por meio de software específico. O teor de nitrogênio (N) foi determinado por condutividade térmica, enquanto CO_2 e H_2O foram quantificados por detecção no infravermelho. Para o enxofre (S) foi utilizado o módulo TruSpec S, e para CHN o módulo TruSpec Micro. O teor de oxigênio (O) foi calculado pela diferença, considerando a soma dos teores de carbono, hidrogênio, nitrogênio, enxofre e cinzas, subtraída de 100, conforme a norma EN 15296 (DIN, 2011).

Os resultados foram apresentados por meio de estatística descritiva (média ± desvio-padrão). Os dados foram processados e analisados no software Microsoft Excel.

3. Resultados e discussão

Os resíduos de pátio provenientes da etapa de descascamento das toras apresentaram densidade aparente média de 0,185 g cm^{-3} (Tabela 1) , valor inferior ao observado para a madeira de eucalipto e compatível com materiais ricos em casca e frações finas. De acordo com

Araujo et al. (2024), a casca de eucalipto apresenta elevada porosidade e baixa compactação em comparação à madeira, refletindo em menores valores de densidade.

O teor de umidade observado foi de 20,81% (Tabela 1), valor substancialmente inferior ao encontrado em biomassas florestais recém-colhidas, que podem apresentar teores de umidade superiores a 60%, dependendo da espécie e das condições de processamento (Oliveira et al., 2005). O menor teor de umidade pode ser atribuído ao período de armazenamento do resíduo no pátio, aliado às condições climáticas de Três Lagoas (MS), onde a temperatura média anual é de 25,35 °C (Prefeitura Municipal de Três Lagoas, 2019; INMET, 2015–2019). Essas condições favorecem a evaporação da água presente na biomassa, contribuindo para a redução da umidade do material.

Tabela 1 – Caracterização física do resíduo de pátio da indústria de celulose kraft

Análise	Média	Desvio Padrão
Densidade (g/cm³)	0,185	0,0120
Umidade base seca (%)	20,81	4,56

A análise granulométrica evidenciou elevada heterogeneidade do resíduo, com predominância das frações mais grossas (>101 mm) e do material fino retido no fundo (<6,35 mm), como demonstrado no Figura 1. Essa distribuição reflete as operações de descascamento, transporte e movimentação das toras no pátio industrial, resultando em uma mistura de fragmentos de casca, partículas lenhosas e materiais finos.

Figura 1 – Distribuição das frações granulométricas.

A análise química elementar (Tabela 2) evidenciou que o resíduo de pátio apresentou teor de carbono de 45,8%, hidrogênio de 5,52%, nitrogênio de 0,30% e enxofre de 0,03%. O elevado teor de carbono sugere que o material apresenta potencial para a produção de biochar. Batista e Gomes (2021) observaram forte correlação positiva entre o teor de carbono da biomassa e o rendimento gravimétrico em biochar (r = 0,76), assim como o teor de nitrogênio e o rendimento gravimétrico (r = 0,77). Entretanto, as características e o rendimento do biochar não dependem exclusivamente da composição química da biomassa, sendo também

influenciados pelas condições operacionais da pirólise, como a temperatura e o tempo de residência.

Tabela 2. Análise química elementar do resíduo de pátio

Elemento	Teor de C (%)	Teor de H (%)	Teor de N (%)	Teor de S (%)
Média	45,8	5,52	0,30	0,03
Desvio Padrão	0,28	0,02	0,03	0,01

O teor de extrativos determinado foi de 3,72%, valor abaixo dos geralmente observados para cascas de eucalipto (Tabela 3). Contudo, esse resultado é próximo ao encontrado por Vieira et al. (2021), onde obtiveram o teor médio de 2,7% de extrativos em clones de *Eucalyptus* spp. A proximidade entre os valores pode estar relacionada à natureza heterogênea do resíduo de pátio avaliado, que pode conter frações de madeira e outros componentes, reduzindo o teor de extrativos, quando comparado à casca de eucalipto pura.

Tabela 3. Análise química estrutural do resíduo de pátio

Componente	Teor de Extrativo	Teor de Lignina Insolúvel	Teor de Lignina Solúvel	Teor de lignina total	Teor de holocelulose
Média	3,72	27,65	2,56	30,21	66,05

O aspecto mais relevante para a produção de biochar foi o elevado teor de lignina total, correspondente a 30,22%. Essa relevância está associada aestrutura aromática de grande estabilidade térmica presente na lignina, principalmente quando comparada à celulose e às hemiceluloses, pois se degrada de forma mais lenta durante a pirólise, em consequência, biomassas mais lignificadas tendem a apresentar maior rendimento no processo de produção de biochar, devido à maior resistência térmica desse componente, essa relação foi relatada por Batista e Gomes (2021), que observaram uma forte correlação positiva entre o teor de lignina e o rendimento em biochar, enquanto a holocelulose apresentou comportamento inverso. Como consequência, biomassas mais lignificadas tendem a produzir biochars com maior teor de carbono, reforçando o potencial da destinação da casca para esse uso.

Embora a casca de eucalipto apresente características que podem induzir à produção de biochar de qualidade, como composição lignocelulósica e o elevado teor de carbono, ainda se faz necessária a realização de estudos complementares. Esses devem incluir a produção experimental do biochar, seguida da caracterização completa, a fim de validar seu desempenho em aplicações específicas, como sequestro de carbono, melhoria da fertilidade do solo e remediação ambiental

4. Conclusões

Os resíduos de pátio provenientes do descascamento de toras apresentaram baixo teor de umidade, elevado teor de carbono e alto teor de lignina, características que reforçam seu potencial para a produção de biochar. A composição química observada sugere a possibilidade de maiores rendimentos gravimétricos e maior estabilidade do carbono, atributos relevantes para aplicações voltadas ao sequestro de carbono e à geração de créditos ambientais. Esses resultados indicam que o aproveitamento do resíduo de pátio pode representar uma alternativa estratégica para agregar valor à biomassa e contribuir para práticas de mitigação das mudanças climáticas. No entanto, estudos complementares envolvendo a produção experimental e a caracterização detalhada do biochar são necessários para validar esse potencial e avaliar seu desempenho em diferentes aplicações, como melhoria da fertilidade do solo e remediação ambiental.

5. Agradecimentos

À Universidade Federal de Viçosa (UFV), ao Departamento de Engenharia Florestal (DEF), ao Laboratório de Resíduos da Indústria Florestal (LABRIF), ao Laboratório de Painéis e Energia da Madeira (LAPEM), à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG), à Empresa Brasileira de Pesquisa e Inovação Industrial (EMBRAPII) e à Arauco Celulose do Brasil S.A.

6. Referências bibliográficas

American Society for Testing and Materials. (1982). *Standard methods of evaluating properties of wood-base fiber and particle materials*. ASTM International.

Araujo, S. L., Gimenez, G. G., Vidaurre, G. B., Castor Neto, T. C., Rezende, D. A. N., Protázio, L. B., Almeida, M. N. F., & Silva, J. G. M. (2024). The role of bark influencing eucalyptus wood properties for MDF production. SSRN. https://doi.org/10.2139/ssrn.4985203

Carvalho, N. R. de, Barros, J. L. de, Silva, D. A. da, Nakashima, G. T., & Yamaji, F. M. (2021). Caracterização física e química da biomassa usada como combustível sólido em uma caldeira. *Química Nova*, 44(1), 35-40. https://doi.org/10.21577/0100-4042.20170663

European Committee for Standardization. (2011). EN 15296: Solid biofuels: Conversion of analytical results from one basis to another. CEN.

Foelkel, C. (2016). Casca da árvore do eucalipto: Aspectos morfológicos, fisiológicos, florestais, ecológicos e industriais, visando à produção de celulose e papel. Eucalyptus Online Book. https://www.eucalyptus.com.br/capitulos/capitulo_casca.pdf

Goldschmid, O. (1971). Ultraviolet spectra. Em K. V. Sarkanen & C. H. Ludwig (Eds.), Lignins: Occurrence, formation, structure and reactions (pp. 241–266). Wiley-Interscience.

Goldschmid, O. (1971). Ultraviolet spectra. Em K. V. Sarkanen & C. H. Ludwig (Eds.), Lignins: Occurrence, formation, structure and reactions (pp. 241–266). Wiley-Interscience.

Gomide, J. L., & Demuner, B. J. (1986). Determinação do teor de lignina em material lenhoso: Método Klason modificado. *O Papel*, 47(8), 36–38.

Indústria Brasileira de Árvores. (2025, outubro). Relatório anual 2025. https://iba.org/wp-content/uploads/2025/10/relatorioAnual2025.pdf

International Organization for Standardization. (2025). ISO 17828:2025: Solid biofuels: Determination of bulk density. ISO.

Lin, S. Y., & Dence, C. W. (1992). Methods in lignin chemistry. Springer-Verlag.

Oliveira, J. T. S., Hellmeister, J. C., & Tomazello Filho, M. (2005). Variação do teor de umidade e da densidade básica na madeira de sete espécies de eucalipto. *Revista Árvore*, 29(1), 115–127. https://doi.org/10.1590/S0100-67622005000100013

Oni, B. A., Oziegbe, O., & Olawole, O. O. (2019). Significance of biochar application to the environment and economy. *Annals of Agricultural Sciences*, 64(2), 222–236. https://doi.org/10.1016/j.aoas.2019.12.006

Rowell, R. M., Pettersen, R., Han, J. S., Rowell, J. S., & Tshabalala, M. A. (2005). Cell wall chemistry. Em R. M. Rowell (Ed.), Handbook of wood chemistry and wood composites (pp. 35–74). CRC Press.

Technical Association of the Pulp and Paper Industry. (2001). *TAPPI test method T 264 om-88: Preparation of wood for chemical analysis*. TAPPI Press.

Technical Association of the Pulp and Paper Industry. (2022). *TAPPI test method T 264 cm-22: Preparation of wood for chemical analysis*. TAPPI Press.

Vieira, T. A. S., Arriel, T. G., Zanuncio, A. J. V., Carvalho, A. G., Branco-Vieira, M., Carabineiro, S. A. C., & Trugilho, P. F. (2021). Determination of the chemical composition of Eucalyptus spp. for cellulosic pulp production. *Forests*, 12(12), 1649. https://doi.org/10.3390/f12121649

Wallis, A. F. A., Wearne, R. H., & Wright, P. J. (1996). Analytical characteristics of plantation eucalypt woods relating to kraft pulp yields. *Appita Journal*, 49(5), 427–432.

Batista, R. R., & Gomes, M. M. (2021). Effects of chemical composition and pyrolysis process variables on biochar yields: Correlation and principal component analysis. *Floresta e Ambiente*, 28(3). https://doi.org/10.1590/2179-8087-FLORAM-2021-0007

Prefeitura Municipal de Três Lagoas. (2022). Estudos de concepção e proposta de uso futuro da região das Lagoas do Meio e Menor.

https://www.treslagoas.ms.gov.br/wp-content/uploads/2022/11/ESTUDOS-DE-CONCEPCAO-E-PROPOSTA-DE-USO-FUTURO-DA-REGIAO-DAS-LAGOAS-DO-MEIO-E-MENOR.pdf

International Organization for Standardization. (2024). ISO 17827-1:2024: Solid biofuels Determination of particle size distribution for uncompressed fuels. https://standards.iteh.ai/catalog/standards/cen/fb9d11d8-a4c8-496e-9e5d-f3bf8ed1f781/en-iso-17827-1-2024?srsltid=AfmBOop4j7A7SbpRwzEuf0IpFbn9RYGGvdw9yuK97Ne0N3lXy881F16q

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Potencial econômico e usos de palmeiras nativas da Mata Atlântica na Bahia

Elaine Cristina Martins[1]; Calline Chaves de Jesus[1], Jomar Gomes Jardim[1]; Lyvia Julienne Sousa Rêgo[1]

[1] Universidade Federal do Sul da Bahia - UFSB

Resumo: As palmeiras nativas da Mata Atlântica possuem elevado potencial econômico, porém seu aproveitamento na Bahia permanece pouco conhecido. Este estudo investigou a diversidade dessas espécies e seus usos por meio de revisão bibliográfica sistemática e levantamento de mercado nas microrregiões de Ilhéus–Itabuna e Porto Seguro. A revisão identificou 16 espécies, com predominância de estudos sobre *Attalea funifera* e *Euterpe edulis*. O mercado registrou produtos derivados de dez espécies, destacando *A. funifera* pela maior diversidade de produtos e *Bactris vulgaris* por apresentar importância comercial superior à descrita na literatura. Os resultados evidenciam que o conhecimento científico ainda não se reflete plenamente nas cadeias produtivas regionais, concentradas em poucas espécies. Conclui-se que a ampliação das pesquisas, da inovação e da agregação de valor aos produtos florestais não madeireiros pode fortalecer a bioeconomia e contribuir para a conservação das palmeiras nativas.

Palavras-chave: Arecaceae; Bioeconomia; Produtos Florestais Não Madeireiros.

Economic potential and uses of native Atlantic Forest palms in Bahia

Abstract: Native palms of the Atlantic Forest have high economic potential, although their use in Bahia remains poorly understood. This study investigated the diversity and uses of these species through a systematic literature review and a market survey conducted in the Ilhéus–Itabuna and Porto Seguro microregions. The review identified 16 native palm species, with most studies focusing on *Attalea funifera* and *Euterpe edulis*. The market survey recorded products from ten species, highlighting *A. funifera* for its product diversity and *Bactris vulgaris* for its commercial relevance, revealing a gap between scientific knowledge and regional value chains. The findings indicate that expanding research, innovation, and value addition to non-timber forest products can strengthen the regional bioeconomy while supporting the conservation of native palms.

Keywords: Arecaceae; Bioeconomy; Non-Timber Forest Products.

1. Introdução

As florestas tropicais desempenham papel fundamental na estabilidade ambiental global, atuando na regulação do clima, na conservação da biodiversidade e na manutenção de serviços ecossistêmicos essenciais (FAO, 2022). Entretanto, esses ecossistemas vêm sofrendo

intensa fragmentação, com perda de biodiversidade e comprometimento de suas funções ecológicas (Hubau et al., 2020). No Brasil, a Mata Atlântica (MA) exemplifica esse cenário, restando cerca de 23% de sua cobertura florestal original (Vancine et al., 2024).

Apesar da elevada degradação, a MA abriga uma das maiores diversidades de palmeiras dos neotrópicos, com 76 espécies distribuídas em 13 gêneros, das quais 54 são endêmicas (Jardim Botânico do Rio de Janeiro [JBRJ], 2025.). Essas espécies desempenham importante papel ecológico e fornecem diversos Produtos Florestais Não Madeireiros (PFNM), utilizados na alimentação, construção, artesanato, medicina, ornamentação e produção de fibras (Embrapa, 2012). Na Bahia, ocorre aproximadamente 64,5% dos táxons registrados para o bioma (JBRJ, 2025), incluindo espécies de elevada importância ecológica e econômica, como *Attalea funifera* Mart., *Euterpe edulis* Mart., *Acrocomia aculeata* (Jacq.) Lodd. Ex Mart. e *Syagrus amicorum* K.Soares & C.A.Guim. (Guimarães & Silva, 2012).

Entretanto, a produção científica sobre palmeiras da MA permanece concentrada em poucas espécies e na região Sudeste do Brasil, enquanto o Nordeste ainda apresenta reduzida representatividade. Essa distribuição desigual limita a sistematização de informações sobre os usos e o potencial econômico dessas espécies, dificultando a elaboração de estratégias de manejo, conservação e valorização dos PFNM (Cerqueira et al., 2024).

Diante desse contexto, este estudo investigou a diversidade e o potencial econômico das palmeiras nativas da MA na Bahia, integrando informações da literatura científica e do mercado regional, com o objetivo de subsidiar ações de conservação, manejo sustentável e valorização dos PFNM.

2. Material e métodos

A área de estudo compreendeu a Mesorregião do Sul Baiano, Bahia, formada pelas microrregiões de Ilhéus–Itabuna, Porto Seguro e Valença (IBGE, 1990), predominantemente inserida no domínio da Mata Atlântica (MA) e representativa de sua flora (Fundação SOS Mata Atlântica & INPE, 2024; Sambuichi, 2009). As espécies de palmeiras nativas arborescentes foram identificadas a partir de consultas à Flora e Funga do Brasil, SpeciesLink e CNCFlora (JBRJ, 2025; CRIA, 2026; CNCFlora, 2025).

Realizou-se revisão bibliográfica sistematizada nas bases SciELO, Google Acadêmico, Scopus e Web of Science, com buscas utilizando termos relacionados à MA, palmeiras, ecologia, conservação, extrativismo, usos e potencial econômico, incluindo estratégias específicas por espécie. Foram considerados estudos publicados entre 2010 e 2025, em

português ou inglês, sobre palmeiras nativas da MA. A seleção seguiu o protocolo PRISMA (Page et al., 2021), com 1.133 publicações inicialmente identificadas e 19 estudos incluídos após a aplicação dos critérios de elegibilidade. Foram extraídas informações sobre espécie, local, usos, resultados e limitações.

O levantamento de mercado foi realizado por amostragem por conveniência (Gil, 2008), em feiras, mercados, lojas de artesanato e outros estabelecimentos de Itabuna, Ilhéus, Camacan, Una, Canavieiras, Itacaré, Porto Seguro e Santa Cruz Cabrália. Foram registrados, quando disponíveis, espécie, parte utilizada, produto, categoria de uso e preço. A identificação botânica baseou-se nas informações de rótulos e etiquetas, complementadas pela verificação da procedência e consulta a herbários virtuais. A classificação dos produtos foi adaptada de EMBRAPA (2012) e IBGE (2026).

3. Resultados e discussão

O levantamento preliminar identificou 24 espécies de palmeiras nativas arborescentes da Mata Atlântica (MA) na Bahia, distribuídas em sete gêneros. A revisão bibliográfica registrou 16 espécies em 19 estudos, com predominância de *Attalea funifera* e *Euterpe edulis*, presentes em 57,9% dos trabalhos cada (Tabela 1). A concentração da produção científica nessas espécies está relacionada à importância econômica da piaçava e à relevância ecológica e conservacionista da juçara, o que foi observado também nos estudos de Melito et al. (2014), Pimentel & Del Menezzi (2020) e Silva et al. (2023). A Mesorregião do Sul Baiano concentrou 89,5% dos estudos, com destaque para Ilhéus–Itabuna, evidenciando concentração espacial e temática da produção científica.

Tabela 1 - Frequência de ocorrência das espécies de palmeiras da Mata Atlântica na Bahia registradas na literatura

Espécie	Nome vulgar	n	Frequência (%)
Attalea funifera Mart.	Piaçava	11	57,9
Euterpe edulis Mart.	Juçara ou palmeira-juçara	11	57,9
Attalea burretiana Bondar	Pindoba graúda	2	10,5
Attalea humilis Mart.	Catolé ou pindoba	2	10,5
Attalea seabrensis Glassman	Catolé	2	10,5
Bactris ferruginea Burret	Tucum ou mané-véio	2	10,5

Bactris setosa Mart.	Tucum-do-brejo ou tucum-piranga	2	10,5
Syagrus botryophora (Mart.) Mart.	Pati ou patioba	2	10,5
Acrocomia aculeata (Jacq.) Lodd. Ex Mart.	Macaúba	1	5,3
Allagoptera caudescens (Mart.) Kuntze	Buri ou palha-branca	1	5,3
Astrocaryum aculeatissimum (Schott) Burret	Ariri ou brejaúva	1	5,3
Attalea oleifera Barb.Rodr.	Pindoba ou babaçu	1	5,3
Bactris horridispatha Noblick ex A.J.Hendr.	Tucum-amarelo ou baralhá	1	5,3
Bactris vulgaris Barb.Rodr.	Tucum	1	5,3
Geonoma rubescens H.Wendl.	-	1	5,3
Syagrus romanzoffiana (Cham.) Glassman	Jerivá ou coco-babão	1	5,3

Nota. n = número de estudos nos quais a espécie foi registrada (n = 19).

A literatura registrou ampla diversidade de usos, incluindo aplicações alimentícias, artesanais, ornamentais, construtivas e industriais, com estudos recentes também abordando produtos de maior valor agregado, como biojoias, ecocompósitos e produtos de design (Figura 1). Esse potencial, contudo, permanece parcialmente explorado, uma vez que estudos anteriores já apontavam que, apesar da elevada diversidade de palmeiras no litoral sul da Bahia, poucas espécies eram efetivamente utilizadas como produtos florestais não madeireiros (PFNM) e que ainda havia lacunas quanto à ecologia, etnobotânica, manejo e transformação das matérias-primas (Oliveira et al., 2017).

Figura 1 – Frequência das categorias de uso das palmeiras nativas da Mata Atlântica na Bahia registradas na revisão bibliográfica.

Observou-se uma evolução temporal dos usos das palmeiras registrados na literatura. Enquanto os estudos mais antigos concentram-se em aplicações tradicionais, os mais recentes destacam produtos de maior valor agregado, refletindo avanços na inovação, no beneficiamento da matéria-prima e na valorização dos PFNM. Biojoias, ecocompósitos e design sustentável, embora menos frequentes, evidenciam novas oportunidades de diversificação econômica.

As espécies *Attalea funifera* e *Euterpe edulis* apresentaram maior diversidade de usos, associados principalmente à fibra de piaçava e aos frutos da juçara, respectivamente. Outras espécies, como *Acrocomia aculeata*, *Syagrus botryophora* e *Bactris ferruginea*, apresentaram usos alimentícios, artesanais, ornamentais e construtivos descritos na literatura, mas menor frequência de ocorrência nos estudos e limitada citação de inserção no mercado identificada neste levantamento**.** Esse cenário indica que parte do potencial de uso dessas espécies ainda não se converte em produtos comercializados, possivelmente em razão da baixa agregação de valor e do limitado desenvolvimento de processos de beneficiamento e transformação**.** A ampliação desse aproveitamento pode contribuir para a diversificação de produtos e geração de renda, desde que associada ao manejo sustentável, de modo a conciliar uso econômico e conservação das populações naturais.

O levantamento de mercado registrou a comercialização de produtos derivados de dez espécies de palmeiras nativas nas microrregiões Ilhéus–Itabuna e Porto Seguro, envolvendo fibras, folhas, frutos, sementes, estipes e óleos, destinados a utensílios artesanais, utilitários, culturais e de transformação (Tabela 2).

Tabela 2 - Categorias de uso de espécies de palmeiras nativas da Mata Atlântica e preços dos produtos identificados no mercado na Mesorregião do sul baiano

Microrregião	Espécie	Tipo de uso	Menor preço (R$)	Maior preço (R$)	Preço médio (R$)
Ilhéus–Itabuna	*Attalea funifera*	ART	25,00	120,00	61,00
Ilhéus–Itabuna	*Attalea funifera*	BIO	17,00	25,00	20,00
Ilhéus–Itabuna	*Attalea funifera*	CON	90,00	600,00	204,00
Ilhéus–Itabuna	*Attalea funifera*	USI	7,00	15,00	12,00
Ilhéus–Itabuna	*Attalea funifera*	RIT	30,00	30,00	30,00
Ilhéus–Itabuna	*Syagrus amicorum*	BIO	10,00	20,00	15,00
Ilhéus–Itabuna	*Syagrus amicorum*	IND	20,00	40,00	30,00
Ilhéus–Itabuna	*Syagrus amicorum*	ART.	18,00	350,00	80,00
Ilhéus–Itabuna	*Bactris vulgaris*	BIO	10,00	10,00	10,00
Ilhéus–Itabuna	*Bactris vulgaris*	ART	5,00	45,00	20,00
Ilhéus–Itabuna	*Attalea oleifera*	BIO	15,00	15,00	15,00
Ilhéus–Itabuna	*Attalea oleifera*	IND	15,00	35,00	23,00
Ilhéus–Itabuna	*Syagrus botryophora*	ART	3,00	150,00	42,00
Ilhéus–Itabuna	*Syagrus botryophora*	RIT	35,00	35,00	35,00
Ilhéus–Itabuna	*Astrocaryum aculeatissimum*	ART	70,00	70,00	70,00
Porto Seguro	*Attalea funifera*	ART	30,00	60,00	41,00
Porto Seguro	*Attalea funifera*	BIO	20,00	120,00	57,00
Porto Seguro	*Attalea funifera*	CON	45,00	100,00	73,00
Porto Seguro	*Attalea funifera*	RIT	30,00	70,00	50,00

Porto Seguro	*Bactris vulgaris*	BIO	20,00	30,00	25,00
Porto Seguro	*Bactris vulgaris*	ART	20,00	50,00	37,00
Porto Seguro	*Bactris vulgaris*	RIT	70,00	70,00	70,00
Porto Seguro	*Syagrus botryophora*	ART	20,00	80,00	44,00
Porto Seguro	*Syagrus botryophora*	BIO	30,00	30,00	30,00
Porto Seguro	*Syagrus schizophilla*	BIO	30,00	120,00	75,00
Porto Seguro	*Syagrus schizophilla*	ART	80,00	80,00	80,00
Porto Seguro	*Euterpe edulis*	ART	100,00	100,00	100,00
Porto Seguro	*Allagoptera arenaria*	ART	20,00	20,00	20,00
Porto Seguro	*Allagoptera caudescens*	ART	100,00	100,00	100,00

LEGENDA: Categorias de uso: ART – utensílio artesanal; ALI – alimentício; IND – matéria-prima para indústria de transformação; COM – matéria-prima para construção; BIO – biojóia; USI – utensílio semi-industrial; RIT – utensílio ritualístico.

Attalea funifera apresentou maior diversidade de produtos comercializados (com 32 produtos), seguida por *Bactris vulgaris* (22), *Syagrus amicorum* (17), *Syagrus botryophora* (12), *Syagrus schizophylla* (3), *Attalea oleífera* (3), *Euterpe edulis* (1), *Astrocaryum aculeatissimum* (1), *Allagoptera caudescens* (1) e *Allagoptera arenaria* (1), evidenciando a diversidade de aplicações comerciais da piaçava, também documentada em estudos sobre artesanato e beneficiamento no sul da Bahia (Silva et al., 2023) e que a importância econômica das espécies está associada principalmente à variedade de produtos e aos segmentos de mercado atendidos.

A variação dos preços entre produtos e microrregiões indicou diferentes níveis de beneficiamento e valorização, com produtos processados, como biojoias, cosméticos e objetos decorativos, alcançando maior valor agregado. Em Ilhéus–Itabuna, os preços variaram de R$ 3,00 a R$ 600,00, enquanto em Porto Seguro variaram de R$ 20,00 a R$ 120,00. Apesar de *E. edulis* figurar entre as espécies mais estudadas, apresentou apenas um produto no mercado, enquanto *B. vulgaris* e espécies de *Syagrus* tiveram maior expressão comercial que científica.

A comparação entre a revisão bibliográfica e o levantamento de mercado (Figura 2) sugere que o potencial econômico das palmeiras nativas ainda é parcialmente incorporado às cadeias produtivas regionais.

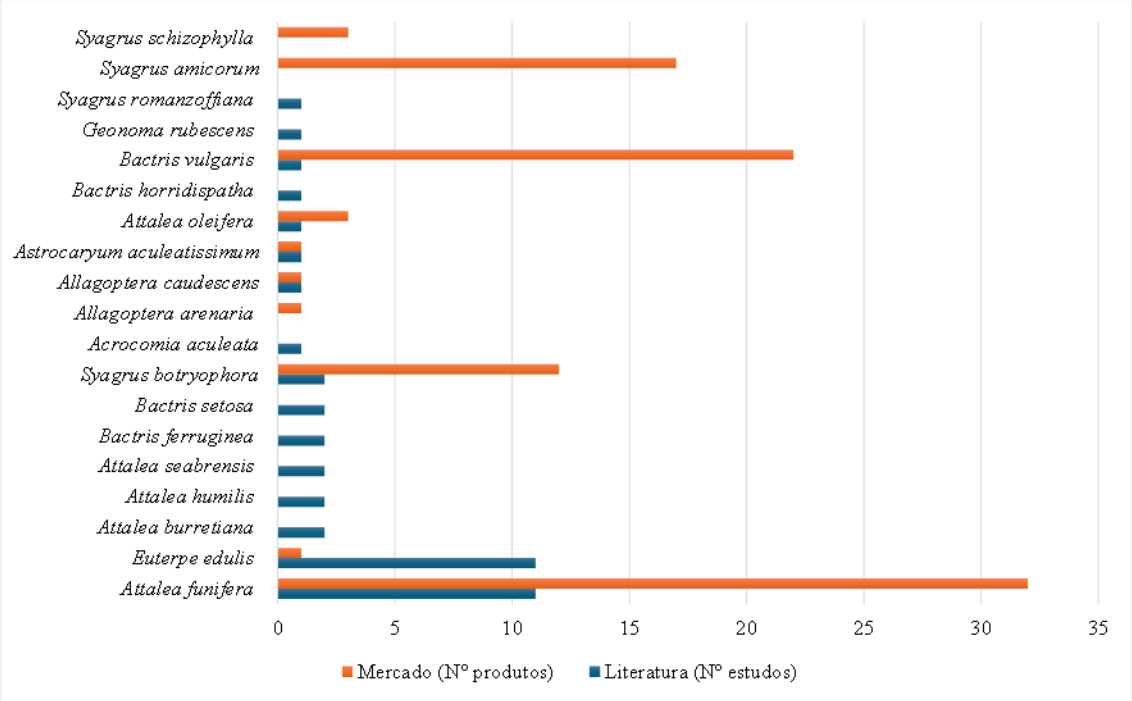


Figura 2 - Comparação entre o número de estudos da revisão bibliográfica e o número de produtos registrados no levantamento de mercado para as principais espécies de palmeiras nativas da Mata Atlântica

Enquanto a literatura documentou usos para 16 espécies, apenas dez foram registradas no mercado. *Attalea funifera* destacou-se em ambos os levantamentos, ao passo que *Bactris vulgaris* e espécies de *Syagrus* apresentaram maior expressão comercial que científica, diferentemente de *Euterpe edulis*, amplamente estudada, mas com baixa participação no mercado. Esses resultados indicam que a inserção das espécies depende da articulação entre conhecimento científico, beneficiamento, contexto sociocultural e fortalecimento das cadeias produtivas locais.

Em conjunto, os resultados evidenciam uma lacuna entre a diversidade de usos documentada na literatura e sua efetiva inserção no mercado, indicando oportunidades para pesquisa aplicada, agregação de valor e fortalecimento das cadeias produtivas, associados à valorização dos conhecimentos tradicionais e ao manejo sustentável. Essa perspectiva converge com Silva, Carvalho e Pedrosa (2023), que destacam a importância de políticas públicas e ações de apoio às atividades tradicionais, capazes de promover agregação de valor, sustentabilidade socioambiental e conservação da piaçava. Nesse contexto, a ampliação de estudos sobre espécies pouco exploradas comercialmente pode contribuir para identificar novos usos e produtos, enquanto o fortalecimento das cadeias produtivas pode favorecer a transformação das

matérias-primas e sua maior inserção no mercado, articulando geração de renda, valorização cultural e conservação.

4. Conclusões

A integração entre a revisão da literatura e o levantamento de mercado revelou que o potencial econômico das palmeiras nativas da MA baiana permanece parcialmente incorporado às cadeias produtivas regionais, uma vez que a literatura documentou usos para 16 espécies, enquanto o mercado registrou a comercialização de dez. A atividade econômica concentrou-se especialmente em *Attalea funifera*, enquanto *Bactris vulgaris* e espécies de *Syagrus* apresentaram maior expressão comercial que científica. Em contraste, *Euterpe edulis*, embora amplamente estudada, apresentou participação limitada no mercado.

Os resultados evidenciam a necessidade de ampliar o conhecimento sobre espécies pouco exploradas, fortalecer as cadeias produtivas e promover a agregação de valor aos PFNM, considerando as especificidades socioculturais e produtivas de cada região. Dessa forma, a integração entre conhecimento científico, conhecimentos tradicionais, inovação e manejo sustentável pode contribuir para ampliar a inserção das palmeiras nativas nas cadeias produtivas e favorecer a geração de renda e a conservação da biodiversidade.

5. Agradecimentos

Agradeço à UFSB, aos orientadores, colegas e colaboradores pelo apoio à pesquisa, e ao CNPq pela concessão da bolsa de Iniciação Científica. À minha família, pelo incentivo e apoio constantes, e a Deus, pela inspiração.

6. Referências bibliográficas

Cerqueira, A. F., Benchimol, M., Sousa-Santos, C., Bezerra, I. M., Dos Santos, M. S., Dalmolin, Â. C., Gaiotto, F. A., & Mielke, M. S. (2024). Tendências e lacunas na literatura sobre palmeiras nativas da Mata Atlântica Brasileira. *Austral Ecology*, 49(1). https://doi.org/10.1111/aec.13414.

Centro de Referência em Informação Ambiental. 2026. SpeciesLink Network. Recuperado em 25 de fevereiro de 2026, de https://specieslink.net/

Centro Nacional de Conservação da Flora. 2025. CNCFlora. Jardim Botânico do Rio de Janeiro. Recuperado em 20 de novembro de 2025; de https://cncflora.jbrj.gov.br/

Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária Amapá. (2012). Produtos florestais não madeireiros:Uso sustentável de açaí, andiroba, castanha e cipó-titica. Embrapa. PRODUTOS florestais não madeireiros: uso sustentável de açaí, andiroba, Castanha e cipó-titica – Portal Embrapa.

Food and Agriculture Organization (2022). The State of the World's Forests 2022: Forest pathways for green recovery and building inclusive, resilient and sustainable economies. https://doi.org/10.4060/cb9360en

Fundação SOS Mata Atlântica, & Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. (2024). Atlas dos remanescentes florestais da Mata Atlântica: Período 2022–2023. https://mtc-m21d.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/mtc-m21d/2024/09.09.13.41/doc/Atlas_Mata_Atlantica_2022-2023.pdf

Gil, A. C. (2008*).* Métodos e técnicas de pesquisa social (6ª ed.). Atlas.

Guimarães, C. A. L., & Silva, L. A. M. (2012). Piaçava da Bahia (Attalea funifera Martius): Do extrativismo à cultura agrícola. Editus.

Hubau, W., Lewis, S. L., Phillips, O. L., Affum-Baffoe, K., Beeckman, H., Cuni-Sanchez, A., Daniels, A. K., Ewango, C. E. N., Fofana, R. R., Kouame, F. N., et al. (2020). Asynchronous carbon sink saturation in African and Amazonian tropical forests. Nature, 579, 80–87. https://doi.org/10.1038/s41586-020-2035-0

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (1990). Divisão regional do Brasil em mesorregiões e microrregiões geográficas.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (2017). Divisão regional do Brasil em Regiões Geográficas Imediatas e Regiões Geográficas Intermediárias. IBGE.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (n.d.). Classificação Nacional de Atividades Econômicas – CNAE 2.0. Comissão Nacional de Classificação. https://concla.ibge.gov.br

Jardim Botânico do Rio de Janeiro. (2025). *Flora e Funga do Brasil*. Recuperado em 20 de novembro de 2025, de https://floradobrasil.jbrj.gov.br/

Melito, M. O., et al. (2014). Demographic structure of a threatened palm (*Euterpe edulis* Mart.) in a fragmented landscape of Atlantic Forest in northeastern Brazil. *Acta Botanica Brasilica, 28*(2), 249–258. https://doi.org/10.1590/S0102-33062014000200014

Oliveira, T. L. dos S. de, et al. (2017). Palms as source of non-timber forest products in the Southern Bahia Coast, Brazil. *Agrotrópica, 29*(3), 183–194. https://repositorio-dspace.agricultura.gov.br/bitstream/1/1550/1/BR2019000604.pdf

Page, M. J., et al. (2022). A declaração PRISMA 2020: diretriz atualizada para relatar revisões sistemáticas. Epidemiologia e Serviços de Saúde, 31(2), e2022107. https://doi.org/10.1590/S1679-49742022000200033

Pimentel, N. M., & Del Menezzi, C. H. S. (2020). Rendimento do processamento dos produtos oriundos da fibra vegetal da piaçava (*Attalea funifera*). *Nativa*, *8*(1), 137–144. https://doi.org/10.31413/nativa.v8i1.8096

Sambuichi, R. H. R. (2009). A Mata Atlântica, biodiversidade e conservação. Em R. H. R. Sambuichi, M. S. Mielke, & C. E. Pereira (Orgs.), Nossas árvores: Conservação, uso e manejo de árvores nativas no sul da Bahia (pp. 15–28). Editus.

Silva, G. C., Carvalho, A. J. A., & Pedrosa, C. M. (2023). O artesanato da piaçava das mulheres da comunidade quilombola de Pedra Rasa: Elemento de desenvolvimento social e biocultural, Camamu–BA, Brasil. Revista Macambira, 7(1), e071015. https://doi.org/10.35642/rm.v7i1.929

Vancine, M. H., Muylaert, R. L., Niebuhr, B. B., Oshima, J. E., Tonetti, F. V., Bernardo, R., De Angelo, C., Rosa, M. R., Grohmann, C. H., & Ribeiro, M. C. (2024). The Atlantic Forest of South America: Spatiotemporal dynamics of the vegetation and implications for conservation. Biological Conservation, 291, 110499.

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

POTENCIAL FITOTERÁPICO DO EXTRATO DE CASCAS DE MOGNO AFRICANO (*Khaya grandifoliola*) NO CONTROLE DA MASTITE BOVINA

Pedro Henrique Assis Domingues[1], Eduarda Velasco Alves[1], Camila Duarte[1], Vinicius Oliveira Santos[1], Eveline Soares Costa[1], João Gabriel Missia da Silva[2], Alex Fiori Silva[1], Thaís Brito Sousa[1]

[1] Universidade do Estado de Minas Gerais, Ituiutaba-MG, Brasil

[2] Sesi Saúde Vitória

RESUMO

O mogno africano (*Khaya grandifoliola)* possui cascas ricas em compostos bioativos que podem representar alternativas naturais para controle microbiano na bovinocultura leiteira. Este estudo investigou o rendimento e a atividade antimicrobiana de extratos obtidos por extração etanólica e particionamento líquido–líquido. Cascas de mogno africano secas e moídas foram submetidas à estração etanólica. Posteriomente, foi realizado o fracionamento do extrato bruto utilizando três solventes: haxano, diclorometado e água. Foram determinados o rendimento da extração e a concentração inibitória mínima (CIM) e Concentração bactericida mínima (CBM). A extração inicial resultou em 33 g de extrato bruto (6,6% p/p). O particionamento gerou três frações com rendimentos distintos: hidroalcoólica (72,2%), hexânica (13,56%) e o diclorometano (1,84%). A avaliação antimicrobiana, realizada por microdiluição em caldo, demonstrou que apenas a fração diclorometano apresentou atividade contra *Staphylococcus aureus*, com concentração inibitória mínima e Concentração bactericida mínima de 10 mg/mL. Os resultados sugerem que compostos de polaridade intermediária presentes na fração diclorometano são responsáveis pela atividade observada. Conclui-se que as cascas da espécie constituem recurso promissor e sustentável.

Palavras-chave: Atividade antimicrobiana; Extratos vegetais; Pecuária Sustentável.

Phytotherapeutic Potential of African Mahogany (*Khaya grandifoliola*) Bark Extract in the Control of Bovine Mastitis

Abstract: African mahogany (*Khaya grandifoliola*) bark is rich in bioactive compounds that may offer natural alternatives for microbial control in dairy farming. This study investigated the yield and antimicrobial activity of extracts obtained via ethanolic extraction and liquid-liquid partitioning. Dried and ground African mahogany bark was subjected to ethanolic extraction. Subsequently, the crude extract was fractionated using three solvents: hexane, dichloromethane, and water. The extraction yield, minimum inhibitory concentration (MIC), and minimum bactericidal concentration (MBC) were determined. Initial extraction yielded 33 g of crude extract (6.6% w/w). Partitioning produced three fractions with varying yields: hydroalcoholic (72.2%), hexanic (13.56%), and dichloromethane (1.84%). Antimicrobial evaluation using broth microdilution demonstrated that only the dichloromethane fraction exhibited activity

against *Staphylococcus aureus*, with a minimum inhibitory concentration (MIC) and minimum bactericidal concentration (MBC) of 10 mg/mL. The results suggest that intermediate-polarity compounds present in the dichloromethane fraction are responsible for the observed activity. It is concluded that the bark of this species represents a promising and sustainable resource.

Keywords: Antimicrobial activity; Plant extracts; Sustainable livestock.

1. Introdução

O Brasil possui o segundo maior rebanho de vacas ordenhadas e se mantém como o terceiro maior produtor mundial de leite, com uma produção recorde de, aproximadamente, 35,7 bilhões de litros em 2024 (IBGE, 2025). Esse volume representa um crescimento de 1,4% em relação ao ano anterior, mesmo com uma redução no número de vacas ordenhadas, que totalizou 15,1 milhões de cabeças, e produtividade média de 2.362 litros por ano por animal. O setor leiteiro movimentou cerca de bilhões em 2024, consolidando-se como um dos segmentos mais importantes da indústria de alimentos brasileira (ABIA, 2024).

A cadeia produtora de leite é fortemente sustentada por pequenos e médios produtores, responsáveis por cerca de 58% da produção nacional, sendo que mais de 80% das fazendas leiteiras estão vinculadas à agricultura familiar (Reis et al., 2018). Esses produtores têm papel fundamental na economia rural, geração de renda local e segurança alimentar, contribuindo com práticas de produção sustentável e diversificada. No entanto, enfrentam desafios como acesso limitado à tecnologia, assistência técnica e políticas de incentivo, o que evidencia a necessidade de soluções acessíveis e eficientes para melhorar a qualidade do leite (Luiz et al., 2023).

Nos últimos anos, os consumidores tornaram-se mais exigentes, buscando alimentos saudáveis, sustentáveis e de origem confiável (Martins et al., 2020). Essa mudança de comportamento tem impulsionado a valorização da rastreabilidade e de produtos orgânicos, cujo consumo cresceu cerca de 16% entre 2021 e 2023 (Varejo, 2023). Pesquisas indicam que 71% dos brasileiros consideram a procedência um fator decisivo na escolha dos alimentos, reforçando a pressão sobre produtores e indústrias para garantir maior qualidade e segurança nos produtos lácteos (Charlebois & Haratifar, 2015)

Um dos problemas que afeta a qualidade do leite é a mastite bovina, inflamação da glândula mamária causada por bactérias patogênicas, como *Staphylococcus aureus*, *Streptococcus agalactiae* e *Escherichia coli* (Huma, Sharma & Lee, 2022). A doença provoca grandes prejuízos econômicos e impactos no bem-estar animal, podendo reduzir a produção

em até 3 litros por dia por vaca, o que representa perdas de até 1.095 litros ao ano por animal e cerca de 1,75 bilhões de litros por ano em nível nacional (EMBRAPA, 2024) . Entre as principais medidas de prevenção destacam-se o pré e pós-dipping, que são sanitizantes utilizado durante e após a ordenha, que reduzem a carga microbiana e impedem a entrada de patógenos nos tetos, embora produtos comerciais como clorexidina e iodo apresentam limitações, como a resistência desses patógenos aos produtos comerciais.

Neste contexto, a busca por produtos de origem natural e que sejam sustentáveis se tornam fundamentais para contornar essa problemática e promover uma solução inovadora, inteligente e que promova a economia circular. O mogno africano, é uma cultura que possui madeira resistente e de alto valor comercial, entretanto, suas cascas são um passivo ambiental por ser considerado resíduo. É justamente na casca que se concentram compostos bioativos com potencial antimicrobiano, capazes de reduzir a carga microbiana associada à mastite. Além disso, o uso desse material, considerado resíduo da exploração madeireira, torna a proposta uma alternativa acessível e viável especialmente para pequenos e médios produtores (Locatelli et al., 2023).

As cascas de mogno, portanto, representam uma alternativa promissora para o desenvolvimento de soluções naturais na prevenção da mastite bovina, especialmente voltadas a pequenos e médios produtores. Assim, este estudo busca avaliar o rendimento de compostos bioativos presentes nas cascas de mogno africano e sua atividade antimicrobiana contra *S. aureus*, contribuindo para a melhoria da qualidade do leite e redução de perdas produtivas.

2. Material e métodos

2.1 Coleta e preparo de amostras

As cascas de *K. grandifoliola* foram utilizadas como matéria-prima para a produção do extrato. O material foi obtido a partir de cinco árvores com 12 anos de idade, cultivadas em sistema consorciado com *Coffea* spp., localizada em Ponte do Itabapoana, Mimoso do Sul, no Estado de Espírito Santo, Brasil. As cascas foram coletadas manualmente a partir de pranchas de madeira secas à sombra. Posteriormente, o material foi moído em moinho de martelo (Tecnal) e fracionado empregando peneiras granulométricas de 2.00 e 1.18 mm. A fração retida entre essas peneiras foi selecionada para as etapas subsequentes de extração.

2.2 Extração etanólica

500 g de casca seca e moída foram transferidas para um erlenmeyer de 3 L e posteiormente adicionou-se 2 L de etanol absoluto (99,8%). Agitou-se a mistura manualmente e deixou em descanso por 6 dias à temperatura de 25 ± 2 °C. Após o período de maceração, o extrato foi filtrado e submetido à evaporação do solvente em rotaevaporador à temperatura de 40 °C. O processo de extração foi repetido por 6 semanas. O extrato bruto seco foi armazenado em frasco de vidro a 25°C.

2.3 Particionamento líquido-líquido

Para o particionamento dos compostos bioativos, 25 g do extrato bruto (EB) foram dissolvidos em solução hidroalcoólica (etanol:água, 3:1 v/v). A solução do extrato bruto foi submetida ao particionamento líquido-líquido em funil de separação utilizando solventes de polaridade crescente: hexano (150 mL), diclorometano (150 mL) e fase hidroalcoólica (400 mL). Cada particionamento foi executado três vezes. As partições obtidas foram concentradas em rotavaporador. As frações foram denominadas FHKG, FDKG e FAKG para a fração hexânica, fração diclorometânica e a fração hidroalcoólica, respectivamente.

2.4 Avaliação da atividade antimicrobiana

As análises foram conduzidas pelo método de microdiluição em caldo, de acordo com o CLSI (M100-S22/2012), na qual foi avaliada a atividade antimicrobiana dos extratos obtidos de *K. grandifoliola*. Cada extrato seco foi pesado e solubilizado em *Mueller Hinton Broth* (MHB), obtendo-se soluções-estoque 50 $mg \cdot mL^{-1}$.

2.5.1 Preparo do inóculo.

O micro-organismo incluído nesse estudo foi *Staphylococcus aureus* ATCC 259230. A bactéria foi cultivada em Ágar Sal Manitol a 35 °C por 48 h. Na sequência, colônias isoladas provenientes da incubação em ágar manitol foram semeadas em caldo Mueller-Hinton (MHB, do inglês, *Muellher Hinton Broth)* e incubadas por 4–5 h até atingirem fase logarítmica de crescimento. A suspensão resultante foi ajustada ao padrão 0,5 da escala McFarland (≈ 5×10^5 $UFC \cdot mL^{-1}$) e diluída imediatamente antes da inoculação nas microplacas.

2.5.2 Determinação da concentração inibitória mínima (CIM) e concentração bactericida mínima (CBM)

Cem microlitros das soluções dos extratos foram distribuídas em microplacas de 48 poços em diferentes concentrações (10 a 0.321 mg. mL^{-1}). Na sequência, 10 µL da suspensão bacteriana foram semeadas nos poços das microplacas. As microplacas foram incubadas a 35°C por 24 h. A CIM foi determinada visualmente como a menor concentração do composto em que não houve crescimento microbiano.

A Concentração Bactericida Mínima (CBM) foi determinada a partir dos poços da microplaca que não apresentaram crescimento visível após o ensaio de microdiluição. Alíquotas de 10 µL foram aspiradas desses poços e semeadas em placas contendo ágar manitol, previamente divididas em seções identificadas como A1 e B1, correspondentes às concentrações testadas. As placas foram incubadas a 37 °C por 48 horas e, após esse período, avaliou-se a presença ou ausência de crescimento microbiano. A CBM foi definida como a menor concentração do extrato na qual não houve crescimento bacteriano no ágar manitol, confirmando a eliminação do microrganismo testado.

2.6- Controles experimentais e repetibilidade.

Foram utilizados como controles: controle de esterilidade (MHB sem inóculo), controle de crescimento (MHB + bactéria) e controle positivo contendo antimicrobiano padrão. Todos os ensaios foram realizados em triplicata e repetidos em duas ocasiões independentes, assegurando confiabilidade e reprodutibilidade dos dados.

3. Resultados e discussão

O processo de maceração com etanol absoluto, empregado para a extração de compostos das cascas de *K. grandifoliola*, resultou em 33,0 g de extrato bruto, sendo o rendimento total do processo de extração de 6,6% (p/p), calculado em relação à massa inicial de material vegetal seco (500,0 g).

O particionamento líquido-líquido do extrato bruto etanólico de *K. grandifoliola* com solventes de polaridade crescente revelou uma distribuição distinta dos compostos, conforme ilustrado pelos rendimentos diferentes de cada fração (Tabela 1).

Tabela 1- Rendimento adquirido

Frações	25 (g)	Rendimento (%)
Hexano	3,39	13,56
Diclorometano	0,46	1,84
Hidroalcoólico	18,05	72,2

A maceração prolongada por seis dias, associada à agitação manual diária, foi crucial para garantir um contato contínuo entre o solvente e a matriz vegetal, favorecendo a lixiviação dos metabólitos secundários para o meio líquido. A escolha do etanol absoluto (99,8%) como solvente mostrou-se estratégica, uma vez que sua elevada polaridade é adequada para a extração de uma ampla gama de compostos fenólicos, flavonoides e taninos comumente encontrados em espécies vegetais (Aliyu et al., 2016). Além disso, o etanol é considerado um solvente seguro, de baixa toxicidade, e permite sua recuperação e reutilização, conforme realizado neste trabalho, tornando o processo mais sustentável e economicamente viável.

O rendimento obtido de 6,6% evidencia, ainda, o elevado potencial das cascas de mogno africano como fonte de metabólitos secundários, especialmente considerando que esse valor foi alcançado antes mesmo da exaustão do material vegetal. Tal resultado é relevante do ponto de vista do aproveitamento como matéria-prima, uma vez que demonstra um rendimento expressivo aliado à crescente expansão dos plantios dessa cultura no Brasil, conforme discutido por Zhou et al. (2018). Adicionalmente, destaca-se que as cascas utilizadas provinham de indivíduos com aproximadamente 12 anos de idade, ou seja, muito antes do ciclo final da cultura.

A predominância da fração hidroalcoólica (72,2%) indica que o extrato bruto de *K. grandifoliola* é majoritariamente composto por metabólitos secundários de alta polaridade, o que é compatível com o uso de sistemas solventes polar-hidrofílicos, como etanol associado à água, reconhecidamente mais eficientes na extração de fenóis, flavonoides e taninos devido à elevada solubilidade desses compostos em meios polares (Lahmar, Yotova & Belghith, 2023). A elevada concentração de metabólitos como glicosídeos flavonoídicos, taninos hidrolisáveis, saponinas e alcaloides hidrofílicos pode explicar o potencial de atividades biológicas

expressivas, especialmente antimicrobianas e antioxidantes, descritas para esse grupo de compostos (Royani et al., 2024).

Nesse contexto, o presente estudo demonstrou que a extração etanólica das cascas de *K. grandifoliola*, seguida de particionamento líquido–líquido, permitiu a obtenção de frações com perfis químicos distintos, refletidos tanto nos diferentes rendimentos quanto nas variações observadas nas atividades biológicas, reforçando a eficiência da estratégia metodológica adotada.

A fração hexânica, com rendimento de 13,56%, indica a existência de compostos apolares ou de baixa polaridade no extrato. Solventes apolares como o hexano são reconhecidos por sua capacidade de solubilizar lipídios, terpenos, ceras e demais substâncias lipofílicas. Esse resultado reforça a possibilidade de coextração de constituintes lipofílicos durante a etapa inicial com etanol, posteriormente redistribuídos para o solvente apolar. Tais moléculas podem ter importância farmacológica, especialmente considerando que terpenos e esteróis apresentam, em diversos estudos, propriedades citotóxicas e bioativas (Royani et al., 2024).

Já a fração diclorometânica, com o rendimento mais baixo (1,84%), é tipicamente enriquecida em compostos de média polaridade. O diclorometano é um solvente de escolha para extrair alcalóides, lactonas e alguns terpenóides de polaridade intermediária compostos que não se dissolvem bem nem em fases muito polares, nem nas muito apolares (Ghaffar & Perveen, 2024)). Apesar do rendimento reduzido, essa fração pode concentrar moléculas altamente bioativas em pequenas quantidades, o que evidencia a necessidade de estudos fitoquímicos adicionais para a elucidação de seu potencial terapêutico (Kouam et al., 2022).

Os testes de Concentração Inibitória Mínima (MIC) permitiram avaliar a atividade antimicrobiana dos quatro extratos obtidos de *K. grandifoliola* frente a *S. aureus*. Entre os extratos avaliados, apenas a fração diclorometânica apresentou efeito antimicrobiano.Para essa fração, a CIM observada foi de 10 mg/mL, e a CBM apresentou o mesmo valor (10 mg/mL). A equivalência entre CIM e CBM é um resultado comum em extratos vegetais e frações semipolares, indicando que, na concentração mínima eficaz, os compostos presentes não apenas inibem o crescimento bacteriano, mas também são capazes de promover sua eliminação completa.

Apesar do maior rendimento da fração hidroalcoólica, a atividade antimicrobiana frente a *S. aureus* foi observada exclusivamente na fração diclorometânica. Tal resultado destaca a importância de compostos de polaridade intermediária, frequentemente relacionados a atividades farmacológicas específicas. Estudos prévios demonstram que frações semipolares de *K. grandifoliola* apresentam elevado potencial bioativo, como evidenciado por Kouam et al. (2022), que reportaram atividade hepatoprotetora significativa em frações diclorometano/metanol da casca da espécie. A correlação entre nossos achados e os dados da literatura reforça a hipótese de que limonóides, terpenóides e alcalóides de média polaridade possam ser os principais responsáveis pela atividade antimicrobiana observada.

A atividade antimicrobiana observada para a fração diclorometânica sugere que compostos presentes nesta fração, possivelmente de natureza apolar ou semiapolar, possuem maior afinidade biológica com a membrana celular bacteriana, resultando em ação inibitória mais pronunciada, o que está de acordo com estudos que indicam que compostos menos polares apresentam maior capacidade de interação com membranas biológicas (Moreira et al., 2025).

O extrato bruto, a fração hexânica e a fração aquosa não apresentaram inibição do crescimento de *S. aureus* na faixa de concentrações testadas. A persistência da turvação nesses poços indica que esses extratos não foram capazes de interferir no crescimento bacteriano, sugerindo baixa disponibilidade de compostos bioativos ou concentração insuficiente dos mesmos nessas frações, o que pode ser explicado pela ausência de componentes suficientemente lipofílicos para interagir efetivamente com a membrana celular bacteriana já que a lipofilicidade é um fator determinante na atividade antibacteriana de compostos naturais (Benramdane et al., 2022).

A determinação da CBM por meio da semeadura de alíquotas dos poços sem crescimento em ágar manitol permitiu confirmar o efeito bactericida dos extratos testados. De acordo com Balouiri, Sadiki & Ibnsouda (2016), essa etapa é fundamental para diferenciar entre efeito bacteriostático e bactericida, evitando interpretações equivocadas dos resultados. Assim, a metodologia empregada neste estudo se mostrou adequada e consistente com o que é recomendado na literatura científica.

É importante considerar que a elevada carga bacteriana típica de infecções por *S. aureus* representa um desafio adicional para a eficácia de compostos antimicrobianos naturais. Espécies como *S. aureus* apresentam grande capacidade de adaptação, formação de biofilme e

resistência a estresses ambientais, exigindo moléculas capazes de penetrar estruturas celulares compactas e atingir concentrações inibitórias suficientes mesmo em ambientes com alta densidade microbiana (Fidelis et al., 2024)). Isso reforça a relevância da fração diclorometânica ter demonstrado atividade mesmo frente a uma carga bacteriana significativa, sugerindo que os compostos presentes nessa fração possuem potência suficiente para atuar em condições de elevada pressão bacteriana característica essencial para aplicações no controle da mastite bovina, onde a carga microbiana no úbere tende a ser alta e persistentemente renovada.

4. Conclusões

O estudo mostrou que as cascas de *K. grandifoliola* é uma fonte relevante de compostos bioativos. Entre as frações obtidas, apenas a fração diclorometânica apresentou atividade antimicrobiana contra S. aureus, indicando que compostos de polaridade intermediária são os responsáveis pelo efeito observado. Além disso, o uso das cascas como matéria-prima representa uma estratégia sustentável, pois valoriza um subproduto frequentemente descartado, contribuindo para o aproveitamento integral da espécie e para práticas ambientalmente responsáveis. Os resultados reforçam o potencial farmacológico da planta e sugerem a necessidade de estudos futuros para isolar e identificar os compostos ativos.

5. Agradecimentos

Agradecemos à FAPEMIG (Fundo de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais) pelo apoio financeiro concedido por meio dos projetos APQ-03699-23 e APQ-04943-24. À equipe do Laboratório de Biomateriais de Produtos Naturais (LBPN) pelo apoio com infraestrutura e condições oferecidas para a realização deste trabalho. À Fazenda Tabatinga, em Mimoso do Sul, ES, pelo fornecimento das cascas utilizadas neste estudo.

6. Referências bibliográficas

Aliyu, A., Alkali, B. R., Yahaya, M. S., Garba, A., Adeleye, S. A., Gashua, M. M., & Sa'adatu, I. (2016). Phytochemical analysis and antibacterial activity of *Khaya senegalensis* bark extracts on *Bacillus subtilis*, *Escherichia coli* and *Proteus mirabilis*. *International Journal of Pharmaceutical Research and Allied Sciences*. https://ijpras.com/index.php/ijpras/article/view/476

Associação Brasileira da Indústria de Alimentos. (2024). *Relatório de faturamento da indústria de alimentos no Brasil*. https://www.abia.org.br/

Balouiri, M., Sadiki, M., & Ibnsouda, S. K. (2016). Methods for in vitro evaluating antimicrobial activity: A review. *Journal of Pharmaceutical Analysis, 6*(2), 71–79. https://doi.org/10.1016/j.jpha.2015.11.005

Benramdane, E., Chougui, N., Ramos, P. A. B., Makhlloufi, N., Tamendjari, A., Silvestre, A. J. D., & Santos, S. A. O. (2022). Lipophilic compounds and antibacterial activity of *Opuntia ficus-indica* root extracts from Algeria. *International Journal of Molecular Sciences, 23*, 11161. https://doi.org/10.3390/ijms231911161

Charlebois, S., & Haratifar, S. (2015). The perceived value of dairy product traceability in modern society: An exploratory study. *Journal of Dairy Science, 98*, 3514–3525. https://doi.org/10.3168/jds.2014-9247

Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. (2024). *Anuário leite 2024*.

Fidelis, C. E., Orsi, A. M., Freu, G., Gonçalves, J. L., & Santos, M. V. dos. (2024). Biofilm formation and antimicrobial resistance of *Staphylococcus aureus* and *Streptococcus uberis* isolates from bovine mastitis. *Veterinary Sciences, 11*, 170. https://doi.org/10.3390/vetsci11040170

Ghaffar, N. N., & Perveen, A. (2024). Solvent polarity effects on extraction yield, phenolic content, and antioxidant properties of Malvaceae family seeds: A comparative study. *New Zealand Journal of Botany*. https://doi.org/10.1080/0028825X.2024.2392705

Huma, Z. I., Sharma, N., Kour, S., & Lee, S. J. (2022). Phenotypic and molecular characterization of bovine mastitis milk origin bacteria and linkage of intramammary infection with milk quality. *Pathogens, 11*(9). https://doi.org/10.3389/fvets.2022.885134

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. (2025). *Produção de leite no Brasil – 2024*. https://www.ibge.gov.br/explica/producao-agropecuaria/leite/br

Kouam, A. F., Masso, M., Kouoh, F. E., Fifen, R., Njingou, I., Tchana, A. N., Njayou, F. N., & Moundipa, P. F. (2022). Hydro-ethanolic extract of *Khaya grandifoliola* attenuates heavy metals-induced hepato-renal injury in rats by reducing oxidative stress and metals-bioaccumulation. *Heliyon, 8*, e11685. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e11685

Lahmar, I., Yotova, L., & Belghith, K. (2023). Effect of polar solvent on the efficiency of phenolic compounds and antioxidant potency of lavender wild-growing in Tunisia. *Journal of Oasis Agriculture and Sustainable Development, 5*, 1–5.

Locatelli, J. F. P., Nardi Junior, G. de, Franco, J. R., & Ciccone, C. E. (2023). Importância do pré-dipping e pós-dipping no controle da mastite bovina. *Brazilian Journal of Development, 9*, 31100–31107. https://doi.org/10.34117/bjdv9n12-035

Luiz, V. T., Nacimento, R. A., Rezende, V. T., Almeida, T. F. A. de, Paz, J. V., Giannetti, B. F., & Gameiro, A. H. (2023). Sustainability assessment of intensification levels of Brazilian smallholder integrated dairy-crop production systems: An emergy and economic-based decision approach. *Sustainability, 15*, 4674. https://doi.org/10.3390/su15054674

Martins, A. P. O., Bezerra, M. de F., Marques Júnior, S., Brito, A. F., Andrade Neto, J. C., Galvão Júnior, J. G. B., Lima Júnior, D. M., & Rangel, A. H. do N. (2020). Consumer behavior of organic and functional foods in Brazil. *Food Science and Technology, 40*(2), 371–379. https://doi.org/10.1590/fst.03519

Moreira, L. L. P. F., Oliveira, L. A., Conti, R., Almeida, L. C., Costa-Lotufo, L. V., Micheletti, A. C., Dolci, I., Fernandes, R. S., Oliva, G., Guido, R. V. C., Lacerda Jr., V., Borges, K. B., & Borges, W. S. (2025). Compounds isolated from *Paepalanthus* spp. (Eriocaulaceae) and their evaluation in antimicrobial, cytotoxic, and antiviral assays. *ACS Omega, 10*, 26403–26414. https://doi.org/10.1021/acsomega.4c11026

Reis, E. M. B., Lopes, M. A., Demeu, F. A., Bruhn, F. R. P., Lima, A. L. R., de Benedicto, G. C., & Pelegrini, D. F. (2018). Characterization of family-owned dairy farms in the western Amazon. *Semina: Ciências Agrárias, 39*(5), 2233–2246. https://doi.org/10.5433/1679-0359.2018v39n5p2233

Royani, A., Mubarak, N. M., Hanafi, M., Verma, C., Lotulung, P. D. N., Prastya, M. E., Alfantazi, A., & Manaf, A. (2024). Effect of solvent polarity on yield extract, antioxidant and antibacterial activities of phytochemicals from *Andrographis paniculata* leaves. *Indian Chemical Engineer*. https://doi.org/10.1080/00194506.2024.2409260

Varejo S.A. (2023). *Pesquisa aponta crescimento de 16% no consumo de alimentos orgânicos no Brasil em 2023*. https://varejosasa.com.br

Zhou, M. M., et al. (2018). Anti-inflammatory activity of khayandirobilide A from *Khaya senegalensis* via NF-κB, AP-1 and p38 MAPK/Nrf2/HO-1 signaling pathways in lipopolysaccharide-stimulated RAW 264.7 and BV-2 cells. *Phytomedicine, 42*, 152–163. https://doi.org/10.1016/j.phymed.2018.03

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Potencial fungistático da fração tânica de *Anadenanthera colubrina* (Vell.) Brenan frente ao *Sporothrix brasiliensis*

Carlos Augusto Cardoso Fernandes[1]; Fernanda de Nobrega Medeiros[1]; Rafael Lucas Marassi[1]; Ana Helise Abreu Rodrigues da Silva[1]; Giovane Guimarães Farias[1]; Jessica Tavares Chaves Faria[1]; Águida Aparecida de Oliveira[1]; Natália Dias de Souza[1]

[1] Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro

Resumo: A esporotricose, impulsionada pelo hipervirulento *Sporothrix brasiliensis*, representa um desafio crescente à saúde pública pela emergência de cepas resistentes. Este estudo objetivou investigar a atividade antifúngica *in vitro* da fração tânica da casca de *Anadenanthera colubrina* frente a um isolado clínico de *S. brasiliensis* (INCQS 40360). O extrato foi obtido por extração aquosa da casca moída e padronizada sob refluxo por duas horas, seguida de filtração a vácuo e secagem em estufa. O perfil de suscetibilidade e a Concentração Inibitória Mínima (CIM) foram determinados pelo ensaio de microdiluição em caldo (CLSI M60-S1). O extrato tânico da casca de *Anadenanthera colubrina* exibiu ação fungistática, suprimindo o crescimento do patógeno a 100 mg/mL. A exigência desta dosagem reflete o impedimento estérico do alto peso molecular do polímero isolado e a ausência de sinergismo dos extratos brutos. O ensaio confirmou a resistência do isolado ao itraconazol (CIM >0,016 mg/mL), mantendo suscetibilidade à anfotericina B (CIM = 0,008 mg/mL). Conclui-se que a capacidade inibitória do tanino da casca de *A. colubrina* valida seu potencial biotecnológico.

Palavras-chave: Azóis; Resistência fúngica; Produtos naturais

Fungistatic potential of the tannic fraction from *Anadenanthera colubrina* (Vell.) Brenan against *Sporothrix brasiliensis*

Abstract: Sporotrichosis, driven by the hypervirulent *Sporothrix brasiliensis*, is a growing public health challenge due to emerging resistant strains. This study aimed to investigate the *in vitro* antifungal activity of the tannic fraction from *Anadenanthera colubrina* bark against a clinical isolate of *S. brasiliensis* (INCQS 40360). The extract was prepared by aqueous extraction of the standardized milled bark under reflux for two hours, followed by vacuum filtration and oven drying. Susceptibility and Minimum Inhibitory Concentration (MIC) were determined via broth microdilution (CLSI M60-S1 guidelines). The extract exhibited fungistatic action, suppressing pathogen growth at 100 mg/mL. This dosage requirement reflects the steric hindrance of the isolated polymer's high molecular weight and the lack of crude extract synergism. The assay confirmed isolate resistance to itraconazole (MIC >0.016 mg/mL), while maintaining susceptibility to amphotericin B (MIC = 0.008 mg/mL). In conclusion, the inhibitory capacity of *A. colubrina* metabolites confirms its biotechnological potential.

Keywords: Azoles; Fungal resistance; Natural products.

1 Introdução

A esporotricose é reconhecida mundialmente como a micose de implantação mais significativa, consistindo em uma infecção fúngica resultante da inoculação traumática de propágulos infecciosos no tecido subcutâneo (Rodrigues et al., 2022; Carolis et al., 2022). Nas últimas décadas, o Brasil emergiu como um epicentro de hiperendemia desta zoonose, impulsionada primariamente pelo patógeno emergente *Sporothrix brasiliensis* (Teixeira et al., 2022; Macêdo-Sales et al., 2020). Frequentemente associado a expressivos surtos de transmissão epizoótica e zoonótica mediados por felinos domésticos, este fungo dimórfico alterou drasticamente o panorama epidemiológico da doença no país (Rodrigues et al., 2022; Corrêa-Junior et al., 2023).

Diferentemente de outros agentes patogênicos do mesmo gênero, o *S. brasiliensis* destaca-se por estar intrinsecamente ligado a genótipos hipervirulentos (Teixeira et al., 2022). Clinicamente, essa característica se traduz na indução de quadros atípicos e severos em humanos, incluindo infecções cutâneas disseminadas mesmo na ausência de imunossupressão subjacente, acometimento de mucosas e reações exacerbadas de hipersensibilidade (Almeida-Paes et al., 2014; Rodrigues et al., 2022). Essa marcante severidade clínica é sustentada por uma alta plasticidade fenotípica e adaptações genômicas que favorecem a agressividade do patógeno (Teixeira et al., 2022; Macêdo-Sales et al., 2020).

O manejo terapêutico das infecções causadas por *S. brasiliensis* tem se tornado progressivamente desafiador devido à emergência de resistência aos antifúngicos convencionais, notadamente aos azóis e polienos (Rodrigues et al., 2022). Observa-se que cepas deste patógeno exibem perfis de suscetibilidade não selvagem (*non-wild-type*) ao itraconazol e à anfotericina B (Rodrigues et al., 2022). Tais variações podem estar associadas a polimorfismos de nucleotídeo único (SNPs) e expressivas duplicações cromossômicas, frequentemente ligadas a genes do metabolismo lipídico (Teixeira et al., 2022). Além disso, a discrepância na atividade fungistática e fungicida, mesmo entre isolados provenientes de um único hospedeiro, evidencia um risco iminente de falha terapêutica prolongada (Almeida-Paes et al., 2014; Macêdo-Sales et al., 2020).

Diante da ameaça contínua de refratariedade farmacológica e da limitação de alternativas disponíveis, a bioprospecção de novas moléculas bioativas torna-se uma prioridade (Maia et al., 2021; Almeida et al., 2022). Metabólitos secundários de origem vegetal, especialmente os taninos, são amplamente reconhecidos na literatura científica por suas propriedades antifúngicas (Woźniak, 2022). Neste contexto biotecnológico, a espécie arbórea *Anadenanthera colubrina* (Vell.) Brenan (angico-branco) destaca-se pelo expressivo teor de

compostos fenólicos em sua casca (Mota et al., 2017; Costa et al., 2020). Embora estudos prévios com extratos padronizados desta matriz tenham demonstrado promissora atividade fungicida (Maia et al., 2021), a avaliação direta de suas frações isoladas contra patógenos hipervirulentos ainda representa uma lacuna inexplorada.

Portanto, o presente estudo objetivou investigar o potencial antifúngico *in vitro* da fração tânica extraída da casca de *A. colubrina* frente ao *Sporothrix brasiliensis.*

2 Material e métodos

2.1 Material

A espécie Angico Branco (*Anadenanthera colubrina* (Vell.) Brenan) utilizada nesta pesquisa foi coletada em Mangaratiba, no estado do Rio de Janeiro (RJ), Brasil, localizada nas coordenadas 43° 59' 55.73" W e 22° 23' 56.74" S, a 1119 metros acima do nível do mar. As amostras foram obtidas de um agrupamento de aproximadamente 10 indivíduos adultos, identificados por meio do mapeamento de coleta de sementes realizado pela equipe do Programa Replantando Vida da Companhia Estadual de Águas e Esgotos (CEDAE).

2.2 Preparo dos extrativos da casca

As cascas foram cavaqueadas e processadas em moinho de facas tipo Willey. A fração que foi utilizada para o preparo dos extrativos foi referente a porção que atravessou a peneira de malha 40 mesh e que se manteve retida na peneira de 60 mesh como preconiza a norma da Technical Association of the Pulp and Paper Industry (TAPPI, 1997).

Foram adicionados 10g da casca homogeneizada em cartuchos de papel filtro e em seguida os mesmos cartuchos foram submetidos a extração. Foi feito uma relação de 15:1, onde, foi utilizado 150 ml de água destilada para 10g de casca e levado para balão sob refluxo por 2 horas. Após a extração, o material foi filtrado a vácuo, em cadinho de vidro sinterizado de peso conhecido previamente tarado. O material foi levado à estufa a 103 °C durante 24h e posteriormente pesado. Foram realizadas cinco repetições (SAMPAIO, 2022).

2.3 Avaliação da Atividade Antifúngica através da determinação da concentração inibitória mínima (CIM)

O perfil de suscetibilidade das cepas do *Sporothrix brasiliensis* (*S. brasiliensis* INCQS 40360) foi delineado pelo ensaio de microdiluição em caldo, conforme as diretrizes CLSI M60-S1 (2017). O inóculo, oriundo de culturas reativadas em ágar Sabouraud-dextrose (35 °C), foi

padronizado por espectrofotometria através da escala 0,5 de McFarland, correspondendo a uma densidade celular de 1,0 x 10^6 a 5,0 x 10^6 UFC/mL. O ensaio foi conduzido em microplacas de 96 poços com fundo em "U", utilizando o meio sintético RPMI-1640 (tamponado com MOPS e suplementado com 2 % de glicose). As soluções-estoque do extrato tânico seco foram solubilizadas em veículo composto por DMSO e Tween 80 (1:1), enquanto os fármacos comerciais Itraconazol e Anfotericina B foram utilizados como controles positivos. Todos os tratamentos foram submetidos à diluição seriada (fator de diluição igual a 2), estabelecendo faixas de concentração de trabalho de 200 a 0,390 mg/mL para o extrato vegetal, e de 16 a 0,031 µg/mL para os fármacos de referência.

Após o período de incubação de 48 horas a 37 °C, a Concentração Inibitória Mínima (CIM) foi visualmente determinada como a menor concentração de cada composto capaz de suprimir integralmente o crescimento fúngico. A validade do delineamento experimental foi assegurada pela inclusão sistemática de controles de esterilidade do meio, viabilidade celular (crescimento do fungo sem tratamento) e toxicidade do veículo (DMSO/Tween 80).

3 Resultados e discussão

O extrato tânico da casca de *A. colubrina* demonstrou atividade antifúngica frente à cepa de *S. brasiliensis* (INCQS 40360), apresentando um perfil inibitório específico quando comparado aos fármacos de referência (Tabela 1).

Tabela 1 Concentração Inibitória Mínima (CIM) do extrato tânico da casca de *A. colubrina* e de antifúngicos comerciais sobre *S. brasiliensis* (INCQS 40360).

	Concentração inibitória (mg / mL)	
Tratamento	**Tipo de extrato**	***Sporothrix brasiliensis***
Itraconazol	Controle	>0,016
Anfotericina B	Controle	0,008
Extrato da casca de *A. colubrina*	Tanino	100

Nota: O valor (> 0,016 mg/mL) para o Itraconazol representa a maior concentração testada no ensaio, na qual não foi observada a inibição do crescimento fúngico.

A avaliação *in vitro* por meio do método de microdiluição em caldo permitiu determinar os perfis de suscetibilidade do isolado clínico de *S. brasiliensis* (Tabela 1). Observou-se que o extrato tânico de *A. colubrina* inibiu o crescimento macroscópico do fungo na concentração de 100 mg/mL. O resultado demonstra que o composto purificado atuou de forma estritamente fungistática, restringindo a proliferação do patógeno sem promover atividade fungicida letal imediata.

A natureza fungistática e a exigência de uma concentração mais elevada para a inibição celular podem ser explicadas através das propriedades físico-químicas naturais dessas moléculas. Conforme estabelecido por Cosme et al. (2025) e corroborado por Smeriglio et al. (2017), os taninos são polifenóis de alto peso molecular, cujas funções biológicas e capacidade de internalização celular estão diretamente sujeitas ao seu grau de polimerização estrutural e solubilidade. Estes autores indicam que a dimensão destas macromoléculas configura um impedimento estérico, dificultando a sua translocação através das robustas barreiras protetoras externas do fungo. Esse fenômeno resulta na estagnação metabólica do patógeno, ao invés de induzir a sua imediata ruptura estrutural.

Somado às restrições de permeação do polímero isolado, é necessário considerar a capacidade adaptativa do microrganismo em questão. Como alertado por Corrêa-Junior et al. (2023) e Macêdo-Sales et al. (2020), o *S. brasiliensis* exibe uma plasticidade fenotípica, modulando a composição de sua parede celular e expressando múltiplos fatores de virulência para sobreviver a condições adversas. Em contrapartida, as investigações conduzidas por

Delices et al. (2023) e Junior et al. (2021) relataram um frequente e forte potencial biocida para os extratos brutos do angico-branco. Tais apontamentos evidenciam que a ação letal observada na literatura decorre do alto efeito sinérgico entre os taninos e os demais metabólitos secundários presentes na casca (como alcaloides, flavonoides e ácidos fenólicos). A separação e a aplicação exclusiva da fração tânica suprimem essa rede de interações potencializadoras, limitando a resposta celular ao efeito inibitório basal.

A análise dos fármacos utilizados como controle clínico revela um panorama epidemiológico preocupante. Enquanto o fungo manteve-se altamente suscetível à anfotericina B (CIM = 0,008 mg/mL), o seu crescimento não foi contido pelo itraconazol na concentração máxima testada no ensaio (>0,016 mg/mL). Este comportamento *in vitro* efetiva os crescentes alertas globais emitidos por Rodrigues et al. (2022) acerca dos complexos obstáculos no manejo da esporotricose contemporânea, impulsionados pela rápida evolução da resistência aos agentes azólicos.

A resistência ao itraconazol constatada neste trabalho traduz a alta capacidade adaptativa das linhagens hipervirulentas de *S. brasiliensis*. Conforme elucidado pelas análises genômicas de Macêdo-Sales et al. (2020) e Teixeira et al. (2022), modificações estruturais no DNA do patógeno, tais como mutações pontuais (SNPs) e a amplificação no número de cópias de genes associados ao metabolismo lipídico, impactam criticamente a interação com o antifúngico, resultando em falhas terapêuticas.

Diante da expansão clonal de cepas atestada por Teixeira et al. (2022), a constatação de que os taninos de *A. colubrina* possuem um perfil estritamente fungistático não diminui sua relevância investigativa e biotecnológica. Substâncias fitoquímicas capazes de paralisar a replicação fúngica apresentam imenso potencial em terapias e formulações de uso local, abrindo caminhos importantes para ensaios futuros de combinação com fármacos comerciais visando reverter perfis de resistência.

4 Conclusões

O presente estudo conclui que a fração tânica extraída da casca de *Anadenanthera colubrina* (Vell.) Brenan atua de forma primariamente fungistática (CIM = 100 mg/mL) contra o isolado clínico de *Sporothrix brasiliensis*. Diante da resistência do patógeno ao itraconazol evidenciada neste ensaio, o que comprova a urgência por novas estratégias clínicas, a capacidade inibitória do polímero consolida o seu potencial biotecnológico.

5 Agradecimentos

Os autores agradecem ao Laboratório de Micotoxicologia, da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (UFRRJ), pelo apoio técnico e pela infraestrutura disponibilizada para a realização deste trabalho.

6 Referências bibliográficas

Almeida, A. A., Leite, J. P. V., Simão, M. V. R. C., & Rody, H. V. S. (2022). Molecular bioprospecting of plant extracts: Experience report of the BIOPROS/UFV group in the search for antitumor compounds. Revista Fitos, 16(Supl. 2), 238-246. https://revistafitos.far.fiocruz.br/index.php/revista-fitos/article/view/1285.

Almeida-Paes, R., Oliveira, M. M. E. d., Freitas, D. F. S., Valle, A. C. F. d., Zancopé-Oliveira, R. M., & Gutierrez-Galhardo, M. C. (2014). Sporotrichosis in Rio de Janeiro, Brazil: Sporothrix brasiliensis is associated with atypical clinical presentations. PLOS Neglected Tropical Diseases, 8(9), e3094. https://journals.plos.org/plosntds/article?id=10.1371/journal.pntd.0003094.

Clinical and Laboratory Standards Institute. (2017). Performance standards for antifungal susceptibility testing of yeasts (1ª ed., CLSI supplement M60).

Corrêa-Junior, D., de Andrade, I. B., Alves, V., Avellar-Moura, I., Rodrigues-Alves, T., de Souza Rabello, V. B., de S. Araújo, G. R., Borba-Santos, L. P., Zancopé-Oliveira, R. M., Almeida-Paes, R., & Frases, S. (2023). Metabolic plasticity and virulence-associated factors of Sporothrix brasiliensis strains related to familiar outbreaks of cat-to-human transmitted sporotrichosis. Journal of Fungi, 9(7), 724. https://www.mdpi.com/2309-608X/9/7/724.

Cosme, F., Aires, A., Pinto, T., Oliveira, I., Vilela, A., & Gonçalves, B. (2025). A comprehensive review of bioactive tannins in foods and beverages: Functional

properties, health benefits, and sensory qualities. Molecules, 30(4), 800. https://www.mdpi.com/1420-3049/30/4/800.

Costa, O. J. d., Barbosa, R. d. S., Soares, I. M., Souza, E. E. d., Gellen, L. F. A., Lemos, J. P. P. P., Aguiar, R. W. S., Montel, A. L. B., & Ascêncio, S. D. (2020). Inhibitory effects of Anadenanthera colubrina (Vell.) Brenan stem bark extract on α-glucosidase activity and oxidative stress. Journal of Medicinal Plants Research, 14(11), 583-592. https://academicjournals.org/journal/JMPR/article-abstract/062FDAC65113.

De Carolis, E., Posteraro, B., & Sanguinetti, M. (2022). Old and new insights into Sporothrix schenckii complex biology and identification. Pathogens, 11(3), 297. https://www.mdpi.com/2076-0817/11/3/297

Delices, M., Muller, J. A. I., Arunachalam, K., & Martins, D. T. O. (2023). Anadenanthera colubrina (Vell.) Brenan: Ethnobotanical, phytochemical, pharmacological and toxicological aspects. Journal of Ethnopharmacology, 300, 115745.https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S037887412200784X.

Junior, O. C., Lima, N. M., Silva, M. G. A., Aguiar, V. B., Carli, G. P., Scherrer, E. C., Castro, S. B. R., Alves, C. C. S., Oliveira, M. A. L., & Carli, A. P. (2021). In vitro and in vivo evaluation of anti-inflammatory activity and free radical scavenging potential of leaves extract from Anadenanthera colubrina. Natural Product Research, 35(22), 4819-4823. https://doi.org/10.1080/14786419.2020.1727472.

Macêdo-Sales, P. A., Souza, L. O. P., Della-Terra, P. P., Lozoya-Pérez, N. E., Machado, R. L. D., Rocha, E. M. d. S. d., Lopes-Bezerra, L. M., Guimarães, A. J., Rodrigues, A. M., Mora-Montes, H. M., Santos, A. L. S. d., & Baptista, A. R. d. S. (2020). Coinfection of domestic felines by distinct Sporothrix brasiliensis in the Brazilian sporotrichosis hyperendemic area. Fungal Genetics and Biology, 140, 103397. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1087184520300888

Maia, C. M. d. A., Pasetto, S., Nonaka, C. F. W., Costa, E. M. M. d. B., & Murata, R. M. (2021). Yeast-host interactions: Anadenanthera colubrina modulates virulence factors of C. albicans and inflammatory response in vitro. Frontiers in Pharmacology, 12, 629778. https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fphar.2021.629778/full.

Mota, G. S., Sartori, C. J., Miranda, I., Quilhó, T., Mori, F. A., & Pereira, H. (2017). Bark anatomy, chemical composition and ethanol-water extract composition of Anadenanthera peregrina and Anadenanthera colubrina. PLOS ONE, 12(12), e0189263. https://dx.plos.org/10.1371/journal.pone.0189263.

Rodrigues, A. M., Gonçalves, S. S., de Carvalho, J. A., Borba-Santos, L. P., Rozental, S., & Camargo, Z. P. d. (2022). Current progress on epidemiology, diagnosis, and treatment of sporotrichosis and their future trends. Journal of Fungi, 8(8), 776. https://www.mdpi.com/2309-608X/8/8/776.

Sampaio, D. A., dos Santos Junior, A. J., Dias de Souza, N., & Carlos Costa Lelis, R. (2022). Diversity of secondary metabolites of Araucaria seed (*Araucaria angustifolia* (Bert.) O. Ktze) residues. *Ensaios e Ciência: Ciências Biológicas, Agrárias e da Saúde*, *26*(2), 289–292. https://doi.org/10.17921/1415-6938.2022v26n2p289-292

Smeriglio, A., Barreca, D., Bellocco, E., & Trombetta, D. (2017). Proanthocyanidins and hydrolysable tannins: Occurrence, dietary intake and pharmacological effects. British Journal of Pharmacology, 174(11), 1244-1262. https://bpspubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/bph.13630.

TECHNICAL ASSOCIATION OF THE PULP AND PAPER INDUSTRY - TAPPI. TAPPI T 204 cm-97: solvent extractives of wood and pulp. Atlanta: TAPPI Press, 1997. Disponível em: <https://www.tappi.org>. Acesso em: 4 maio. 2026

Teixeira, M. M., Almeida-Paes, R., Bernardes-Engemann, A. R., Nicola, A. M., de Macedo, P. M., Valle, A. C. F., Gutierrez-Galhardo, M. C., Freitas, D. F. S., Barker, B. M., Matute,

D. R., Stajich, J. E., & Zancopé-Oliveira, R. M. (2022). Single nucleotide polymorphisms and chromosomal copy number variation may impact the Sporothrix brasiliensis antifungal susceptibility and sporotrichosis clinical outcomes. Fungal Genetics and Biology, 163, 103743. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1087184522000883

Woźniak, M. (2022). Antifungal Agents in Wood Protection—A Review. *Molecules*, *27*(19), 6392. https://doi.org/10.3390/molecules27196392

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Potencial químico da casca de espécies arbóreas da Amazônia: perspectivas para aplicações em Biorrefinarias

Lohana Vieira Souza[1]; Karolayne Oliveira da Silva[1]; Lidiane Pereira Ferreira[1]; Laise de Jesus dos Santos[2], Graciene da Silva Mota[2], Marco Antonio Siviero[3], Fabio Akira Mori[2], Luiz Eduardo de Lima Melo[1]

[1] Universidade do Estado do Pará, Campus VIII, Centro de Ciências Naturais e Tecnologia, Xiloteca Joaquim Ivanir Gomes (JIGw)
[2] Departamento de Ciências Florestais, Universidade Federal de Lavras
[3] Departamento de Pesquisa e Inovação, Grupo Arboris.

Resumo: O aproveitamento de resíduos florestais em biorrefinarias é uma alternativa estratégica para valorizar à biomassa amazônica e fortalecer a bioeconomia. Este estudo buscou identificar compostos químicos nas cascas de *Manilkara elata* e *Dipteryx odorata*, avaliar a eficiência de extração e indicar seu potencial como matéria-prima. As cascas foram submetidas a diferentes processos de extração e analisadas por métodos espectrofotométricos para determinação de fenóis totais, flavonoides e taninos condensados. Os resultados mostraram variação na eficiência conforme a espécie e o solvente. Para *M. elata*, os maiores rendimentos ocorreram com solvente hidroalcóolico (fenóis totais 143,81 ± 4,78 mg/g GAE e flavonoides 23,09 ± 0,20 mg/g CE), enquanto em *D. odorata* destacou-se o hidroacetônico (fenóis totais 20,47 ± 1,24 mg/g GAE e flavonoides 3,33 ± 0,20 mg/g CE). Ambas as espécies apresentam potencial como fontes de metabólitos bioativos, com perfis distintos de extração. A escolha adequada do processo favorece a recuperação dos compostos, contribui para o uso sustentável dos recursos florestais e amplia as aplicações em biorrefinarias.

Palavras-chave: Aproveitamento; Desenvolvimento Sustentável; Resíduos florestais.

Chemical Potential of Amazonian Tree Bark: Prospects for Applications in Biorefineries

Abstract: The utilization of forest residues in biorefineries represents a strategic alternative for adding value to Amazonian biomass and strengthening the bioeconomy. This study aimed to identify chemical compounds in the bark of *Manilkara elata* and *Dipteryx odorata*, evaluate extraction efficiency, and indicate their potential as raw materials. The bark samples were subjected to different extraction processes and analyzed using spectrophotometric methods to determine total phenolics, flavonoids, and condensed tannins. The results showed variations in extraction efficiency depending on the species and solvent used. For *M. elata*, the highest yields were obtained with a hydroalcoholic solvent (total phenolics: 143,81 ± 4,78 mg/g GAE; flavonoids: 23,09 ± 0,20 mg/g CE), whereas *D. odorata* showed the best results with a hydroacetonic solvent (total phenolics: 20,47 ± 1,24 mg/g GAE; flavonoids: 3,33 ± 0,20 mg/g CE). Both species demonstrate potential as sources of bioactive metabolites, with distinct extraction profiles. The appropriate selection of the extraction process promotes the recovery of these compounds, contributes to the sustainable use of forest resources, and expands their applications in biorefineries.

Keywords: Utilization; Sustainable Development; Forest residues.

1. Introdução

O consumo excessivo e a geração descontrolada de resíduos são grandes desafios para a gestão ambiental, exigindo a adoção de novos modelos de produção que transformem esses resíduos em matérias-primas para a fabricação de novos produtos (Arias et al., 2023). Na busca por um futuro com desenvolvimento sustentável, as biorrefinarias e a bioeconomia surgem como alternativas fundamentais de transformação (Wagh et al., 2023). Esse cenário é impulsionado por pesquisas recentes, tendências tecnológicas e o desenvolvimento de práticas que integram eficiência econômica e responsabilidade ambiental (Solarte-Toro et al., 2023).

As biorrefinarias utilizam processos físicos, químicos e biológicos para converter biomassa em bioprodutos de maior valor agregado, destinados ao uso final ou como matéria-prima para novos processos industriais (Conteratto et al., 2021). Esse modelo integra diferentes setores, como biocombustíveis, indústria química, papel e celulose, alimentos, energia, farmacêutica e cosméticos, promovendo o aproveitamento sustentável de recursos biológicos (Ali et al., 2024; Meirelles et al., 2023). As matérias-primas empregadas são renováveis e de base carbônica, provenientes da agricultura, silvicultura, resíduos industriais e urbanos e da aquicultura, o que evidencia o papel das biorrefinarias na valorização da biomassa e no fortalecimento da bioeconomia (Chaturvedi et al., 2020).

Embora as biorrefinarias envolvem uma variedade de setores, é fundamental destacar a importância e a disponibilidade dos resíduos florestais, especialmente na Amazônia. A região se distingue pela abundância de biomassa lignocelulósica, que, apesar de suas variadas potencialidades, ainda possui propriedades tecnológicas pouco exploradas (Borges et al., 2024). As tecnologias verdes associadas às biorrefinarias têm o poder de impulsionar o desenvolvimento sustentável na região, promovendo a conservação das florestas, agregando valor aos recursos naturais locais e fomentando a sociobiodiversidade (Freitas et al., 2024).

Os recursos florestais de espécies amazônicas, como os gêneros *Manilkara* e *Dipteryx*, apresentam elevado potencial para aplicações nas indústrias alimentícia, farmacêutica, cosmética e de biocombustíveis devido à presença de compostos bioativos de alto valor agregado, especialmente compostos fenólicos com atividade antioxidante (Mishra & Mohanty, 2020; Sousa et al., 2022; Miranda et al., 2024). A caracterização química desses recursos é essencial para ampliar seu aproveitamento em biorrefinarias e agregar valor à biomassa

amazônica. Assim, este estudo teve como objetivo quantificar os compostos químicos presentes nas cascas de espécies amazônicas, avaliar a eficiência de diferentes solventes na extração desses compostos e indicar seu potencial como matéria-prima para biorrefinarias.

2. Material e métodos

2.1. Área do estudo

O estudo foi realizado na Fazenda Gênesis-Salém, uma área de Manejo Florestal Sustentável localizada no município de Dom Eliseu, no sudeste do estado do Pará, Brasil (Figura 1). A vegetação predominante na região é a floresta ombrófila densa (Veloso, 1991). O clima local é classificado como tropical úmido, com temperatura média anual de aproximadamente 25 °C, a precipitação média anual é de 1638 mm, e a altitude da área é de 247 metros (Hijmans et al., 2005).

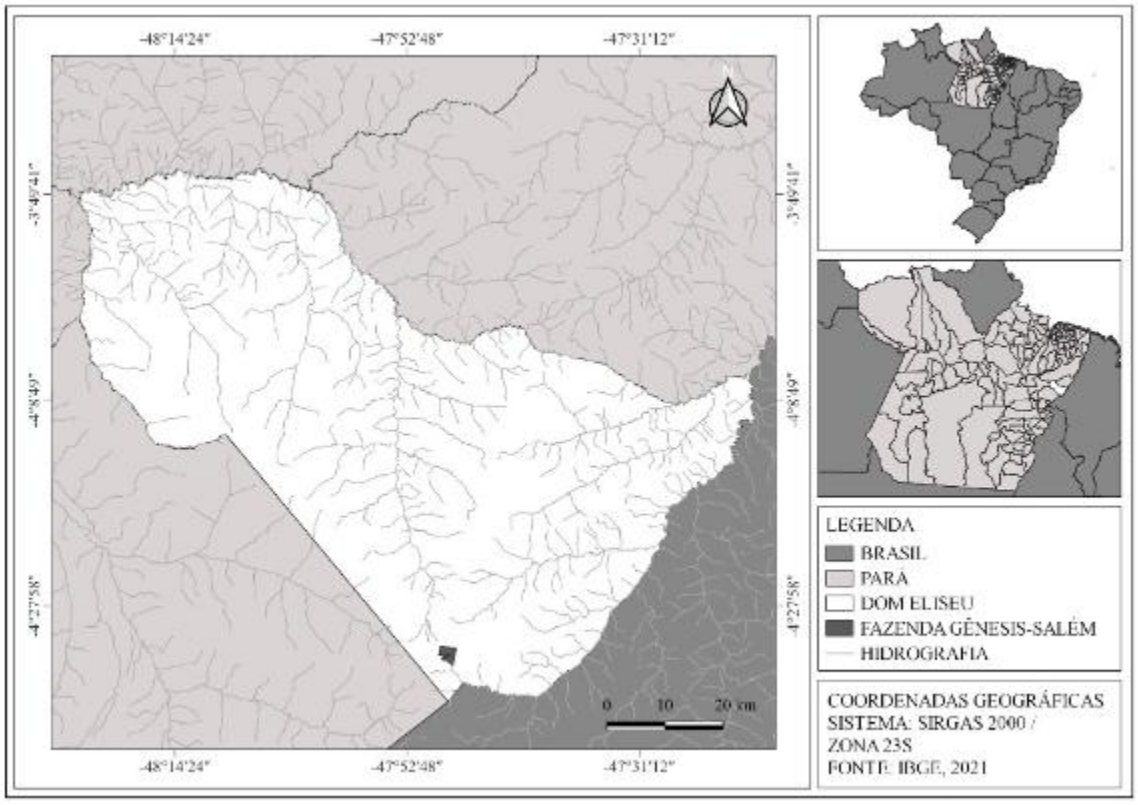


Figura 1. Mapa de localização da área de coleta do estudo
Fonte: Autores, 2026.

2.2. Amostragem

Foram coletadas as cascas do caule das espécies Manilkara elata (Allemão ex Miq.) Monach. e *Dipteryx odorata* (Aubl.) Forsyth F. As espécies foram selecionadas com base na lista do Inventário Florestal disponibilizada pelo Grupo Arboris. Para cada espécie, foram

coletadas amostras de casca de cinco indivíduos. De cada indivíduo, foram removidas 10 amostras com dimensões de 10 cm de comprimento por 5 cm de largura.

Todas as espécies selecionadas têm diâmetro à altura do peito (DAP) superior a 40 cm. Foram adotadas técnicas que minimizam os impactos nas plantas e, após a remoção da casca, foi aplicada a calda bordalesa (mistura de sulfato de cobre e cal) para auxiliar no processo de regeneração.

2.3. Conteúdo fenólico dos extratos das cascas

Amostras de 0,50 g da casca (base seca) foram extraídas em quatro soluções distintas, dentre elas estão, extração em Água, Água/Etanol 1:1 (v/v), Água/Metanol 1:1 (v/v), Água/Acetona 1:1 (v/v), a qual foi utilizado o banho ultrassônico a 50ºC durante 60 min. A solução foi filtrada em cadinho de vidro sinterizado nº 2 e o filtrado teve seu volume completado para 50 mL com água deionizada. O resíduo sólido retido na filtração foi seco e o rendimento de extração calculado com relação à massa do material inicial. Do extrato foram determinados os teores de fenóis totais, flavonoides totais e taninos condensados a partir da leitura de absorbâncias em espectrofotômetro biospectro SP-22. O teor de fenóis totais foi determinado pelo método Folin-Ciocalteau utilizando ácido gálico como padrão (Singleton & Rossi, 1965) e seu resultado foi expresso em mg de equivalentes de ácido gálico (GAE) / g de extrato seco da casca. Os flavonoides totais foram quantificados por ensaio colorimétrico de cloreto de alumínio com padrão de catequina (Zhishen et al., 1999) e os taninos condensados pelo método de vanilina com ácido sulfúrico (Abdalla et al., 2017). Ambos os resultados foram expressos em mg de equivalentes de catequina (CE)/g de extrato da casca.

3. Resultados e discussão

Os teores de compostos fenólicos totais, flavonoides e taninos condensados dos extratos da casca de *Manilkara elata* e *Dipteryx odorata*, obtidos por diferentes solventes, estão apresentados na Tabela 1.

Tabela 1. Quantificação dos grupos químicos da *Manilkara elata*

Variáveis	Média	Devio padrão	Erro padrão	F/χ^2	p-*value*
Teor de fenois					
Água	82,00[b]	3,56	2,05	157,22*	1,89 e^{-07}
Água:Etanol	143,81[d]	4,78	2,76		
Água:Metanol	71,11[a]	6,60	3,81		
Água:Acetona	123,93[c]	3,29	1,90		

Teor de taninos					
Água	4,34[a]	0,54	0,31	20,76*	0,00039
Água:Etanol	8,97[b]	0,63	0,36		
Água:Metanol	5,15[a]	0,54	0,31		
Água:Acetona	9,44[b]	1,70	0,98		
Flavonoides					
Água	11,90[a]	0,31	0,18	1,0415*	2,2 e^{-16}
Água:Etanol	23,09[c]	0,20	0,11		
Água:Metanol	12,06[a]	0,32	0,18		
Água:Acetona	19,86[b]	0,37	0,21		

Concentração dos solventes (1:1). F = valores derivados de modelos lineares generalizados ajustados com distribuição Gaussiana, avaliados pelo teste F. χ^2 = valores derivados de modelos lineares generalizados ajustados com distribuição Gama, avaliados por meio do teste de razão de verossimilhança (qui-quadrado). p-value (α = 0,05).
Fonte: Autores, 2026.

Os resultados da quantificação de compostos fenólicos, flavonoides e taninos condensados demonstram que a eficiência da extração está fortemente relacionada ao tipo de solvente utilizado. Para *Manilkara elata*, o solvente água:etanol mostrou-se o mais promissor, apresentando os maiores rendimentos de fenóis totais (143,81 mg/g), flavonoides (23,09 mg/g) e taninos condensados (8,97 mg/g), seguido das extrações realizadas com água e acetona. Resultados semelhantes foram encontrados no estudo de Abilleira et al. (2021), onde a casca de *Pinus pinaster* e *Acacia dealbata*, apresentou melhores rendimentos de extração com o uso do solvente água:etanol. Por outro lado, os extratos obtidos com água e água:metanol apresentaram menores rendimentos de extração. É importante destacar que, além do etanol apresentar maior capacidade de extração, a substância extrativa integra o grupo de solventes verdes. Dessa forma, os resultados obtidos podem ser considerados promissores para a extração de compostos bioativos da espécie estudada, especialmente em processos voltados a aplicações industriais e ambientalmente responsáveis (Sut et al., 2022).

Tabela 2. Quantificação dos grupos químicos da *Dipteryx odorata*

Variáveis	**Média**	**Devio padrão**	**Erro padrão**	**F/χ^2**	**p-*value***
Teor de fenois					
Água	3,05[a]	2,05	1,18	64,653*	5,9 e^{-06}
Água:Etanol	15,03[b]	2,45	1,41		
Água:Metanol	4,14[a]	1,24	0,72		
Água:Acetona	20,47[c]	1,24	0,72		

Teor de taninos					
Água	2,52^{c}	0,11	0,06	5,0904*	0,02924
Água:Etanol	2,48^{bc}	0,17	0,10		
Água:Metanol	2,02^{ab}	0,17	0,10		
Água:Acetona	1,98^{a}	0,35	0,20		
Flavonoides					
Água	1,08^{a}	0,15	0,08	1,9244*	2,2 e^{-06}
Água:Etanol	2,76^{b}	0,09	0,05		
Água:Metanol	2,63^{b}	0,07	0,04		
Água:Acetona	3,33^{c}	0,20	0,11		

Concentração dos solventes (1:1). F = valores derivados de modelos lineares generalizados ajustados com distribuição Gaussiana, avaliados pelo teste F. χ^2 = valores derivados de modelos lineares generalizados ajustados com distribuição Gama, avaliados por meio do teste de razão de verossimilhança (qui-quadrado). p-value ($\alpha = 0,05$).
Fonte: Autores, 2025.

Em *Dipteryx odorata*, o padrão de extração apresentou diferenças marcantes em relação a M. elata. Para os fenóis totais e flavonoides, a acetona destacou-se como o solvente mais eficiente, apresentando os maiores rendimentos (20,47 mg/g e 3,33 mg/g, respectivamente), seguido pelos solventes água:etanol, com (15,03 mg/g) para fenóis e (2,76) mg/g para flavonoides. Por outro lado, as extrações realizadas com água e água:metanol apresentaram rendimentos de extração menores. O processo de extração é fundamental para obter compostos bioativos, sendo que, diferentes métodos e a escolha do solvente influenciam significativamente tanto a eficiência quanto o perfil dos compostos extraído (Nisca; Tanase, 2025). Dessa forma, esses resultados evidenciam diferenças no perfil fitoquímico entre as espécies estudadas, além disso, percebe-se que há maior afinidade dos compostos de *D. odorata* por solventes como a acetona e de *M. elata* por solventes à base de etanol, o que reforça a importância de escolher solventes específicos para cada espécie vegetal.

Os compostos fenólicos configuram-se como potenciais substitutos de agentes bioativos sintéticos, com aplicações relevantes nas áreas farmacêutica e medicinal (Sun & Shahrajabian, 2023). Além disso, o solvente utilizado destacou-se por se enquadrar na categoria de solventes verdes, sendo menos poluente que alternativas convencionais (Mokaizh et al., 2025). Os resultados obtidos indicam que a casca de *Manilkara elata* apresenta elevado potencial para a obtenção de compostos fenólicos, enquanto *Dipteryx odorata*, embora tenha apresentado menores rendimentos, demonstrou maior eficiência de extração com o solvente acetona. Esse

comportamento evidencia que a eficiência da extração está diretamente relacionada às características fitoquímicas de cada espécie, tornando indispensável a seleção de solventes.

Nesse contexto, a elevada concentração de compostos bioativos observada em *M. elata* e a eficiência da extração em *D. odorata* demonstram o potencial dessas espécies amazônicas como matérias-primas para biorrefinarias. A definição dos solventes mais adequados para cada espécie amplia o aproveitamento integral da biomassa e agrega valor aos recursos florestais amazônicos, essas questões contribuem para o desenvolvimento de bioprodutos de alto valor agregado e para o fortalecimento da bioeconomia.

4. Conclusões

As cascas de *Manilkara elata* e *Dipteryx odorata* constituem fontes promissoras de metabólitos bioativos com potencial de aproveitamento industrial. A eficiência da recuperação desses constituintes variou conforme o material vegetal e o solvente empregado. Esses resultados evidenciam que a definição de estratégias de extração específicas é essencial para otimizar o aproveitamento dos recursos florestais.

Assim, a caracterização fitoquímica realizada fortalece a valorização da biodiversidade amazônica, fornece bases científicas para o desenvolvimento de bioprodutos sustentáveis e contribui para a consolidação de cadeias produtivas fundamentadas no conceito de biorrefinaria.

5. Agradecimentos

Os autores agradecem ao Grupo Arboris Empresarial pela concessão da matéria-prima utilizada na realização deste estudo. Agradecem, ainda, ao Programa de Pós-Graduação em Biodiversidade e Biotecnologia da Rede Bionorte da Universidade Federal do Pará pelo suporte institucional à execução desta pesquisa. Este trabalho recebeu apoio financeiro da Chamada Pública MCTI/FINEP/FNDCT/Identidade Brasil – Recuperação e Preservação de Acervos 2024 (Ref. 3103/24), por meio do Projeto nº 5827, Convênio nº 0125.0186.00.

6. Referências bibliográficas

Abdalla, S., Pizzi, A., Ayed, N., Charrier-El Bouhtoury, F., Charrier, B., Bahabri, F., Ganash, A., 2014. MALDI-TOF analysis of *Aleppo pine* (Pinus halepensis) bark tannin. BioResources. 9, 3396-3406. https://doi.org/10.15376/biores.9.2.3396-3406

Abilleira, F., Varela, P., Cancela, Á., Álvarez, X., Sánchez, Á., & Valero, E., 2021. Tannins extraction from Pinus pinaster and Acacia dealbata bark with applications in the industry. Industrial Crops and Products, 164, 113394. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2021.113394

Ali, H. E. A., El-fayoumy, E. A., Soliman, R. M., Elkhatat, A., Al-Meer, S., Elsaid, K., ... & Abdullah, M. A. (2024). Nanoparticle applications in Algal-biorefinery for biofuel production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 192, 114267. https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.114267

Arias, A., Feijoo, G., & Moreira, M. T. (2023). Biorefineries as a driver for sustainability: Key aspects, actual development and future prospects. *Journal of Cleaner Production*, *418*, 137925. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.137925

Chaturvedi, T., Torres, A. I., Stephanopoulos, G., Thomsen, M. H., & Schmidt, J. E. (2020). Developing process designs for biorefineries—Definitions, categories, and unit operations. *Energies*, *13*(6), 1493. https://doi.org/10.3390/en13061493

Conteratto, C., Artuzo, F. D., Santos, O. I. B., & Talamini, E. (2021). Biorefinery: A comprehensive concept for the sociotechnical transition toward bioeconomy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *151*, 111527. https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111527

Freitas, L. C., dos Santos, R. W. S., Reis, F. R., Haminiuk, C. W. I., Corazza, M. L., & Masson, M. L. (2024). Green extraction technologies: A path to the Amazon bioeconomy development. *Trends in Food Science & Technology*, 147, 104462. https://doi.org/10.1016/j.tifs.2024.104462

Hijmans, R. J., Cameron, S. E., Parra, J. L., Jones, P. G., & Jarvis, A. (2005). Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas. *International Journal of*

Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society, 25(15), 1965-1978. https://doi.org/10.1002/joc.1276

Meirelles, B., Pagels, F., Sousa-Pinto, I., & Guedes, A. C. (2023). Biorefinery as a tool to obtain multiple seaweed extracts for cosmetic applications. *Journal of Applied Phycology*, *35*(6), 3041-3055. https://doi.org/10.1007/s10811-023-03089-7

Miranda, B. M., Tovar, B. C. A., Otero, D. M., da Silva, F. A., Scalize, P. S., & de Oliveira, T. F. (2025). By-products of Baru and Monguba: A review of their potential. *Food and Humanity*, 4, 100477. https://doi.org/10.1016/j.foohum.2024.100477

Mishra, R. K., & Mohanty, K. (2020). Pyrolysis of Manilkara zapota seeds over ZSM-5 to produce high-quality bio-oil and chemicals. *Fuel*, 280, 118594. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.118594

Mokaizh, A. A. B., Nour, A. H., Ali, G. A., Ukaegbu, C. I., & Hawege, E. F. (2025). Eco-friendly and efficient extraction of phenolic compounds from Commiphora gileadensis bark using microwave-assisted extraction. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 142, 321-328. https://doi.org/10.1016/j.jiec.2024.07.038

Nisca, A., & Tanase, C. (2025). Approaches to Extracting Bioactive Compounds from Bark of Various Plants: A Brief Review. *Plants*, *14*(18), 2929. https://doi.org/10.3390/plants14182929

Singleton, V.L., Rossi, J.A., 1965. Colorimetry of total phenolics with phosphomolybdic-phosphotungstic acid reagents. American journal of Enology and Viticulture, 16, 144-158. https://doi.org/10.5344/ajev.1965.16.3.144

Solarte-Toro, J. C., & Cardona Alzate, C. A. (2023). Sustainability of biorefineries: Challenges and perspectives. *Energies*, *16*(9), 3786. https://doi.org/10.3390/en16093786

Sousa, T.B., Mota, G.D.S., Araujo, E.D.S., Carréra, J.C., Silva, E.P., Souza, S.G., Lourenço, M.S., Mori, F.A., 2022. Chemical and structural characterization of *Myracrodruon urundeuva* barks aiming at their potential use and elaboration of a sustainable management plan. Biomass Conversion and Biorefinery. 12, 1583-1593. https://doi.org/10.1007/s13399-020-01093-2

Sun, W., & Shahrajabian, M. H. (2023). Therapeutic potential of phenolic compounds in medicinal plants—Natural health products for human health. *Molecules*, 28(4), 1845. https://doi.org/10.3390/molecules28041845

Sut, S., Maccari, E., Zengin, G., Ferrarese, I., Loschi, F., Faggian, M., ... & Dall'Acqua, S., 2022. "Smart extraction chain" with green solvents: Extraction of bioactive compounds from Picea abies bark waste for pharmaceutical, nutraceutical and cosmetic uses. Molecules, 27, 6719. https://doi.org/10.3390/molecules27196719

Veloso, H. P., Rangel-Filho, A. L. R., Lima, J. C. A., 1991. Classificação da vegetação brasileira, adaptada a um sistema universal. IBGE.

Wagh, M. S., Sowjanya, S., Nath, P. C., Chakraborty, A., Amrit, R., Mishra, B., ... & Mohanta, Y. K. (2024). Valorisation of agro-industrial wastes: circular bioeconomy and biorefinery process–a sustainable symphony. *Process safety and environmental protection*, *183*, 708-725. https://doi.org/10.1016/j.psep.2024.01.055

Zhishen, J., Mengcheng, T., Jianming, W., 1999. The determination of flavonoid contents in mulberry and their scavenging effects on superoxide radicals. Food chemistry, 64, 555-559. https://doi.org/10.1016/S0308-8146(98)00102-2

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Produção de açaí no Rio Grande do Norte e seu potencial como extrato tânico

Maria Eduarda Moura dos Santos[1]; Denys Santos de Souza[1]; Jéssica Estéfane Silva Chaves[1]; José Ricardo Souza da Silva Nascimento[1]; Elaine Cristina Alves da Silva[1]; Jordanna Karolina Aires da Rocha[1]; Wilkally Crislian Laynne de Moura[1]; Tatiane Kelly Barbosa de Azevêdo[1]

[1] Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN)

Resumo: O aproveitamento do açaí como fonte de compostos bioativos representa uma alternativa para agregação de valor à cadeia produtiva do açaí *(Euterpe oleracea Mart.)*. Neste contexto, o presente trabalho objetivou quantificar o teor de taninos condensados presentes na casca dos frutos e das sementes de açaí provenientes de plantio localizado na área experimental da Unidade Acadêmica Especializada em Ciências Agrárias da Escola Agrícola de Jundiaí, da Universidade Federal do Rio Grande do Norte. As amostras foram coletadas, separadas, secas ao ar em casa de vegetação, sendo apenas as sementes posteriormente trituradas em moinho de minérios. A extração dos compostos tânicos foi realizada em água sob refluxo, e a quantificação ocorreu pelo método de Stiasny. Os resultados indicaram teor de taninos condensados de 2,19% para as sementes e 2,39% para a casca dos frutos, sem diferença estatística entre as partes avaliadas pelo teste de Tukey (5%). Conclui-se que ambos apresentam potencial como fonte de taninos condensados, reforçando as perspectivas de aproveitamento em produtos de base florestal, além de incentivar estudos voltados à otimização dos processos de extração e à caracterização química dos extratos.

Palavras-chave: Compostos Fenólicos; Produtos Florestais Não Madeireiros; *Euterpe oleracea* Mart.

Açaí Production in Rio Grande do Norte and Its Potential for Tannin Extraction

Abstract: The use of açaí as a source of bioactive compounds represents an alternative for adding value to the açaí (Euterpe oleracea Mart.) production chain. In this context, this study aimed to quantify the condensed tannin content in the fruit peel and seeds of açaí collected from a plantation located in the experimental area of the Specialized Academic Unit in Agricultural Sciences at the Jundiaí Agricultural School, Federal University of Rio Grande do Norte, Brazil. The samples were collected, manually separated, air-dried in a greenhouse, and only the seeds were subsequently ground using a mineral mill. Tannin compounds were extracted with water under reflux, and their quantification was performed using the Stiasny method. The results showed condensed tannin contents of 2.19% for the seeds and 2.39% for the fruit peel, with no significant differences between the evaluated plant parts according to Tukey's test (5%). It was concluded that both materials have potential as sources of condensed tannins, reinforcing their potential for use in forest-based products and encouraging further studies aimed at optimizing extraction processes and the chemical characterization of the extracts.

Keywords: Phenolic Compounds; Non-Timber Forest Products; *Euterpe oleracea* Mart.

1. Introdução

O açaizeiro (*Euterpe oleracea* Mart.) é uma palmeira nativa da região Amazônica e representa uma das espécies de maior importância econômica e social para a população da amazônia, sendo amplamente explorada para a produção de frutos (Oliveira et al., 2007). Nas últimas décadas, a crescente demanda pelo açaí nos mercados nacional e internacional impulsionou a expansão da cadeia produtiva, promovendo o aumento da produção e da comercialização dos frutos (Homma et al., 2020). Paralelamente, o sistema tradicional de exploração extrativista passou a coexistir com cultivos manejados e plantios em terra firme, permitindo a expansão da cultura para diferentes regiões brasileiras e fortalecendo sua relevância para o setor agroindustrial (Nogueira et al., 2013; Oliveira et al., 2007).

O processamento industrial do açaí é destinado principalmente à obtenção da polpa, que após a sua extração permanece uma grande quantidade de resíduos, principalmente a semente, que representa aproximadamente 85% da massa do fruto, tornando-se um subproduto com elevado potencial para aproveitamento tecnológico (Tinoco, 2005). O aproveitamento desse material gerado pelo processamento do açaí tem despertado interesse devido ao seu potencial de agregação de valor e à possibilidade de reduzir impactos ambientais associados ao descarte desse material (Martinelli et al., 2018).

Nesse contexto, a semente de açaí apresenta composição química rica em compostos fenólicos, destacando-se os taninos condensados, que contribuem para o aproveitamento sustentável do açaí (Rodrigues et al., 2006). O interesse científico pelos compostos fenólicos presentes em espécies vegetais tem aumentado devido às suas características químicas e ao potencial de aplicação em diferentes processos industriais e biotecnológicos (Sanabria & Sangronis, 2007).

De acordo com sua estrutura química, esses compostos são classificados em taninos hidrolisáveis e taninos condensados, sendo estes últimos os mais abundantes em espécies florestais e os de maior interesse tecnológico devido à sua elevada reatividade química (Pizzi, 1983). Em razão dessas características, os extratos tânicos têm sido amplamente estudados para aplicações na produção de adesivos para madeira, no curtimento de couros, no tratamento de efluentes, na indústria farmacêutica e em outros processos industriais, consolidando-se como produtos florestais de elevado valor agregado (Pizzi, 2003).

Além disso, a caracterização físico-química do caroço de açaí confirmou a ocorrência de taninos e reforçou o potencial de aproveitamento desse material como matéria-prima de maior valor agregado (Martinelli et al., 2020). Além de outros flavonoides amplamente distribuídos nos tecidos vegetais, evidenciando que o açaí constitui uma fonte relevante desses compostos bioativos (Felssner, 2016).

Apesar desses avanços, ainda são escassos os estudos que avaliam o potencial tecnológico de sementes e da casca dos frutos para obtenção de extratos tânicos, especialmente em materiais cultivados fora da região Amazônica.

Diante do exposto, o presente trabalho teve como objetivo avaliar o potencial de sementes e da casca dos frutos de açaí (Euterpe oleracea Mart.), provenientes de cultivo no município de Macaíba, Rio Grande do Norte, para a obtenção de extrato tânico, por meio da determinação do teor de sólidos totais (TST), do Índice de Stiasny (IS) e do teor de taninos condensados (TTC).

2. Material e métodos

Área de estudo e obtenção do material

As amostras de frutos de açaí (*Euterpe oleracea* Mart.) foram obtidas em um plantio com cinco anos de idade, localizado na Área Experimental da UAECIA/EAJ/UFRN, em Macaíba-RN. O solo da área é classificado como Latossolo Amarelo de textura arenosa e relevo plano (Beltrão et al., 1975).



Figura 1: Frutos de açaí (*Euterpe oleracea* Mart.) utilizados para a coleta das amostras.

Fonte: Acervo da Unidade Técnica Demonstrativa de Produção de Acaí da UFRN (2026)

O clima da região corresponde à transição entre os tipos As e BSw, segundo a classificação de Köppen, caracterizando-se como tropical chuvoso, com temperatura média anual de 27,1 °C, umidade relativa média de 76% e precipitação anual variando entre 863,7 e 1.070,7 mm (IDEMA, 2013).

A coleta ocorreu em março de 2026, utilizando amostragem aleatória simples, com coleta manual dos frutos diretamente das plantas. Após a coleta, o material foi transportado ao Laboratório de Produtos Florestais Não Madeireiros (LAPFLONM), onde foram realizadas as etapas de preparo e análises laboratoriais.

Após a coleta, os frutos foram separados manualmente em casca e semente por meio da quebra com o auxílio de um martelo. Em seguida, ambos os materiais foram submetidos à secagem ao ar em casa de vegetação por um período de três dias. Após a secagem, a casca dos frutos foi destinada às análises de extração e quantificação das substâncias tânicas, teor de sólidos totais, Índice de Stiasny e teor de taninos condensados, enquanto as sementes foram novamente fragmentadas com o auxílio de um martelo e, posteriormente, processadas em moinho para minérios, visando à redução de sua granulometria e à obtenção de um material homogêneo para as análises.

Extração das substâncias tânicas

Os compostos tânicos foram extraídos em água sob refluxo e, posteriormente, os extratos obtidos foram utilizados para a determinação do teor de substâncias tânicas totais (TST), do Índice de Stiasny (I) e do teor de taninos condensados (TTC), seguindo a metodologia proposta por Guangcheng et al. (1991).

Para a quantificação das substâncias tânicas, as amostras foram homogeneizadas e o teor de umidade determinado em base seca, permitindo o cálculo dos resultados nessa mesma base. Para cada material (sementes e casca dos frutos) foram utilizadas três repetições compostas por 25 g de material seco. As substâncias tânicas foram extraídas em água destilada na proporção de 1:10 (m/v), utilizando balões de fundo chato com capacidade de 500 mL, sendo as amostras submetidas à fervura sob refluxo durante duas horas.

Cada amostra foi submetida a duas extrações sucessivas, visando aumentar a recuperação das substâncias solúveis. Após cada extração, os extratos foram filtrados em peneira de 150 mesh (0,105 mm), posteriormente em tecido de flanela e, por fim, em cadinho de vidro sinterizado de porosidade 2. Em seguida, os extratos foram concentrados para um volume final de 250 mL.



Figura 2: Etapas do preparo das amostras e da extração de taninos do açaí: (1) separação manual das cascas e das sementes; (2) frutos de açaí após remoção manual da casca; (3) secagem das amostras em casa de vegetação; (4) sistema de extração sob refluxo; (5) extração em andamento; (6) casca triturada; (7) extratos obtidos após a extração; (8) filtragem do extrato; (9) filtração a vácuo; e (10) precipitado obtido na determinação do Índice de Stiasny.

Fonte: Autores (2026)

Determinação do teor de sólidos totais

Após a concentração dos extratos, foram retiradas três alíquotas de 50 mL de cada amostra. Uma alíquota foi utilizada para a determinação do teor de sólidos totais (TST), sendo submetida à secagem em estufa a 103 ± 2 °C por 48 horas. O TST foi determinado de acordo com a Equação 1.

Equação 1

$$TST\,\% = \frac{Mi\ X\ Mf}{Mi} \times 100$$

Em que:

- **TST** = teor de sólidos totais (%);
- **Mi** = massa inicial da alíquota (g);
- **Mf** = massa final após secagem (g).

Determinação do Índice de Stiasny

Para a determinação do Índice de Stiasny (IS), foi empregado o método descrito por Guangcheng et al. (1991), com adaptações. A cada alíquota de 50 mL do extrato bruto foram adicionados 4 mL de formaldeído (37% m/m) e 1 mL de ácido clorídrico concentrado. Em seguida, as misturas foram submetidas à fervura sob refluxo durante 30 minutos, promovendo a formação do complexo insolúvel tanino-formaldeído. O precipitado obtido foi separado por filtração em funil de Büchner utilizando papel filtro e seco em estufa a 103 ± 2 °C durante 24 horas. O Índice de Stiasny foi calculado conforme a Equação 2.

Equação 2

$$I\,\% = \frac{(M\,2)}{(M\,1)} \times 100$$

Em que:

- **IS** = Índice de Stiasny (%);
- $\mathbf{M_1}$ = massa de sólidos presente em 50 mL do extrato (g);
- $\mathbf{M_2}$ = massa do precipitado tanino-formaldeído (g).

Determinação do teor de taninos condensados

O teor de taninos condensados (TTC) foi obtido a partir da relação entre o teor de sólidos totais e o Índice de Stiasny, conforme a Equação 3.

Equação 3

$$TTC\,\% = \frac{TST\ X\ I}{100}$$

Em que:

- **TTC** = teor de taninos condensados (%);
- **TST** = teor de sólidos totais (%);
- **IS** = Índice de Stiasny (%).

O teor de não taninos foi obtido pela diferença entre o teor de sólidos totais e o teor de taninos condensados de cada amostra.

Análise estatística

O experimento foi conduzido utilizando três repetições para cada parte analisada (semente e cascas do frutos). Os resultados foram expressos como média ± desvio padrão e submetidos à análise de variância. Quando constatado efeito significativo, as médias foram comparadas pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

3. Resultados e discussão

Os valores de teor de sólidos totais (TST), Índice de Stiasny (IS) e teor de taninos condensados (TTC) obtidos para a semente e a casca do fruto de açaí estão apresentados na Tabela 1. Não foram observadas diferenças estatísticas entre as partes analisadas para nenhuma das variáveis avaliadas, indicando comportamento semelhante quanto ao potencial para obtenção de extratos tânicos. Esse resultado demonstra que tanto as sementes quanto a casca dos frutos apresentam compostos fenólicos passíveis de extração, ampliando as possibilidades de aproveitamento integral desse material.

Tabela 1 - Teor de Sólidos Totais , Índice de Stiasny e Teor de Taninos Condensados de sementes e da casca dos frutos de açaí cultivadas no Rio Grande do Norte

Parte analisada	TST %	I %	TTC %
Sementes de açaí	6,35 (±0,63) a	34,46 (±1,80) a	2,19 (±0,30) a
Casca dos frutos de açaí	5,71 (±0,21) a	41,86 (±2,68) a	2,39 (±0,16) a

Médias seguidas da mesma letra na coluna não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

A presença de taninos tanto nas sementes quanto na casca dos frutos de açaí estudo (2,19% para as sementes e 2,39% para a casca dos frutos) apresenta relevância tecnológica, principalmente em razão da crescente demanda por produtos derivados do açaí, que tem impulsionado sua cadeia produtiva e ampliado o processamento industrial dos frutos para obtenção de polpa (Bezerra et al., 2016). Diferentemente das espécies tradicionalmente exploradas para extração de taninos, cujo cultivo é direcionado especificamente para esse fim, o açaí gera grandes quantidades de resíduos após o processamento com potencial de aproveitamento.

Os resultados obtidos neste estudo corroboram a caracterização química realizada por Felssner (2016), que identificou 3,43% de taninos totais e 5,95% de polifenóis totais na matéria seca da semente de açaí. Embora os métodos analíticos empregados sejam distintos, ambos os estudos evidenciam a presença de compostos fenólicos e reforçam o seu potencial como fonte de substâncias de interesse tecnológico. Além das diferenças metodológicas, a composição química do fruto pode variar em função da espécie, das condições edafoclimáticas, do período de colheita e do manejo da cultura, fatores que influenciam diretamente a concentração de compostos fenólicos e taninos presentes no material vegetal (Martinelli et al., 2018).

Os resultados obtidos seguem a mesma tendência de estudos que demonstram a presença de compostos fenólicos nas sementes de açaí, especialmente procianidinas, epicatequina e outros taninos condensados (Rodrigues et al., 2006). Da mesma forma, Martins et al. (2022) verificaram que as procianidinas constituem os principais compostos fenólicos presentes nas sementes de *Euterpe oleracea*, destacando que sua concentração pode variar em função do estágio de desenvolvimento dos frutos.

Ainda que esses estudos tenham empregado metodologias distintas da utilizada nesta pesquisa, seus resultados reforçam a ocorrência de taninos condensados na espécie e corroboram o potencial do açaí como fonte de compostos fenólicos de interesse tecnológico. Nesse contexto, a utilização do Índice de Stiasny associada à determinação do teor de taninos condensados constitui uma abordagem tecnológica ainda pouco explorada para a espécie, permitindo avaliar não apenas a presença desses compostos, mas também seu potencial para aplicações tecnológicas relacionadas à obtenção de extratos tânicos.

Considerando a expansão do cultivo do açaí para regiões fora da Amazônia, como o Estado do Rio Grande do Norte, torna-se importante ampliar o conhecimento sobre o aproveitamento dos resíduos gerados por essa cadeia produtiva (Bezerra et al., 2016). Os resultados obtidos neste estudo demonstram que tanto a semente quanto a apresentam compostos tânicos passíveis de extração, evidenciando o potencial de aproveitamento integral dos frutos e sementes. A disponibilidade desse material e sua origem como subproduto agroindustrial reforçam seu potencial para aplicações de maior valor agregado (Tinoco, 2005; Bezerra et al., 2016)**.** Nesse contexto, estudos complementares voltados à otimização das condições de extração, à caracterização química detalhada dos extratos e à avaliação de suas propriedades tecnológicas poderão ampliar as perspectivas de utilização desse material.

4. Conclusões

Sementes e casca dos frutos de açaí constituem potencial para produção de extratos tânicos. Apresentando quantidade de taninos condensados consideráveis. Com aproveitamento desses materiais como fonte de compostos fenólicos de interesse tecnológico, contribuindo para a agregação de valor à cadeia produtiva.

5. Agradecimentos

Os autores agradecem à Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), à Escola Agrícola de Jundiaí (EAJ), ao Laboratório de Produtos Florestais Não Madeireiros (LAPFLONM) e à Profa. Dra. Tatiane Kelly Barbosa de Azevêdo, pela orientação, apoio e incentivo durante o desenvolvimento desta pesquisa, bem como aos colaboradores que auxiliaram nas atividades experimentais.

6. Referências bibliográficas

Beltrão, B. A., Morais, F., Mascarenhas, J. C., Miranda, J. L. F., Souza Júnior, L. C., & Mendes, V. A. (1975). *Projeto RADAMBRASIL: Folha SB.24/25 Jaguaribe/Natal: Geologia, geomorfologia, solos, vegetação e uso potencial da terra*. Departamento Nacional da Produção Mineral.

Bezerra, V. S., Freitas-Silva, O., & Damasceno, L. F. (2016). *Açaí: Produção de frutos, mercado e consumo*. Embrapa Agroindústria de Alimentos.

Felssner, K. dos S. (2016). *Avaliação nutricional da semente de açaí (Euterpe oleracea* Mart.) *como ingrediente em alimentos extrusados para cães* (Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Paraná).

Guangcheng, Z., Yunlu, L., & Yazaki, Y. (1991). Extractive yields, Stiasny values and polyflavanoid contents in barks from six *Acacia* species in Australia. *Australian Forestry*, *54*(2), 154–156. https://doi.org/10.1080/00049158.1991.10674580

Homma, A. K. O., Oliveira, M. do S. P., Carvalho, J. E. U., Nascimento, W. M. O., & Menezes, A. J. E. A. (2020). *Açaí (Euterpe oleracea Mart.)*. Embrapa.

IDEMA – Instituto de Desenvolvimento Sustentável e Meio Ambiente do Rio Grande do Norte. (2013). *Perfil do município de Macaíba*. Governo do Estado do Rio Grande do Norte.

Martinelli, S. G., Da Silva, I. P., Hermes, L. B., Leonardi, L. E., Gräf, W. M., & Silveira, C. F. (2020). Potencial nutricional do açaí (*Euterpe precatoria* Mart.) para alimentação animal no sistema familiar na região amazônica. *Cadernos de Agroecologia*, *15*(2).

Martins, G. R., Mattos, M. M. G., & Silva, A. S. (2022). Phenolic profile and antioxidant properties in extracts of developing açaí (Euterpe oleracea Mart.) seeds. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 70(51), 16218–16228. https://doi.org/10.1021/acs.jafc.2c07028

Nogueira, A. K. M., Santana, A. C. de, & Garcia, W. S. (2013). A dinâmica do mercado de açaí fruto no Estado do Pará: de 1994 a 2009. *Revista Ceres*, *60*(3), 324–331.

Oliveira, M. do S. P., Carvalho, J. E. U., Nascimento, W. M. O., Müller, C. H., & Alves, R. M. (2007). Açaí (Euterpe oleracea Mart.). Embrapa Amazônia Oriental.

Pizzi, A. (1983). *Wood adhesives: Chemistry and technology* (Vol. 1). Marcel Dekker.

Pizzi, A. (2003). Tannins. In A. Pizzi & K. L. Mittal (Eds.), *Handbook of adhesive technology* (2nd ed., pp. 573–582). Marcel Dekker.

Rodrigues, R. B., Lichtenthäler, R., Zimmermann, B. F., Papagiannopoulos, M., Fabricius, H., Marx, F., Maia, J. G. S., & Almeida, O. (2006). Total oxidant scavenging capacity of *Euterpe oleracea* Mart. (açaí) seeds and identification of their polyphenolic compounds. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, *54*(12), 4162–4167. https://doi.org/10.1021/jf058169p

Sanabria, N., & Sangronis, E. (2007). Caracterización del acai o manaca (*Euterpe oleracea* Mart.): Un fruto del Amazonas. *Archivos Latinoamericanos de Nutrición*, *57*(1), 94–107.

Tinoco, A. C. (2005). *Açaí amazônico: Novas perspectivas de negócio*. Embrapa Amazônia Oriental. Trabalho apresentado no *Workshop Regional do Açaizeiro: Pesquisa, Produção e Comercialização*, Belém, PA.

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Produtividade, qualidade e estoques de carbono das cascas de oito espécies florestais amazônicas e eucalipto

Eliana Martins de Sousa[1]; Elvis Vieira dos Santos[1]; Beatriz do Carmo Corrêa Lima[1]; Murilo Emanoel Queiroz de Oliveira[2]; Paulo Fernando Trugilho[1]; Thiago de Paula Protásio[1]; João Moreira Neto[1]

[1] Universidade Federal de Lavras - UFLA
[2] Universidade Federal Rural da Amazônia - UFRA

Resumo: A casca é um resíduo lignocelulósico com potencial para aproveitamento energético, cuja qualidade e disponibilidade variam entre espécies. Este estudo avaliou a produtividade, propriedades físicas, químicas e energéticas das cascas de oito espécies florestais amazônicas e do híbrido *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*. A densidade básica variou de 0,322 a 0,809 g/cm³, enquanto os teores de cinzas, materiais voláteis e carbono fixo variaram de 1,93–7,61%, 68,80–75,22% e 19,65–29,27%, respectivamente. *Manilkara elata* apresentou o maior poder calorífico superior (22,51 MJ/kg) e densidade energética (15,60 GJ m^{-3}), além do maior teor de carbono elementar (54,69%). *Ocotea* sp. também apresentou características favoráveis, com 1,93% de cinzas e 29,27% de carbono fixo. Em contraste, *E. grandis* × *E. urophylla* apresentou o maior teor de cinzas (7,61%), o menor poder calorífico (16,09 MJ/kg) e a menor densidade energética (5,18 GJ/m³), evidenciando características inferiores às de algumas espécies amazônicas. Considerando a quantidade de casca associada a 1.000 m³ de toras, *Zollernia paraensis* apresentou os maiores estoques de carbono e energia, seguida por *Apeiba echinata*. Os resultados demonstram que resíduos de casca apresentam elevado potencial para valorização energética, contribuindo para o aproveitamento de resíduos do processamento da madeira.

Palavras-chave: Biomassa Florestal; Conversão Termoquímica; Economia Circular.

Productivity, quality, and carbon stocks of bark from eight amazonian forest species and eucalyptus

Abstract: Bark is a lignocellulosic residue with potential for energy applications, whose quality and availability vary among species. This study evaluated the productivity and physical, chemical, and energy properties of bark from eight Amazonian forest species and the hybrid *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*. Basic density ranged from 0.322 to 0.809 g/cm³, while ash, volatile matter, and fixed carbon contents ranged from 1.93–7.61%, 68.80–75.22%, and 19.65–29.27%, respectively. Manilkara elata exhibited the highest higher heating value (22.51 MJ/kg¹) and energy density (15.60 GJ/m³), as well as the highest elemental carbon content (54.69%). Ocotea sp. also showed favorable characteristics, with 1.93% ash and 29.27% fixed carbon. In contrast, *E. grandis* × *E. urophylla* exhibited the highest ash content (7.61%), the lowest higher heating value (16.09 MJ/kg), and the lowest energy density (5.18 GJ/m³), indicating less favorable characteristics than those of some Amazonian species. Considering the amount of bark associated with 1,000 m³ of logs, *Zollernia paraensis* showed the highest carbon and energy stocks, followed by *Apeiba echinata*. The results demonstrate that bark has high potential for energy valorization, contributing to the utilization of wood-processing residues.

Keywords: Forest Biomass; Thermochemical Conversion; Circular Economy.

545.Introdução

A valorização de resíduos lignocelulósicos é cada vez mais incentivada devido à atual necessidade de economias mais sustentáveis. A casca é um exemplo de resíduo lignocelulósico abundante que pode ser aproveitada. Ela é composta por celulose, hemiceluloses, lignina e uma elevada concentração de compostos extrativos, além de menores quantidades de substâncias inorgânicas (Autor et al., 2022; Patel et al., 2024).

O manejo florestal sustentável da Amazônia e os plantios de eucalipto que abastecem a indústria florestal geram grandes quantidades de resíduo, como galhos, tocos, folhas e cascas. Estima-se a geração de 2,13 toneladas de resíduos (sapopemas, restos de troncos e galhos) para cada 1 tonelada de madeira extraída com a Exploração de Impacto Reduzido (Numazawa et al., 2017). 10 a 18% do volume total do tronco é composto pela casca (Foelkel, 2026). Em todo o mundo, centenas de milhões de toneladas de cascas são geradas anualmente pelas indústrias de celulose, papel e processamento da madeira (Jablonsky et al., 2017). Atualmente, grande parte desse material ainda é deixado na floresta.

Essas cascas subutilizadas possuem alto potencial de aplicação industrial como a incorporação em painéis de aglomerados, fabricação de adesivos à base de taninos, produção de resinas epóxi, uso de seus compostos bioativos para aplicações farmacêuticas e cosméticas, produção de bio-óleo e biochar a partir da pirólise da casca, entre outros (Kuo et al., 2018; Jablonsky et al., 2017). Este estudo avaliou a produtividade, propriedades físicas, químicas e energéticas das cascas de oito espécies florestais amazônicas e do híbrido *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla.*

546.Material e métodos

2.1 Coleta do material e identificação das espécies

Neste estudo foram utilizadas cascas de 9 espécies florestais. Destas, 8 espécies são oriundas de resíduos do Manejo Florestal Sustentável da Amazônia, e uma delas, Eucalipto, é oriunda de resíduo de desbaste de um plantio experimental de *Eucalyptus grandis* x *urophylla*.

A coleta das cascas de resíduo do manejo florestal aconteceu na fazenda Rio Capim na Unidade de Manejo Florestal (UMF/Rio Capim), localizada no município de Paragominas, Pará, Brasil. 7 espécies tropicais de seis famílias botânicas foram identificadas de acordo com a avaliação da madeira pelo herbário e xiloteca do Laboratório de Botânica da Embrapa Amazônia Oriental, localizada em Belém, Pará, Brasil.

A coleta da casca de eucalipto aconteceu no plantio experimental da Universidade Federal de Lavras, localizado em Santo Antônio do Amparo, Minas Gerais.



Figura 1 – Cascas das espécies florestais utilizadas no estudo.

A Tabela 1 apresenta o nome científico das espécies estudadas e o percentual de casca mensurado em campo. A mensuração foi realizada com uma fita métrica pela diferença entre o diâmetro com casca e sem casca.

Tabela 1 - Espécies florestais utilizadas no estudo.

Nome científico	Percentual de casca (%)
Sterculia sp.	2,75
Handroanthus sp.	4,40
Ocotea sp.	1,89
Manilkara elata	3,57
Zollernia paraensis	6,19
Apeiba echinata	12,31
Peltogyne lecointei	3,64
Lecythis pisonis	1,71
Eucalyptus grandis e urophylla	8,23

2.2 Análise química imediata e poder calorífico das cascas

A química imediata foi obtida por meio do procedimento descrito na norma D1762-84 (ASTM, 2007). O carbono fixo é obtido conforme a Equação 1:

$$TCF = 100 - (TMV + TCz) \quad (1)$$

Obteve-se o poder calorífico superior através de uma bomba calorimétrica conforme a norma E711-87 (ASTM, 2013).

2.3 Análise química elementar

A fração de casca moída que ficou retida entre as peneiras de 60 (0,250 mm) e 200 mesh (0,074 mm) foi usada para análise química elementar. Carbono, hidrogênio, nitrogênio e enxofre foram quantificados em um Elementar Universal Analyzer® (modelo Vario Micro Cube). O conteúdo de oxigênio foi obtido por diferença (Equação 2).

$$O = 100 - C - H - N - S - TCz \quad (2)$$

Em que. O: Oxigênio (%); C: Carbono (%); H: Hidrogênio (%); N: Nitrogênio (%); S: Enxofre (%); e TCz: Teor de cinzas (%).

2.4 Densidade básica e parâmetros de produtividade

A densidade básica da casca (DB) foi obtida pelo método de imersão. O mesmo procedimento foi realizado para a madeira das espécies estudadas, visando realizar correlações entre as duas biomassas. A partir da densidade básica e o percentual de casca no fuste das árvores, foi possível fazer estimativas de produtividade de casca.

A equação 2, 3, 4 e 5 apresenta essas estimativas.

$$Massa\ de\ casca\ em\ 1000\,m^3\ de\ tora\,(kg) = \frac{\frac{casca\,(\%)}{100} * 1000 * DB\left(\frac{kg}{m^3}\right)}{1000} \quad (3)$$

$$Massa\ de\ carbono\ contido\ na\ casca\ em\ 1000\,m^3\ de\ tora\,(kg) = \frac{carbono\,(\%)}{100} * Massa\ d \quad (4)$$

$$Energia\ contido\ na\ casca\ em\ 1000\,m^3\ de\ tora\,(MJ) = PCS\left(\frac{MJ}{kg}\right) * Massa\ de\ casca\ em \quad (5)$$

$$Densidade\ energ\acute{e}tica\,(GJ/m^3) = PCS\left(\frac{MJ}{kg}\right) * DB\left(\frac{kg}{m^3}\right) \frac{}{1000} \quad (6)$$

Onde casca (%) é o percentual de casca das espécies, DB é a densidade básica da casca, carbono (%) é o teor de carbono das cascas e PCS é o poder calorífico superior das cascas.

2.5 Análise estatística

Os dados foram submetidos a análise de variância, com seus devidos pressupostos, além da realização de correlações entre as características da casca e os resultados obtidos.

547.Resultados e discussão

A composição química imediata da casca apresentou ampla variação entre as espécies (Tabela 2), indicando diferenças no potencial de aproveitamento energético. O teor de cinzas variou de 1,93% em *Ocotea* sp. a 7,61% no híbrido de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*, sendo menores valores desejáveis por reduzirem a formação de resíduos durante a combustão. Os materiais voláteis variaram de 68,80 a 75,22%, favorecendo a ignição e a reatividade da biomassa, enquanto o carbono fixo apresentou comportamento inverso, com valores entre 19,65 e 29,27%.

Destacaram-se *Ocotea* sp. e *Manilkara elata*, que apresentaram elevados teores de carbono fixo (29,27% e 27,98%, respectivamente) e baixos teores de cinzas, características favoráveis à produção de carvão vegetal de melhor qualidade. Em contraste, espécies com maiores teores de materiais voláteis, como *Sterculia* sp., tendem a apresentar melhor desempenho na combustão direta devido à maior facilidade de ignição.

Tabela 2 – Química imediata da casca de espécies amazônicas e híbridos de *Eucalyptus*

Espécie	Densidade básica (g/cm³)	Cinzas (%)	MV (%)	CF (%)	Poder calorífico superior (MJ/kg)	Densidade energética (GJ/m³)
Sterculia sp.	0,369	3,53	75,22	21,25	18,69	6,90
Eucalyptus grandis e urophylla	0,322	7,61	72,23	20,17	16,09	5,18
Handroanthus sp.	0,519	7,17	73,18	19,65	16,52	8,57
Ocotea sp.	0,549	1,93	68,80	29,27	19,98	10,96
Manilkara elata	0,693	2,09	69,93	27,98	22,51	15,60
Zollernia paraensis	0,809	6,42	71,84	21,74	18,34	14,83
Apeiba echinata	0,347	5,49	73,20	21,31	17,12	5,95
Peltogyne lecointei	0,796	3,17	72,66	24,18	18,87	15,02
Lecythis pisonis	0,5	2,26	74,29	23,45	19,35	9,68

O poder calorífico superior (PCS) das cascas variou de 16,09 a 22,51 MJ kg^{-1}, demonstrando diferenças importantes no potencial energético gravimétrico entre as espécies. *Manilkara elata* apresentou o maior PCS (22,51 MJ kg^{-1}), seguida por *Ocotea* sp. (19,98 MJ kg^{-1}) e *Lecythis pisonis* (19,35 MJ kg^{-1}). Em contraste, *Eucalyptus grandis* × *urophylla* apresentou o menor valor (16,09 MJ kg^{-1}), coincidentemente com um dos maiores teores de cinzas (7,61%). De modo geral, as cascas com menores teores de cinzas e maiores teores de

carbono fixo apresentaram valores mais elevados de PCS, como observado para *M. elata* e *Ocotea* sp., indicando características mais favoráveis para o aproveitamento energético (Protásio et al., (2019).

A Figura 2 apresenta a relação entre a densidade das cascas e a densidade básica média das madeiras das espécies estudadas. Houve correlações significativas entre essas características. Essa informação pode ser utilizada para previsão da densidade básica da madeira a partir da casca e, melhores estimativas de biomassas em florestas naturais e plantadas.

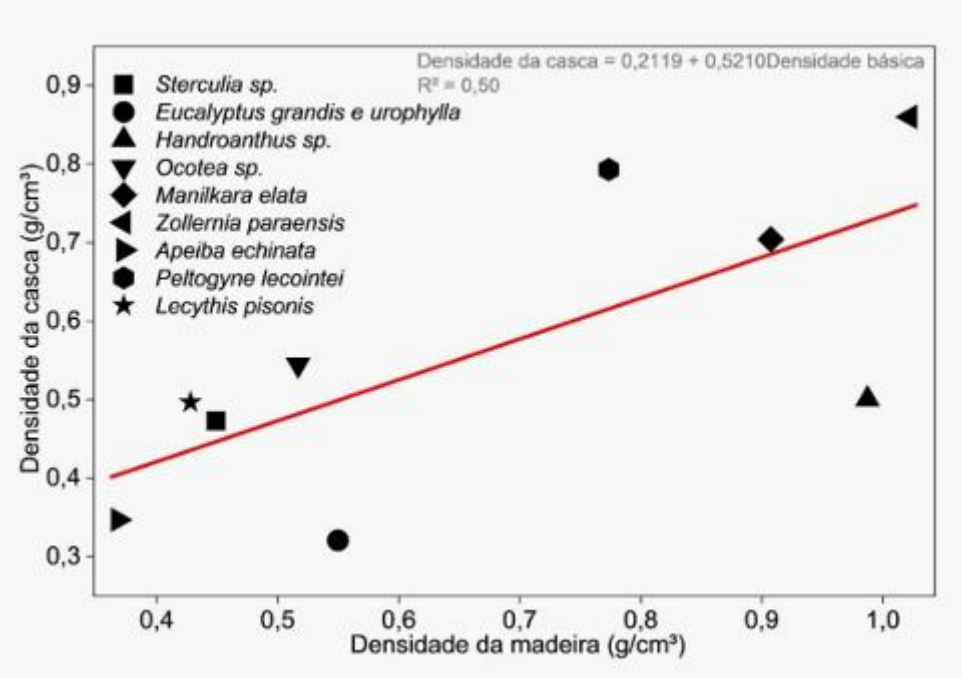


Figura 2 – Relação entre a densidade das cascas e a densidade básica média das madeiras das espécies estudadas.

O teor de carbono variou de 36,66% (*Apeiba echinata*) a 54,69% (*Manilkara elata*). O teor de hidrogênio apresentou pequena variação (4,78–6,25%), sendo *Manilkara elata* a espécie com maior valor (6,245%).

Tabela 3– Química elementar da casca de espécies amazônicas e híbridos de *Eucalyptus*

Nome científico	N (%)	C (%)	H (%)	S (%)	O (%)
Sterculia sp.	0,34	45,06	5,82	0,08	45,17
Eucalyptus grandis e urophylla	0,31	39,07	4,89	0,09	48,03
Handroanthus sp.	1,28	43,33	5,82	0,08	42,3
Ocotea sp.	0,77	49,80	5,89	0,05	41,57
Manilkara elata	0,81	54,69	6,25	0,11	36,06
Zollernia paraensis	1,06	47,61	5,87	0,05	38,99

Apeiba echinata	1,09	36,66	4,78	0,14	51,84
Peltogyne lecointei	0,68	47,86	6,02	0,39	41,89
Lecythis pisonis	0,38	48,53	5,88	0,04	42,92

A Figura 3 apresenta a estimativa de massa de casca em 1000 m³ de tora, massa de carbono contida na casca em 1000 m³ de tora e energia contida na casca em 1000 m³ de casca. Considerando um mesmo volume de 1.000 m³ de toras, foram observadas diferenças expressivas entre as espécies quanto à quantidade de casca gerada e, consequentemente, ao carbono e à energia contidos nesse resíduo. *Zollernia paraensis* apresentou os maiores valores, com 50,10 kg de casca, 23,85 kg de carbono e 918,71 MJ de energia, seguida por *Apeiba echinata*, com 42,76 kg de casca, 15,68 kg de carbono e 732,16 MJ.

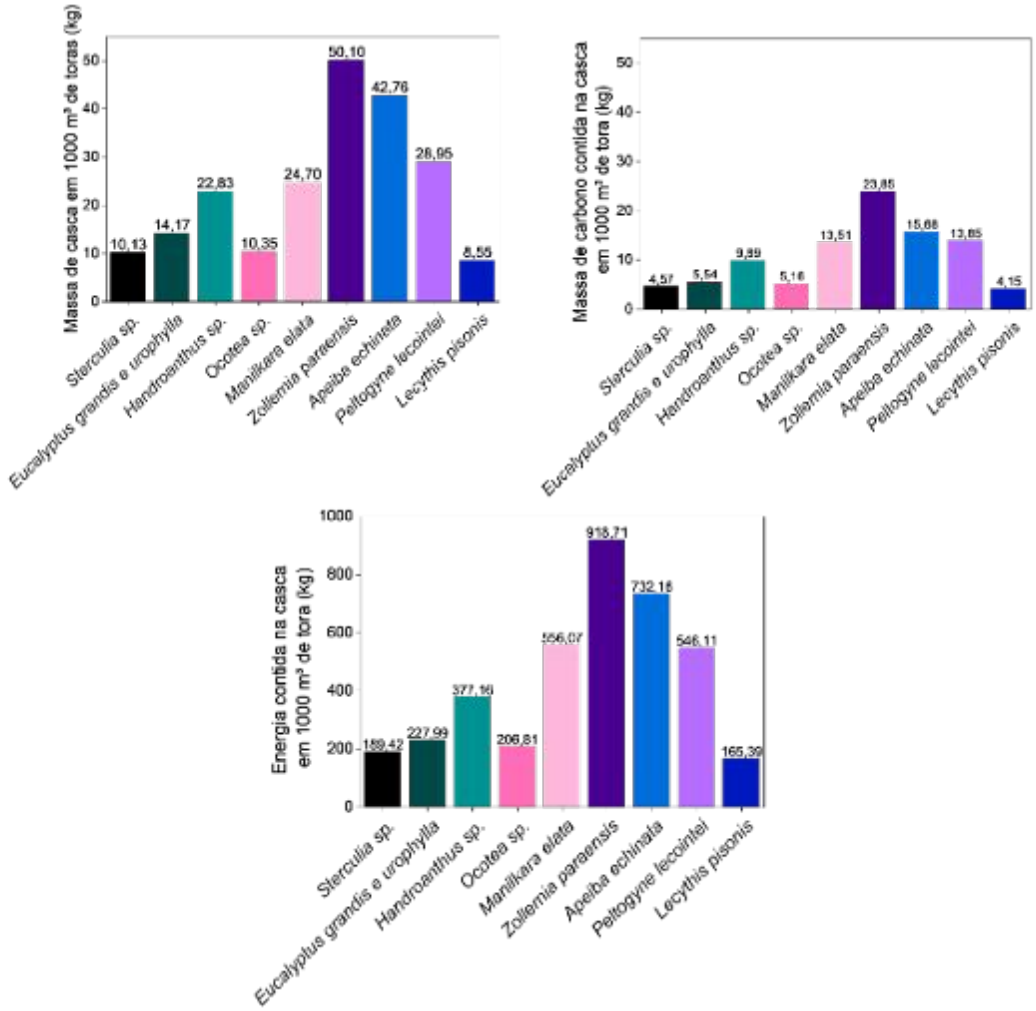


Figura 3 – Estimativa de massa seca de casca em 1000 m³ de tora, massa de carbono contida na casca em 1000 m³ de tora e energia contida na casca em 1000 m³ de casca.

Manilkara elata e *Peltogyne lecointei* também se destacaram, principalmente quanto à massa de carbono, com 13,51 e 13,85 kg, respectivamente. Em contraste, *Lecythis pisonis*

apresentou os menores valores para massa de casca (8,55 kg), carbono (4,15 kg) e energia (165,39 MJ).

548.Conclusões

As cascas das espécies avaliadas apresentam características distintas quanto à composição química e ao potencial energético, demonstrando possibilidades de aproveitamento como biomassa. *Manilkara elata* e *Ocotea* sp. destacaram-se pela combinação de baixos teores de cinzas, elevados teores de carbono fixo e carbono elementar e maiores valores de poder calorífico. A densidade da casca apresentou relação significativa com a densidade básica da madeira, indicando potencial para auxiliar na estimativa de biomassa. Considerando a disponibilidade de casca por volume de madeira, *Zollernia paraensis* e *Apeiba echinata* apresentaram as maiores quantidades de energia e carbono, evidenciando que o potencial de aproveitamento desse resíduo depende tanto de suas propriedades energéticas quanto da quantidade de casca gerada.

549.Agradecimentos

Os autores agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq: processos nº 406053/2022-7 e 304165/2022-0), à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG). Agradecem também à Universidade Federal de Lavras (UFLA), ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia da Madeira (PPGCTM).

550.Referências bibliográficas

American Society for Testing and Materials. (2013). *ASTM E711-87: Standard test method for gross calorific value of refuse-derived fuel by the bomb calorimeter*. ASTM International.

American Society for Testing and Materials. (2007). *ASTM D1762-84: Standard test method for chemical analysis of wood charcoal*. ASTM International.

Autor, E., Cornejo, A., Bimbela, F., Maisterra, M., Gandía, L. M., & Martínez-Merino, V. (2022). Extraction of phenolic compounds from *Populus* Salicaceae bark. *Biomolecules, 12*(4), 539. https://doi.org/10.3390/biom12040539

Foekel, C. (2026). *Livro virtual*. Eucalyptus Online Book e Newsletter. https://www.eucalyptus.com.br/capitulos/capitulo_casca.pdf

Jablonsky, M., Nosalova, J., Sladkova, A., Haz, A., Kreps, F., Valka, J., Miertus, S., Frecer, V., Ondrejovic, M., Sima, J., & Surina, I. (2017). Valorisation of softwood bark through extraction of utilizable chemicals: A review. *Biotechnology Advances, 35*(6), 726–750. https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2017.07.007

Kuo, P. Y., Yan, N., Tratnik, N., & Luo, J. (2018). Applications of bark for bio-based adhesives and foams. *Physical Sciences Reviews, 3*(7), 20170194. https://doi.org/10.1515/psr-2017-0194

Numazawa, C. T. D., Numazawa, S., Pacca, S. A., & John, V. M. (2017). Logging residues and

CO_2 of Brazilian Amazon timber: Two case studies of forest harvesting. *Resources, Conservation and Recycling*, *122*, 280–285. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.02.016

Patel, S. D., Brunschwig, C., Robertson, M., Murray, R., Thumm, A., Raymond, L., Hill, S. J., & Weber, C. C. (2024). Extraction and isolation of hydrophobic compounds and tannins from *Pinus radiata* bark using switchable hydrophilicity solvents. *Industrial Crops and Products*, *209*, 117966. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2023.117966

Protásio, T. P., Scatolino, M. V., de Araújo, A. C. C., et al. (2019). Assessing proximate composition, extractive concentration, and lignin quality to determine appropriate parameters for selection of superior *Eucalyptus* firewood. *BioEnergy Research*, *12*, 626–641. https://doi.org/10.1007/s12155-019-10004-x

Propriedades de barreira de filmes de nanofibrilas de celulose obtidas de casca de maracujá

Resumo: Objetivou-se avaliar as propriedades de barreira de filmes à base de nanofibrilas de celulose (NFC) da casca de maracujá sob diferentes pré-tratamentos, comparando-os aos filmes à base de NFC de eucalipto. Cascas de maracujá coletadas em Rolim de Moura, Rondônia foram lavadas, secas, moídas e peneiradas (≤ 40 *mesh*). Aplicou-se pré-tratamento de NaOH a 5% (m/m) nas fibras e uma fração seguiu para oxidação mediada por TEMPO. As suspensões foram processadas em um ultrarrefinador mecânico para obtenção das NFCs. Nos filmes produzidos, avaliaram-se a permeabilidade ao vapor de água (PVA) e a resistência ao óleo. A PVA dos filmes de NFC-Maracujá TEMPO, NFC-Maracujá NaOH e NFC-Eucalipto foi de 11,21, 8,35 e 2,47 g.mm/dia.m².kPa, respectivamente. O filme de NFC-Maracujá TEMPO demostrou resistência à óleo até o kit 10, enquanto os demais apresentaram até o kit 12. Conclui-se que as NFCs da casca de maracujá apresentam potencial para aplicação como embalagens sustentáveis.

Palavras-chave: Nanofibrilas de celulose; Pré-tratamentos químicos; Oxidação TEMPO.

Passion fruit peel films: water vapor permeability and oil resistance

Abstract: This study evaluated the barrier properties of cellulose nanofibril (CNF) films produced from passion fruit peel under different pretreatments and compared them with eucalyptus CNF films. Passion fruit peels collected in Rolim de Moura, Rondônia, Brazil, were washed, dried, ground, and sieved (≤40 mesh). The fibers were pretreated with 5% (w/w) NaOH, and part of the material was subsequently subjected to TEMPO-mediated oxidation. The resulting suspensions were mechanically refined to obtain CNFs. The films were evaluated for water vapor permeability (WVP) and oil resistance. WVP values for Passion Fruit CNF-TEMPO, Passion Fruit CNF-NaOH, and eucalyptus CNF films were 11.21, 8.35, and 2.47 $g \cdot mm \cdot day^{-1} \cdot m^{-2} \cdot kPa^{-1}$, respectively. The TEMPO-treated film resisted up to Kit Test 10, whereas the other films reached Kit Test 12. Passion fruit peel CNFs showed potential for sustainable packaging applications.

Keywords: Cellulose nanofibrils; Chemical pretreatments; TEMPO oxidation.

Introdução

Um dos grandes desafios enfrentados no século XXI, em escala mundial, é o impacto que a poluição plástica causa nos ecossistemas, além aos efeitos das mudanças climáticas. Esse cenário é agravado pelo alto consumo de energia a partir dos combustíveis fósseis para fabricação dos polímeros sintéticos, o que gera altas emissões de gases de efeito estufa. Cerca de 36% de todos os plásticos produzido mundialmente são destinados ao setor de embalagens descartáveis, principalmente para alimentos e bebidas, sendo que 85% desse montante acaba sendo descartado de forma inadequada em aterros sanitários ou em recursos hídricos (UNEP,

2022). Por essa razão, tem-se buscado opções de materiais biodegradáveis para substituir o consumo intensivo de embalagens plásticas.

Nesse contexto, diversos estudos têm focado no desenvolvimento de filmes de fontes renováveis produzidos a partir de polímeros naturais. Deste modo, os ~~biofilmes~~ bioplásticos podem se tornar uma alternativa viável para reduzir a dependência de polímeros de origem fóssil em múltiplos setores industriais, com destaque para o de embalagens alimentícias. Para essa finalidade, a obtenção de nanofibrilas de celulose (NFC) tem se tornado promissora, uma vez que suas propriedades químicas, mecânicas e de barreira tornam esses materiais versáteis para diversas aplicações tecnológicas (Norizan et al., 2022).

Diante das crescentes preocupações ambientais, o desenvolvimento de tecnologias para o reaproveitamento de resíduos agroindustriais tem ganhado destaque por transformar subprodutos em materiais de valor agregado dentro do conceito de economia circular. Deste modo, a cultura do maracujá-amarelo (*Passiflora edulis* Sims.), fruto presente na cadeia produtiva na agricultura familiar do Brasil, movimenta cerca de 2,4 milhões de reais na economia do país (IBGE, 2024). Contudo, o processamento industrial dessa fruta gera resíduos, principalmente as cascas e o albedo, que correspondem a aproximadamente 52% da sua composição (Silva et al., 2016). Nesse sentido, a produção de bioplásticos a partir de NFC extraída deste coproduto pode configurar-se como uma alternativa promissora para valorização da biomassa e mitigação de impactos ambientais.

Diante deste cenário, o objetivo do trabalho foi avaliar as propriedades de barreira ao vapor de água e de resistência ao óleo do filme à base de NFC obtido a partir de cascas de maracujá e submetidas a dois diferentes pré-tratamentos químicos, comparando seu desempenho com o de uma matriz comercial de eucalipto.

Material e métodos

Coleta do material e Pré-tratamento

Para a realização do experimento, foram utilizadas duas fontes de matéria-prima: polpa celulósica de eucalipto e casca de maracujá, esta última obtida a partir do descarte da indústria alimentícia do município de Rolim de Moura, Rondônia. Foram coletados aproximadamente 2 kg de cascas, as quais foram lavadas para remoção de resíduos superficiais e secas em estufa a 65 ± 2 ºC. Em seguida, o material foi triturado em liquidificador industrial e peneirado para obtenção de granulometria ≤ 40 *mesh*.

O pré-tratamento químico das cascas de maracujá foi realizado em uma proporção de massa de fibra para volume de solução de 1:40 (m/v). Para isso, as fibras foram imersas a

uma solução aquosa de NaOH a 5% (m/m), sob agitação mecânica a 500 rpm em banho-maria, a 80 ºC por 2 horas. Após esse processo, o material foi lavado sucessivamente com água destilada até atingir pH ≈ 7.

Uma fração deste material pré-tratado foi submetida a uma segunda modificação química por oxidação mediada por TEMPO ($C_9H_{18}NO$) (Saito et al., 2007). Para isso, foi solubilizado 0,96 g de TEMPO em 250 ml de água destilada sob agitação por 1 hora. Paralelamente, 6 g de brometo de sódio (NaBr) foram dissolvidos em 100 ml de água destilada e agitados na mesma condição. Ambas as soluções foram adicionadas em uma suspensão de casca de maracujá contendo 60 g de massa seca, obtida a partir de 378,78 g de massa úmida, e diluída em 2081,22 g de água destilada, resultando em uma concentração de aproximadamente 2,5% (m/m), a qual foi mantida em agitação por 20 minutos.

Posteriormente, foram adicionados gradualmente 375,6 ml de hipoclorito de sódio (NaClO) a 10% (m/v) para elevar o pH em torno de 10. A reação ocorreu sob agitação mecânica por 3 horas à temperatura ambiente, mantendo o pH em torno de 10 por meio da adição periódica de NaOH 0,5M. Após esse período, foi adicionado 100 ml de etanol para interromper a oxidação, e o pH da suspensão foi neutralizado com ácido clorídrico (HCL) 0,5 M. Por fim, as fibras oxidadas foram lavadas com água destilada até a remoção completa dos reagentes residuais.

Já a polpa celulósica de eucalipto obtida comercialmente foi suspensa em água destilada para atingir uma concentração de ≈ 2,5% (m/m). A suspensão foi submetida à agitação mecânica a 500 rpm durante 40 minutos. Esse procedimento permitiu a desagregação completa das fibras celulósicas e homogeneização do material, dispensando pré-tratamentos químicos adicionais.

Produção das nanofibrilas de celulose e filmes

As suspensões fibrosas preparadas na etapa anterior, incialmente com 2,5% (m/m), foram processadas individualmente em ultrarrefinador mecânico (*grinder Super Mass Colloider* Masuko Sangyo MKCA6-2). O material foi submetido a ciclos consecutivos de desfibramento até a obtenção de uma suspensão com aparência gelatinosa e homogênea, de acordo com o preconizado na metodologia de Mascarenhas et al. (2022), totalizando 5 ciclos para o material obtido a partir das cascas de maracujá com pré-tratamento com NaOH e 2 ciclos para o material tratado com TEMPO, e 5 passagens para a obtenção de NFC de eucalipto. Após o processamento, foi determinado o teor de sólidos em triplicata para cada tratamento, resultando em concentrações de 1,66% (m/m) para nanofibrilas de celulose (NFC)

de maracujá oxidada por TEMPO, 2,05% (m/m) para a NFC de maracujá tratada com NaOH e 1,70% (m/m) para a NFC de eucalipto.

O software ImageJ (versão 1.54g; National Institutes of Health) foi empregado para mensurar o diâmetro das fibras em imagens obtidas por microscopia eletrônica de varredura de ultra-alta resolução. A distribuição dos diâmetros foi utilizada para confirmar a classificação dos materiais como nanomateriais. A nanocelulose proveniente da casca de maracujá produzida sem o pré-tratamento por oxidação via TEMPO apresentou aproximadamente 90% das estruturas com diâmetro inferior a 100 nm, enquanto com o pré-tratamento TEMPO (Mascarenhas et al., 2022). De forma semelhante, a nanocelulose de eucalipto comercial apresentou mais de 70% das estruturas com diâmetro inferior a 100 nm. Para a produção dos filmes, as suspensões de nanocelulose foram diluídas com água destilada até atingirem uma concentração de 1% (m/m) de sólidos e homogeneizadas sob agitação mecânica. Posteriormente, alíquotas de aproximadamente 25 g de cada suspensão foram vertidas em placas de Petri. As placas foram mantidas em temperatura ambiente até a completa evaporação da água, promovendo a formação dos filmes. A espessura de cada filme foi determinada utilizando-se um micrômetro digital (Precisão 0,001 mm), realizando-se medições em pontos aleatórios de cada amostra para a obtenção da média aritmética.

Propriedades de barreira dos filmes

A determinação da permeabilidade ao vapor de água (PVA) foi realizada por meio do método gravimétrico, de acordo com a norma ASTM E96 M-16 (ASTM, 2016) e com as adaptações propostas por Guimarães et al. (2015). Foi utilizado frascos de vidro âmbar de 50 ml, cujas as tampas foram perfuradas para delimitar uma área de permeação de 15 mm de diâmetro. Os frascos foram preenchidos com aproximadamente ¾ de sílica gel e submetidos à secagem em estufa a 103 ± 2 ºC, por 24 horas, para que a umidade interna fosse próxima a 0%. Posteriormente, corpos de prova com 1,5 cm de diâmetro foram fixadas às tampas dos frascos com auxílio de anéis de vedação do tipo *O-ring*. O conjunto foi acondicionado em um dessecador contendo uma solução aquosa de cloreto de sódio (NaCL) a 20% (m/v), para controle da umidade (ASTM E104-02, 2012). O ensaio foi conduzido sob uma temperatura média de 23,6 ± 0,66 ºC e umidade relativa média de 66,06 ± 1,97%. A monitoração dos frascos foi realizada em balança analítica a cada 24 horas, durante 8 dias consecutivos, utilizando-se quatro repetições para cada tratamento. A PVA foi calculada a partir das equações 1 e 2.

$$TPVA = \frac{CA}{AP} \qquad 1$$

$$PVA = \frac{TPVAxE}{\Delta P} \qquad 2$$

em que: *TPVA* = Taxa de permeabilidade ao vapor de água (g.m². dia^{-1}); *AP* = Área de permeação (m²); *CA* = Coeficiente angular da regressão linear da variação de massa em função de tempo (g.dia^{-1}); *PVA* = Permeabilidade ao vapor de água (g.mm.dia^{-1}.m^{-2}. kPa^{-1}) *E* = Espessura da amostra (mm); *ΔP* = Diferença de pressão parcial de vapor de água entre as duas faces do filme (kPa)

A resistência ao óleo dos filmes foi avaliada por meio do Kit Test, de acordo com a norma TAPPI T559 (TAPPI, 2012). O ensaio consistiu na utilização de 12 soluções com níveis crescentes de agressividade (Tabela 1). Portanto, o Kit Test 1 é um composto puro de óleo de rícino, sendo considerado o menos agressivo, enquanto o Kit Test 12, constituído por uma solução de tolueno e n-heptano, representa o mais agressivo.

Tabela 1 – Proporções dos reagentes utilizados na preparação das soluções do ensaio de resistência a óleo

Kit test	Óleo de rícino (g)	Tolueno (mL)	n-Heptano (mL)
1	24,770	0,000	0,000
2	22,293	1,280	1,280
3	19,820	2,560	2,560
4	17,330	3,840	3,840
5	14,862	5,120	5,120
6	12,385	6,400	6,400
7	9,908	7,680	7,680
8	7,431	8,960	8,960
9	4,954	10,240	10,240
10	2,477	11,520	11,520
11	0,000	12,800	12,800
12	0,000	11,520	14,080

O procedimento consistiu na aplicação de uma gota de cada solução sobre a superfície das amostras de filme (3 cm x 3 cm), posicionado sobre papel *Kraft*. Após 15 segundos, o excesso da solução foi rapidamente removido com algodão e o filme foi deslocado do local. Desse modo, a falha de barreira ocorre quando há um escurecimento do papel *Kraft* subjacente, indicando que houve danificação no filme. O valor de resistência é definido pelo maior número do Kit Test em que o filme não apresentou falhas.

d. **Análise de dados**

Os dados obtidos das variáveis de espessura e PVA foram submetidos à Análise de Variância (ANOVA) após a verificação dos pressupostos de normalidade e homocedasticidade dos resíduos. Para a comparação das médias entre os tratamentos, aplicou-se o teste de *Tukey* ao nível de 5% de significância ($p \leq 0,05$). A análise estatística foi processada no *software* RStudio (versão 4.6.0), utilizando os pacotes *car*, *agricolae* e *ggplot2*. O *software* Microsoft Excel foi utilizado para a tabulação dos dados e confecção dos gráficos e tabelas.

3. Resultados e discussão

Os resultados da ANOVA foram significativos ($p < 0,001$) para os dados de espessura e PVA dos filmes (Tabela 2). O teste de *Tukey* classificou as médias de espessura em três grupos distintos, sendo que o filme de NFC-Maracujá TEMPO foi o mais espesso (0,076 ± 0,005 mm), seguido do NFC-Maracujá NaOH (0,055 ± 0,003 mm) e por último o NFC-Eucalipto (0,028 ± 0,003 mm). O baixo desvio-padrão observado dentro de cada tratamento indica homogeneidade no processo de secagem dos filmes. Sob o ponto de vista de classificação dos filmes quanto à PVA, as matrizes de NFC de maracujá foram classificadas com eficiência de barreira “muito baixa” contra a umidade, enquanto os filmes de eucalipto apresentaram “baixa” capacidade de barreira (Wang et al., 2018). No entanto, mesmo utilizando a mesma proporção de massa de sólidos na formação dos filmes, a fonte de biomassa e o tipo de pré-tratamento químico aplicado influenciou diretamente o arranjo estrutural e a espessura final dos filmes.

Tabela 2 – Valores médios de espessura e permeabilidade ao vapor de água (PVA) dos filmes à base de nanofibrilas de celulose (NFC)

Tratamento	Espessura (mm)	PVA (g.mm.dia^{-1}.m^{-2}.kPa^{-1})
NFC-Maracujá TEMPO	0,076 ± 0,005a	11,21 ± 0,37a
NFC-Maracujá NaOH	0,055 ± 0,003b	8,35 ± 0,32b
NFC-Eucalipto	0,028 ± 0,003c	2,47 ± 0,15c

Nota: Médias seguidas de letras minúsculas distintas na mesma coluna diferem estatisticamente entre si pelo teste de *Tukey* ($p \leq 0,05$). Valores após o sinal de ± representam o desvio padrão ($n = 4$).

Embora o filme de NFC-Eucalipto tenha apresentado uma espessura quase três vezes menor, ele demonstrou capacidade de barreira ao vapor de água quase cinco vezes superior à do tratamento com TEMPO. Esse comportamento pode ter ocorrido devido a organização estrutural das matrizes, indicando que uma maior compactação das fibras de eucalipto criou

uma barreira mais eficiente, dificultando a passagem das moléculas de água através do filme (Ramos et al., 2025).

Em contrapartida, NFCs quando submetidas à oxidação mediada por TEMPO são caracterizadas por serem mais expandidas, ou seja, inchadas, reduzindo as interações interfibrilares durante o processo de secagem, ocasionando o aumento de microporos na matriz do filme (Levanič et al., 2020). Consequentemente, quanto maior a rede de porosidade, maior será a permeabilidade do filme (Bedane et al., 2015). Além disso, as modificações químicas devido ao reagente TEMPO resultam em superfícies mais hidrofílicas (Cainglet et al., 2025). Portanto, características de alta afinidade com a água e a estrutura porosa podem ser responsáveis pela absorção e transporte de umidade, elevando os valores de PVA.

Os filmes obtidos por meio do tratamento alcalino (NaOH) apresentaram valores intermediários de espessura e PVA. Esse pré-tratamento tem como finalidade remover componentes amorfos e aumentar a rugosidade superficial das fibras, além de torná-las mais reativas, o que pode promover um maior entrelaçamento mecânico das fibras e adesão interfibrilar durante a secagem dos filmes (Zhou, Fan & Chen, 2016). Como as fibras tendem a permanecer mais íntegras, elas formam um emaranhado denso que atua na redução da permeabilidade. De maneira oposta, a oxidação por TEMPO associadas à agitação mecânica favorece a formação de finos em forma de lascas, decorrente da ruptura e delaminação da parede celular (Levanič et al., 2020). Com isso, a geração dessas pequenas partículas pode prejudicar o empacotamento do filme, que podem gerar uma rede de microporos, justificando a matriz alcalina como superior em relação a propriedades de barreira de vapor de água.

Quanto a capacidade de resistências ao óleo, os filmes de NFC-Maracujá NaOH e NFC-Eucalipto apresentaram resistência à solução mais agressiva do ensaio, o *Kit Test* 12 (Figura 1). Por outro lado, o filme de NFC-Maracujá TEMPO demostrou resistência até o *Kit Test* 10, apresentando falhas de permeação a partir do *Kit Test* 11 devido a elevada agressividade química dos solventes tolueno e n-heptano. De acordo com Mazega e colaboradores (2022), filmes nanocelulósicos quando submetidos à oxidação tendem a apresentar menor resistência a óleo quando as proporções desses solventes ultrapassam 80% em volume na solução do ensaio, o que corrobora a redução da barreira observada no tratamento TEMPO.

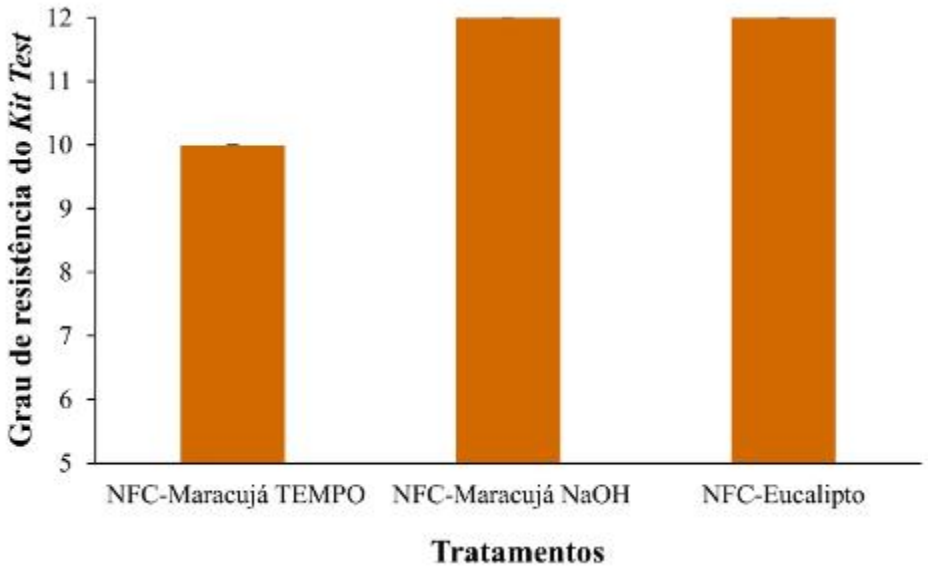


Figura 1 – Grau de resistência a óleo (*Kit Test*) dos filmes de nanofibrilas de celulose (NFC) obtidos de diferentes fontes e pré-tratamentos (*n = 4*).

Esses resultados demonstram que o tipo de pré-tratamento influencia na resistência física dos filmes. Nesse sentido, a elevada resistência observada nos demais tratamentos podem ser atribuída as suas estruturas menos porosas e um arranjo mais denso das nanofibrilas, o que favorece a forte rede de ligações de hidrogênio (Hasan; Wang; Tajvidi, 2021), corroborando os valores de permeabilidade encontrados. No entanto, apesar de o tratamento TEMPO ter apresentado valores menores de resistência, de acordo com Feroce, Licciardello e Piergiovanni (2025) filmes que resistem acima do *Kit Test* 8 são considerados excelentes barreiras contra gorduras e óleos, qualificando como materiais para aplicação em embalagens alimentícias.

Em conjunto, os resultados indicam que as diferenças observadas nas propriedades de barreira dos filmes estão associadas às modificações estruturais promovidas pelos pré-tratamentos empregados na obtenção da NFC. Embora a oxidação via TEMPO seja amplamente empregada na obtenção de nanofibrilas de celulose, os resultados obtidos indicam que, nas condições deste estudo, sua aplicação esteve associada a maiores valores de permeabilidade ao vapor de água e menor resistência ao óleo em comparação ao tratamento alcalino. À luz da literatura, esse comportamento pode estar relacionado às alterações estruturais promovidas pela oxidação, favorecendo a formação de uma matriz mais porosa e, consequentemente, maior difusão de moléculas através do filme. Esses resultados indicam que a escolha do pré-tratamento constitui um aspecto determinante para o desempenho das propriedades de barreira de filmes produzidos com NFC de casca de maracujá.

Conclusões

Os resultados demonstram que a estratégia de pré-tratamento influenciou as propriedades de barreira dos filmes produzidos com NFC de casca de maracujá. Entre as condições avaliadas, o tratamento alcalino apresentou menor permeabilidade ao vapor de água e maior resistência ao óleo em comparação à oxidação via TEMPO, evidenciando melhor desempenho para as propriedades de barreira avaliadas neste estudo. Diante disso, sugere-se a realização de novas pesquisas focadas no pré-tratamento das fibras da casca do maracujá, avaliando variações nos tempos de reação ou no desenvolvimento de *blends* poliméricos.

Agradecimentos

À Fundação Rondônia (FAPERO), ao CNPq e à CAPES pelo financiamento da pesquisa. À Universidade Federal de Rondônia (UNIR), Universidade Federal de Lavras (UFLA) e ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais (PGCA) pelo apoio institucional e infraestrutura laboratorial.

Referências bibliográficas

American Society for Testing and Materials. (2012). ASTM E104-02: Standard Practice for Maintaining Constant Relative Humidity by Means of Aqueous Solutions.
American Society for Testing and Materials. (2016). ASTM E96 M-16: Standard Test Methods for Water Vapor Transmission of Materials.
Bedane, A. H., Eić, M., Farmahini-Farahani, M., Xiao, H. (2015). Water vapor transport properties of regenerated cellulose and nanofibrillated cellulose films. Journal of Membrane Science, 493, 46–57. https://doi.org/10.1016/j.memsci.2015.06.009
Cainglet, H. E., Black, J. R., Udugoda, H., Nasiri, N., Diaz-Arenas, G. L., Garnier, G., Batchelor, W., Tanner, J. (2025). Can pure cellulose nanofibril films replace polyolefins as water vapor barriers in packaging? Journal of Colloid and Interface Science, 678(Part C), 547–555. https://doi.org/10.1016/j.jcis.2024.09.060
Feroce, A., Licciardello, F., Piergiovanni, L. (2025). Optimization of microfibrillated and nanofibrillated cellulose coating to improve performance of paperboard intended for food packaging applications. Packaging Technology and Science, 39(4), 351–366. https://doi.org/10.1002/pts.70008
Guimarães Jr, M., Botaro, V.R., Novack, K.M., Teixeira, F.G., Tonoli, G.H.D. (2015) Starch/PVA-based nanocomposites reinforced with bamboo nanofibrils. Industrial Crops and Products, 70, 72-83. 10.1016/j.indcrop.2015.03.014
Hasan, I., Wang, J., Tajvidi, M. (2021). Tuning physical, mechanical and barrier properties of cellulose nanofibril films through film drying techniques coupled with thermal compression. Cellulose, 28, 11345–11366. https://doi.org/10.1007/s10570-021-04269-9
IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. (2024). Produção agropecuária: maracujá. IBGE Explica. https://www.ibge.gov.br/explica/producao-agropecuaria/maracuja/br.
Levanič, J., Šenk, V. P., Nadrah, P., Poljanšek, I., Oven, P., & Haapala, A. (2020). Analyzing TEMPO-oxidized cellulose fiber morphology: New insights into optimization of the oxidation

process and nanocellulose dispersion quality. ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 8(48), 17752–17762. https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.0c05989

Mascarenhas, A. R. P., Scatolino, M. V., Dias, M. C., Martins, M. A., Mendonça, M. C., de Melo, R. R., ... Tonoli, G. H. D. (2022). Production of cellulose micro/nanofibrils with sodium silicate: impact on energy consumption, microstructure, crystallinity and stability of suspensions: Impact of Na2SiO3 on the properties of cellulose micro/nanofibrils. Nordic Pulp & Paper Research Journal, 37(4), 686-701. https://doi.org/10.1515/npprj-2022-0052

Mazega, A., Tarrés, Q., Aguado, R., Pèlach, M. À., Mutjé, P., Ferreira, P. J. T., & Delgado-Aguilar, M. (2022). Improving the barrier properties of paper to moisture, air, and grease with nanocellulose-based coating suspensions. Nanomaterials, 12(20), 3675. https://doi.org/10.3390/nano12203675

Norizan, M. N., Shazleen, S. S., Humaira Alias, A., Sabaruddin, F. A., Muhammad Asyraf, M. R., Zainudin, E. S., Abdullah, N., Samsudin, M. S., Kamarudin, S. H., & Norrrahim, M. N. F. (2022). Nanocellulose-based nanocomposites for sustainable applications: a review. Nanomaterials, 12(19), p. 3483. https://doi.org/10.3390/nano12193483

Ramos, A., Rodilla, J. M., Ferreira, R., & Luís, Â. (2025*).* Enhancing hydrophobicity of nanocellulose-based films by coating with natural wax from Halimium viscosum. Applied Sciences, 15(13), 7576. https://doi.org/10.3390/app15137576

Saito, T.; Kimura, S.; Nishiyama, Y.; Isogai, A. (2007). Cellulose Nanofibers Prepared by TEMPO-Mediated Oxidation of Native Cellulose. Biomacromolecules, 8(8), p. 2485–2491. https://doi.org/10.1021/bm0703970

Silva, E. C. O. da, Silva, W. P. da, Silva, E. T. da, Gusmão, R. P. (2016) Obtenção e caracterização da farinha do albedo de maracujá (*Passiflora edulis* f. *flavicarpa*) para uso alimentício. Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável, 11(3), p. 69–74. http://dx.doi.org/10.18378/rvads.v11i3.4062.

Technical Association of the Pulp and Paper Industry. (2012). TAPPI T559: Grease resistance test for paper and paperboard. TAPPI Press.

UNEP – United Nations Environment Programme. (2022). Intergovernmental negotiating committee to developan international legally binding instrument on plasticpollution, including in the marine environmentFirst session. wedocs.unep.org/rest/api/core/bitstreams/312c15c8-d71f-4f81-aba3-365cc03a7726/content

Wang, J., Gardner, D. J., Stark, N. M., Bousfield, D. W., Tajvidi, M., & Cai, Z. (2018). Moisture and oxygen barrier properties of cellulose nanomaterial-based films. ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 6(1), 49–70. https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.7b03523

Zhou, Y., Fan, M., & Chen, L. (2016). Interface and bonding mechanisms of plant fibre composites: An overview. Composites Part B: Engineering, 101, 31–45. https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.06.055

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Qualidade do biochar de palha de café produzido sob diferentes condições de pirólise para mitigação de carbono

Mirã de Oliveira Santos[1]; Danielly Moreira Gomes[1]; Iara Fontes Demuner[1]; Raquel Julia Cipriano dos Santos[1]; Geisianne de Carvalho Almeida[1]; Luisa Rosa Guimarães[1]; Angélica de Cássia Oliveira Carneiro[1]

[1] Universidade Federal de Viçosa

Resumo: A produção de biochar via pirólise de resíduos cafeeiros torna-se uma excelente estratégia sustentável na mitigação de gases de efeito estufa. Este estudo tem como objetivo avaliar a qualidade do biochar produzido a partir de pellets de palha de café sob diferentes condições de pirólise e seu uso no sequestro de carbono. A biomassa peletizada foi submetida à pirólise em mufla nas temperaturas de 450, 550 e 650°C, com tempo de residência fixo de 90 minutos. Foram determinados o rendimento gravimétrico e a composição química elementar. A partir destes resultados, foram calculadas as razões molares entre oxigênio e carbono (O/C), e hidrogênio e carbono (H/C) para estimar o potencial de estoque de carbono equivalente no solo, conforme a metodologia *Puro Standard*. Os resultados indicaram que o aumento da temperatura reduziu o rendimento gravimétrico de 36,40% para 31,21%, mas elevou o teor de carbono fixo até 66,97% a 650ºC. Nessa temperatura, a razão H/C atingiu o valor de 0,27, no qual o biochar apresenta uma estrutura molecular altamente condensada e estável, classificando-se como de melhor qualidade para estocar carbono. O potencial de sequestro de dióxido de carbono equivalente foi de 0,62 toneladas de CO_2 por tonelada de biochar no tratamento a 650°C, o maior valor entre as condições testadas. Portanto, conclui-se que o biochar de pellets de palha de café produzido na temperatura de 650ºC por 90 minutos é altamente estável e tem potencial para projetos de remoção de gases de efeito estufa.

Palavras-chave: Peletização; Economia circular, Resíduos agrícolas.

Quality of coffee husk biochar produced under different pyrolysis conditions for carbon mitigation

Abstract: The production of biochar via pyrolysis of coffee waste is an excellent sustainable strategy for mitigating greenhouse gases. This study aims to evaluate the quality of biochar produced from coffee straw pellets under different pyrolysis conditions and its use in carbon sequestration. The pelletized biomass was subjected to muffle furnace pyrolysis at temperatures of 450, 550, and 650°C, with a fixed residence time of 90 minutes. The gravimetric yield and elemental chemical composition were determined; based on these results, the molar ratios of oxygen to carbon (O/C) and hydrogen to carbon (H/C) were calculated to estimate the equivalent carbon storage potential in soil, according to the *Puro Standard* methodology. The results indicated that the increase in temperature reduced the gravimetric yield from 36.40% to 31.21%, but raised the fixed carbon content to 66.97% at 650°C. At this temperature, the H/C ratio reached 0.27, at which the biochar exhibits a highly condensed and stable molecular structure, classifying it as the highest quality for carbon storage. The carbon dioxide equivalent sequestration potential was 0.62 metric tons of CO_2 per metric ton of biochar in the 650°C treatment, the highest value among the conditions tested. Therefore, it can be concluded that

biochar from coffee straw pellets produced at 650°C for 90 minutes is highly stable and has potential for greenhouse gas removal projects.

Keywords: Pelletization; Circular economy; Agricultural waste.

1. Introdução

Atualmente, o Brasil tem se destacado como o maior produtor e exportador de café do mundo, com produção estimada em 56,5 milhões de sacas de 60 kg no ano de 2025, e uma área de cultivo superior a 2,25 milhões de hectares (CONAB, 2025). Além de sua importância econômica, o café no Brasil gerou uma receita bruta estimada em R$ 115,27 bilhões, ocupando o quarto lugar no ranking Valor Bruto da Produção (VBP) das lavouras brasileiras (EMBRAPA, 2025).

O processo para obtenção dos grãos de café gera uma quantidade equivalente de resíduos, numa proporção de 1:1 (BRUM et al., 2008) e se estes forem descartados ou subutilizados de forma inadequada, podem ocasionar impactos negativos, como a emissão de gases de efeito estufa (URREGO-YEPES et al., 2021). Além disso, a prática comum de queima direta da palha de café, se torna desvantajosa, visto que traz desperdício de uma matéria prima valiosa, e riscos à saúde humana e ao meio ambiente.

O uso de combustíveis fósseis na geração de energia tem intensificado a emissão de dióxido de carbono (CO_2) e outros poluentes, como óxidos de enxofre e nitrogênio (ZHANG et al., 2007). Esse cenário contribui fortemente para o aquecimento global e mudanças climáticas, tornando necessária a busca por alternativas mais sustentáveis. Nesse contexto, destaca-se o aproveitamento da biomassa resultante do processamento do café. Além da sua alta disponibilidade, este resíduo possui propriedades químicas favoráveis: elevado teor de compostos voláteis, extrativos e holoceluloses (VAN NGUYEN et al., 2023), permitindo a obtenção de produtos de alto valor agregado, como gás de síntese, bio-óleo e biochar.

O biochar é um material sólido que apresenta alto teor de carbono, e é obtido pela pirólise, uma decomposição térmica da biomassa em condições controladas ou ausente de oxigênio (INTERNATIONAL BIOCHAR INITIATIVE, 2024). Em razão da sua grande área de superfície específica, estrutura porosa e presença de grupos funcionais (OLIVEIRA et al., 2023), o biochar vem sendo investigado para diversas aplicações, como condicionador de solo e, principalmente, na remoção de carbono.

Apesar disso, uma limitação dessa biomassa está diretamente ligada à sua baixa densidade, que dificulta o transporte e pode causar problemas operacionais nos reatores. Sendo

assim, o processo de peletização promove redução do volume de biomassa a ser transportado, além de reduzir o arraste para as tubulações dos reatores durante o processo de pirólise (YANG et al., 2025). Entretanto, ainda há a necessidade de estudos sobre como a compactação influencia no rendimento e qualidade do biochar.

Diante disso, o presente estudo teve como objetivo avaliar a qualidade do biochar produzido a partir de pellets de palha de café submetidos a diferentes condições de pirólise, visando analisar seu potencial para o sequestro de carbono.

2. Material e métodos

O experimento foi desenvolvido no Laboratório de Painéis e Energia da Madeira (LAPEM), vinculado ao Departamento de Engenharia Florestal da Universidade Federal de Viçosa (DEF/UFV), localizado no município de Viçosa, MG.

2.1. Preparo e processamento da matéria-prima

A biomassa de palha de café utilizada no experimento foi doada por uma empresa cafeeira localizada no município de Lajinha – MG.

Os pellets foram produzidos a partir de uma mistura heterogênea, reunindo as frações granulométricas da biomassa abaixo de 5,3 mm e umidade, em base seca, média de 10%. Para cada tratamento foram confeccionados 500 gramas de pellets, totalizando em 8 quilogramas. Eles foram produzidos em uma prensa peletizadora laboratorial da marca Amandus Kahl, modelo 14-175, como ilustrada na Figura 2.

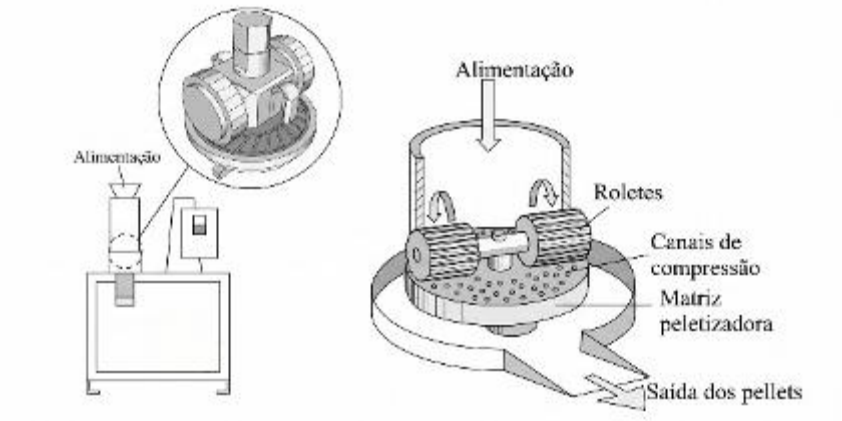


Figura 2 – Matriz peletizadora esquematizada utilizada na produção dos pellets (Magalhães, 2016).

2.2. Produção de biochar

O biochar foi produzido em uma mufla elétrica de laboratório (marca GP Científica), acoplada a um sistema de condensação de gases. Os pellets de palha de café foram acondicionados em um container metálico que foi levado à mufla sob condições controladas de oxigênio. Os experimentos foram conduzidos em três temperaturas diferentes: 450, 550 e 650ºC, com um tempo de residência fixo de 90 minutos. O controle dos parâmetros operacionais foi realizado a partir do painel digital contido na mufla. Após a carbonização, o contêiner metálico foi retirado do interior da mufla, onde o biochar foi resfriado e estabilizado por um período de 24 horas para posterior determinação de suas propriedades.

O rendimento gravimétrico do biochar foi determinado com base na relação entre a massa do biochar produzido e a massa da biomassa utilizada para a pirólise.

$$RG\% = \left(\frac{M_b}{M_{sr}}\right) \times 100$$

Onde:

$RG\%$ = rendimento gravimétrico (expresso em %);

M_b = a massa seca de biochar obtida (kg);

M_{sr} = a massa seca do resíduo (biomassa) utilizada no processo (kg).

A composição química elementar (CNHS) foi determinada em analisador elementar TruSpec Micro da LECO. Os teores de carbono, hidrogênio e nitrogênio foram obtidos conforme a norma EN 16948 (DIN, 2015). Já o teor de enxofre (S) foi obtido conforme a norma EN 16994 (DIN, 2016b) utilizando o módulo TruSpec S. O teor de cinzas foi determinado de acordo com a norma ASTM D1762-84 (ASTM, 2013). Por fim, o teor de oxigênio foi obtido pela soma dos teores de carbono, nitrogênio, hidrogênio, enxofre e cinzas, subtraído de 100, conforme EN 16993 (DIN, 2016a).

$$E_{\text{stored}} = Q_{\text{biochar}} \times C_{\text{org}} \times F_p^{\text{HT,TS}} \times \frac{44}{12} \quad (1)$$

Onde:

Q_{biochar} = quantidade de biochar produzida durante o período de relatório;

C_{org} = teor de carbono de biochar produzido;

$F_p^{\text{HT,TS}}$ = fator de permanência do carbono no solo;

$$FP^{HT,TS} = c \times m \times \frac{H}{C_{org}} \quad (2)$$

Onde:

c e *m* = coeficientes de regressão

$$\frac{H}{C_{org}}(molar) = \frac{m_H(\%)}{m_C(\%)} \times \frac{Mc\ (g\,mol^{-1})}{MH\ (g \cdot mol^{-1})} = \frac{m_H(\%)}{m_C(\%)} \times \frac{12}{1{,}0} \quad (3)$$

Onde:

H/C_{org} *(molar)* = razão molar entre hidrogênio e carbono orgânico, utilizada como indicador do grau de aromaticidade e estabilidade do biochar;

m_H *(%)* = teor de hidrogênio no biochar, expresso em porcentagem de massa, obtido por meio de análise elementar (CHN);

m_C *(%)* = teor de carbono orgânico no biochar, expresso em porcentagem de massa, também obtido por análise CHN;

Mc = massa molar do carbono, igual a 12 g·mol⁻¹;

MH = massa molar do hidrogênio, igual a 1,0 g·mol⁻¹.

Os coeficientes de regressão *c* e *m* dependem do horizonte temporal (*TH,* fixado em 100 anos na Tabela 1) e da temperatura do solo (*Ts*) da região de aplicação do biochar. Caso o local de uso seja desconhecido, deve-se adotar a temperatura média global padrão de 14,9°C (Puro.earth, 2023). Para essa pesquisa, utilizou-se o valor de 14,9°C, e, consequentemente, os valores de coeficientes utilizados foram de 1,04 e -0,64 para *c* e *m*, respectivamente.

Tabela 1 – Coeficientes de regressão para estimar a estabilidade do biochar para um horizonte de tempo *TH* de 100 anos em várias temperaturas do solo *Ts* (Puro.earth, 2023).

Temperatura do solo	***c***	***m***
5ºC	15,87	17,91
10°C	1.10	-0.59
15°C	1.04	-0.64
20°C	1.01	-0.65
25°C	0.98	-0.66
14,9°C	1.04	-0.64

2.3. Análise de dados

Os dados obtidos foram submetidos à análise de variância (ANOVA) e, quando detectadas diferenças significativas, aplicou-se o teste de Tukey a 95% de probabilidade, para comparar os grupos qualitativos. Essa etapa permitiu identificar as diferenças estatísticas entre as três temperaturas de pirólise avaliadas.

3. Resultados e discussão

A Tabela 2 apresenta as propriedades do biochar onde é possível observar o efeito significativo isolado da temperatura de pirólise sobre a maioria dos parâmetros avaliados.

Tabela 2 – Valores médios do rendimento e das propriedades dos biochars obtidos a partir dos pellets de palha de café

Propriedades do biochar	**Temperatura de pirólise ºC**		
	450	**550**	**650**
Rendimento (%)	36,54 a	32,64 b	31,16 c
Carbono (%)	67,30 c	70,20 b	73,00 a
Hidrogênio (%)	3,08 a	2,22 b	1,41 c
Nitrogênio (%)	1,94 a	1,70 c	1,86 b
Enxofre (%)	0,064 a	0,011 c	0,034 b
Oxigênio (%)	11,75	7,96	5,85
Cinzas (%)	15,87	17,91	17,85
Razão H/C	0,55 a	0,38 b	0,23 c
Razão O/C	0,13 a	00,9 b	0,06 c

Legenda – Médias seguidas pela mesma letra na linha não diferem significativamente entre si pelo teste de Tukey a 95% de probabilidade.

O rendimento gravimétrico dos biochars apresentou uma redução com o aumento da temperatura de pirólise, variando de 36,40% (450°C) para 31,21% (650°C). Essa redução é atribuída à intensa volatilização de compostos orgânicos instáveis, como extrativos e hemiceluloses, que se degradam entre 200°C e 260°C, enquanto a celulose, decompõe-se entre 300°C e 400°C (MUKHERJEE et al., 2021). A lignina, por sua estrutura molecular mais complexa e faixa de decomposição mais ampla (200–700°C), permanece como o principal constituinte residual do biochar em pirólise lenta (SILVA et al., 2020).

O aumento do carbono e a queda de H e O com o aumento da temperatura está atribuído à intensificação das reações de desvolatilização das hemiceluloses, celulose e lignina (SETTER et al., 2020a), refletindo na eliminação de grupos funcionais polares e a quebra de cadeias alifáticas (MORGAN et al., 2025), além da maior aptidão do carbono fixo ao material, favorecendo o sequestro de carbono no solo (KIGGUNDU; SITTAMUKYOTO, 2019).

Essa perda de H e O está diretamente ligada à formação de estruturas aromáticas condensadas. Razões H/C e O/C decrescentes indicam maior grau de aromaticidade e recalcitrância, sendo o principal indicador da estabilidade do carbono frente à degradação microbiana no solo (TOMCZYK et al., 2020). Com isso, observamos que o biochar produzido a 650°C apresenta maior condensação aromática e, portanto, maior potencial de permanência do carbono no solo, enquanto o material a 450°C retém mais grupos funcionais oxigenados. As razões molares hidrogênio/carbono (H/Corg) e oxigênio/carbono (O/C) são os principais indicadores da aromaticidade e recalcitrância do biochar. Para os tratamentos de 90 minutos, observou-se uma queda linear na razão H/Corg: 0,65 (450°C), 0,45 (550°C) e 0,27 (650°C).

Na Tabela 3 são apresentadas as quantidades de dióxido de carbono (CO_2) estocado no solo, expressa em toneladas por tonelada de biomassa utilizada, para cada tratamento avaliado, com base no respectivo rendimento gravimétrico em biochar.

Tabela 3 – Quantidade de CO_2 estocado, por tratamento, de acordo com a equação da certificadora Puro Standard Biochar (Puro.earth, 2022 – Edição V3)

Tratamento	Corg (%)	H (%)	H/Corg (mol/mol)	Temp. (°C)	Solo *c*	*m*	PF	RGCV	tCO_2 estocado/ tBiochar
450°C 90'	57,21	3,08	0,65	14,9	1,04	-0,64	0,64	36,40	0,49
550°C 90'	59,67	2,22	0,45	14,9	1,04	-0,64	0,76	33,04	0,55
650°C 90'	62,05	1,41	0,27	14,9	1,04	-0,64	0,87	31,21	0,62

Legenda – *c* e *m*: Coeficientes de regressão, PF: Fator de permanência do Carbono orgânico no biochar ao longo do tempo, RGCV: Rendimento gravimétrico do biochar.

De acordo com o *European Biochar Certificate* (EBC), um biochar com razão H/Corg inferior a 0,7 é considerado apto para o sequestro de carbono. O tratamento a 650°C destaca-se como de qualidade *premium*, com uma relação H/Corg inferior a 0,4, possuindo uma estrutura molecular altamente condensada e estável. A redução da razão O/C também confirma que o biochar tornou-se menos hidrofílico e mais resistente à oxidação química.

Com base na metodologia *Puro Standard*, o potencial de estocagem de dióxido de carbono equivalente atingiu 0,62 tCO_2 por tonelada de biochar no tratamento a

650°C/90 minutos. Esses dados mostram que o biochar de pellets de palha de café produzido em altas temperaturas é altamente eficaz para a remoção de carbono atmosférico e mitigação de gases de efeito estufa no setor agrícola.

4. Conclusões

Com base na avaliação do biochar produzido a partir de pellets de palha de café sob diferentes temperaturas de pirólise para o tempo fixo de 90 minutos, conclui-se que a produção de biochar a partir da palha de café peletizada é uma alternativa viável e promissora para o sequestro de carbono no solo.

Embora o aumento da temperatura de pirólise reduza o rendimento gravimétrico da biomassa, esse fator é essencial para elevar o grau de carbonização, gerando um material com alta estabilidade, baixa polaridade e grande recalcitrância. Dessa forma, o tratamento conduzido a 650°C com tempo de residência de 90 minutos demonstrou ser a condição ideal, resultando em um biochar de qualidade *premium*, altamente resistente à degradação microbiana e com o maior potencial para a estocagem de carbono a longo prazo.

5. Agradecimentos

À Universidade Federal de Viçosa, especialmente ao Departamento de Engenharia Florestal e ao Laboratório de Painéis e Energia da Madeira. Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) (Processo: 444395/2024-5), à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) (Processo: APQ-05311-24) e à EMBRAPII Fibras Florestais. E por fim, ao Instituto Superior de Agronomia da Universidade de Lisboa pela parceria técnica estabelecida.

6. Referências bibliográficas

American Society for Testing and Materials. (2013). *ASTM D1762 – 84: Standard test method for chemical analysis of wood charcoal*. Philadelphia, USA.

American Society for Testing and Materials. (2020). *ASTM E1131-20: Standard test method for compositional analysis by thermogravimetry*. Philadelphia, USA.

Brum, S. S., et al. (2008). Preparação e caracterização de carvão ativado produzido a partir de resíduos do beneficiamento do café. *Química Nova*, 31, 1048-1052.

Carneiro, A. C. O., et al. (2025). Sustainable production of coffee husk pellets: Applying circular economy in waste management and renewable energy production. *Resources*, 14(2), 26.

Carvalho, A. M. M. L., Pereira, B. L. C., & Souza, M. M. (2013). Produção de pellets de madeira. Em F. Santos, J. Colodette, & J. H. Queiroz (Eds.), *Bioenergia e Biorrefinaria – cana-de-açúcar e espécies florestais*. Viçosa.

Companhia Nacional de Abastecimento. (2025). *Café - Conjuntura mensal – dezembro de 2025*.

Consórcio Pesquisa Café. (2024). *Faturamento do café no Brasil para o ano de 2024*. http://www.consorciopesquisacafe.com.br/index.php/imprensa/noticias/123520240716174831

Costa, J. M. F. N., et al. (2020). Influência da temperatura de pirólise nas emissões gasosas, rendimentos e densidade do carvão vegetal. *Revista Ciência da Madeira - RCM*, 11(1), 53–62.

Deutsches Institut für Normung. (2015). *Solid biofuels - Determination of total content of carbon, hydrogen and nitrogen* (ISO 16948:2015). https://doi.org/10.31030/2244183

Deutsches Institut für Normung. (2016a). *DIN EN ISO 16993:2016-11, Biogene Festbrennstoffe_- Umwandlung von Analysenergebnissen einer Bezugsbasis in Ergebnisse mit anderer Bezugsbasis* (ISO_16993:2016). DIN Media GmbH. https://doi.org/10.31030/2555895

Deutsches Institut für Normung. (2016b). *DIN EN ISO 16994:2016-12, Biogene Festbrennstoffe_- Bestimmung des Gesamtgehaltes an Schwefel und Chlor* (ISO_16994:2016). DIN Media GmbH. https://doi.org/10.31030/2558210

Embrapa. (2025). Receita bruta dos Cafés do Brasil foi estimada em R$ 115,27 bilhões e valor ocupa o quarto lugar no ranking das lavouras. Portal Embrapa. https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/103181347/receita-bruta-dos-cafes-do-brasil-foi-estimada-em-r-11527-bilhoes-e-valor-ocupa-o-quarto-lugar-no-ranking-das-lavouras

European Biochar Certificate. (2022). *Certificado Europeu de Biochar - Diretrizes para uma Produção Sustentável de Biochar* (Versão 10.3). Carbon Standards International. http://european-biochar.org

International Biochar Initiative. (2024). *O que é biochar?*. https://biochar-international.org

Kiggundu, N., & Sittamukyoto, J. (2019). Pryloysis of coffee husks for biochar production. *Journal of Environmental Protection*, 10(12), 1553–1564.

Morgan, H. M., et al. (2025). Preparation of plant carbon from coffee husk: Effect of carbonization conditions on product properties. http://dx.doi.org/10.20944/preprints202505.0118.v1

Mukherjee, A., et al. (2021). Pyrolysis kinetics and activation thermodynamic parameters of exhausted coffee residue and coffee husk using thermogravimetric analysis. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 99(8), 1683–1695.

Oliveira, A. L., et al. (2023). *Caracterização físico-química de biocarvões com potencial para condicionador de solo* (Dissertação de mestrado). Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Baiano.

Oliveira, G. A., et al. (2020). *Avaliação de biochar obtido da borra de café para a construção*

de um sensor eletroquímico para determinação de chumbo (Dissertação de mestrado). Universidade Federal do Paraná.

Puro.earth. (2022). *Puro Standard Biochar Methodology* (Edition 2022 V3). https://puro.earth

Setter, C., et al. (2020a). Energy quality of pellets produced from coffee residue: Characterization of the products obtained via slow pyrolysis. *Industrial Crops and Products*, 154(112731).

Tomczyk, A., Sokołowska, Z., & Boguta, P. (2020). Biochar physicochemical properties: pyrolysis temperature and feedstock kind effects. *Re/Views in Environmental Science and Bio/Technology*, 19(1), 191–215.

Urrego-Yepes, W., et al. (2021). Incorporating the recovered carbon black produced in an industrial-scale waste tire pyrolysis plant into a natural rubber formulation. *Journal of Environmental Management*, 287, 112292.

Van Nguyen, D., et al. (2023). Data on chemical composition of coffee husks and lignin microparticles as their extracted product. *Data in Brief*, 51, 109781.

Yang, Y., et al. (2025). Effects of different biomass types on pellet qualities and processing energy consumption. *Agriculture*, 15(3), 316.

Zhang, H., Xiao, R., Huang, H., & Xiao, G. (2009). Comparison of non-catalytic and catalytic fast pyrolysis of corncob in a fluidized bed reactor. *Bioresource Technology*.

Zhang, Q., Chang, J., Wang, T., & Xu, Y. (2007). *Energy Convers. Manage*.

Zhao, L., et al. (2013). Heterogeneity of biochar properties as a function of feedstock sources and production temperatures. *Journal of Hazardous Materials*, 256–257, 1–9.

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Quantificação do Teor de Taninos Presentes na Casca da Aroeira-do-sertão (*Myracrodruonurundeuva*Allemão)

Jéssica Estéfane Silva Chaves[1]; Maria Eduarda Moura dos Santos[1]; Denys Santos de Souza[1]; José Ricardo Souza da Silva[1]; Maria Luísa de Sales Silva[1]; Jordanna Karolina Aires da Rocha[1]; Elaine Cristina Alves da Silva[1]; Tatiane Kelly Barbosa de Azevedo Carnaval[1]

[1] Universidade Federal do Rio Grande do Norte 01

Resumo: A Caatinga abriga diversas espécies florestais nativas com potencial para o fornecimento de produtos florestais não madeireiros de interesse tecnológico, entre elas a aroeira-do-sertão (*Myracrodruon urundeuva* Allemão), cuja casca é reconhecida como fonte de compostos fenólicos, especialmente taninos condensados. Esses compostos apresentam elevado interesse tecnológico devido às suas propriedades químicas e às diversas possibilidades de aplicação industrial. Nesse contexto, o presente estudo teve como objetivo quantificar os taninos condensados presentes na casca da espécie, visando avaliar seu potencial tecnológico. A casca foi submetida à secagem, moagem e extração aquosa, sendo posteriormente determinados o teor de sólidos totais (TST), o índice de Stiasny (IS) e o teor de taninos condensados (TTC), utilizando metodologia baseada na reação dos taninos com formaldeído. Os resultados indicaram teor médio de sólidos totais de 22,76 ± 1,00%, índice de Stiasny de 94,93 ± 8,18% e teor de taninos condensados de 21,55 ± 1,00%. Os resultados confirmam o elevado potencial químico da casca de *Myracrodruon urundeuva* para aplicações tecnológicas sustentáveis.

Palavras-chave: Compostos Fenólicos; Produtos Florestais Não Madeireiros; Aproveitamento Sustentável.

Quantification of Tannin Content in the Bark of Aroeira-do-Sertão (*Myracrodruonurundeuva*Allemão)

Abstract: The Caatinga harbors several native forest species with potential for the production of non-timber forest products of technological interest, including *Myracrodruonurundeuva*Allemão (aroeira-do-sertão), whose bark is recognized as a source of phenolic compounds, especially condensed tannins. These compounds are of considerable technological interest due to their chemical properties and their diverse potential industrial applications. In this context, the present study aimed to quantify the condensed tannins present in the bark of the species in order to evaluate its technological potential. The bark was subjected to drying, grinding, and aqueous extraction, followed by the determination of total solids content (TST), the Stiasny index (IS), and condensed tannin content (TTC), using a methodology based on the reaction of tannins with formaldehyde. The results showed a mean total solids content of 22.76 ± 1.00%, a Stiasny index of 94.93 ± 8.18%, and a condensed tannin content of 21.55 ± 1.00%. The results confirm the high chemical potential of *Myracrodruonurundeuva* bark for sustainable technological applications.

Keywords: Phenolic Compounds; Non-Timber Forest Products; Sustainable Use.

1. Introdução

A Caatinga é um importante patrimônio natural brasileiro, destacando-se pela elevada biodiversidade e pela ocorrência de espécies vegetais adaptadas às condições do semiárido (Leal et al., 2023). Ocupando aproximadamente 11% do território nacional, esse bioma tem sofrido intensa pressão antrópica, especialmente em decorrência do desmatamento e da conversão da vegetação para diferentes usos da terra, fatores que comprometem a conservação dos ecossistemas e da biodiversidade associada (Oliveira Júnior et al., 2025).

O conhecimento sobre as espécies nativas da Caatinga e seu valor econômico, ecológico e tecnológico, como a aroeira-do-sertão (*Myracrodruonurundeuva*Allemão) é indispensável. Pertencente à família Anacardiaceae, a espécie apresenta ampla distribuição natural no território brasileiro, com ocorrência nos biomas Caatinga, Cerrado, Pantanal e Mata Atlântica, além de elevado potencial para uso comercial (Capo et al., 2022).

A aroeira é reconhecida como uma espécie de importância para o setor florestal devido às propriedades tecnológicas de sua madeira, que apresenta elevada resistência e durabilidade natural, características que ampliam seu potencial de utilização em aplicações de maior valor agregado (Reis et al., 2025). Além do potencial madeireiro, *Myracrodruonurundeuva* também tem sido objeto de estudos em diferentes áreas do conhecimento, incluindo produção, composição química, biologia vegetal e ecologia, evidenciando a diversidade de abordagens científicas relacionadas à espécie (Domingos & Silva, 2020).

Entre as diferentes linhas de pesquisa voltadas à composição química de *Myracrodruonurundeuva*, destacam-se os estudos relacionados aos taninos vegetais. Os taninos são compostos fenólicos amplamente distribuídos em espécies vegetais, sendo encontrados em diferentes estruturas, como folhas, frutos, cascas e raízes (Couto et al., 2021). Na planta, esses compostos desempenham importantes funções fisiológicas, atuando principalmente nos mecanismos de defesa contra herbívoros, microorganismos e diferentes estresses ambientais (Couto et al., 2021). Além de sua importância ecológica, os taninos apresentam elevado interesse tecnológico devido às suas propriedades químicas, sendo amplamente empregados na produção de adesivos para madeira, no curtimento de peles (Chaves et al., 2021) e no tratamento de água (Anjos, 2021).

A determinação do teor desses compostos em espécies florestais constitui uma importante ferramenta para avaliar seu potencial de aproveitamento industrial. Nesse cenário, a entrecasca

de *Myracrodruonurundeuva* tem sido objeto de estudos voltados à quantificação de taninos, contribuindo para a avaliação de seu potencial de aplicação tecnológica (Teles, 2022).

Embora estudos tenham evidenciado a presença de taninos em *Myracrodruonurundeuva*, ainda são limitadas as informações sobre o potencial tanífero da casca da espécie, especialmente considerando sua importância como produto florestal não madeireiro de interesse tecnológico. Nesse contexto, a quantificação desses compostos torna-se fundamental para ampliar o conhecimento sobre sua composição química.

Diante do exposto, o presente trabalho teve como objetivo quantificar o teor de taninos presentes na casca da aroeira-do-sertão (*Myracrodruonurundeuva*Allemão), visando avaliar seu potencial biotecnológico.

2. Material e métodos

Local do Estudo

As coletas foram realizadas na fazenda experimental SAMISA da Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN, localizada nas proximidades do estuário do Rio Ceará-Mirim, em Extremoz/RN, com coordenadas geográficas 5°41'21" S - 35°16'12" W. O clima de Extremoz é tropical chuvoso, classificado como Aw na classificação climática de Köppen-Geiger, com chuvas concentradas entre os meses de fevereiro e setembro. A temperatura média anual da região é de aproximadamente 26,0 °C e a precipitação pluviométrica média anual é de cerca de 1.225 mm (IDEMA, 2013).

O experimento foi realizado no laboratório de produtos florestais não madeireiros, localizado na Escola Agrícola de Jundiaí - Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN, localizado no município de Macaíba/ RN, a aproximadamente 36,8 km da área da coleta.

Foram escolhinhas 05 (cinco) árvores da espécie *Myracrodruonurundeuva*Allemão (aroeira-do-sertão) de forma aleatória em uma área de floresta nativa. As árvores foram escolhidas com seu estado fitossanitário saudável, com ausência de ataque de pragas e doenças.

Foram retiradas amostras de casca do tronco de forma aleatória, sendo coletado partes mais grossas da casca (Figura 1). O material foi cortado em fragmentos menores,

manualmente com as mãos e auxílio de tesouras, que foram secos na casa de vegetação e passados em uma forrageira.



Figura 7. Retirada manual da casca da aroeira-do-sertão.

Foi utilizada uma peneira de 16 “mesh” (1,00 mm) e uma de 60 “mesh” (0,25 mm), onde foi usado o material que ficou retido na peneira de 60 “mesh”. A serragem obtida foi homogeneizada e o teor de umidade (base seca) determinado, para permitir os cálculos em base seca, do teor de taninos presentes em cada amostra.

Após o processo de peneiramento, as substâncias tânicas contidas nos materiais foram extraídas em água destilada. Para isto, foi separada de cada material, três amostras de 25 g de material seco, onde, foram transferidas para balões de fundo chato com capacidade de 500 mL e adicionados 250 mL de água destilada (relação 1:10 p/v), sendo submetidas à fervura, sob refluxo, por duas horas.

As amostras foram postas em duas sequências de extrações, a fim de se retirar a quantidade máxima de extrativos presentes. Após cada extração, o material foi passado em uma peneira de 150 “mesh” (0,105 mm) e em um tecido de flanela, para a retenção de partículas de serragem. O extrato obtido foi homogeneizado e filtrado em funil de vidro sinterizado de porosidade 2.

Posteriormente, foi concentrado para 250 mL pela evaporação da água ao empregar um aparelho tipo Soxhlet. Após a concentração, três alíquotas de 50 mL foram retiradas de cada extrato. Duas alíquotas foram utilizadas para a determinação do teor de taninos condensados

(TTC) e uma foi evaporada em estufa a 103 ± 2 ºC por 48 horas, para a determinação da porcentagem de teor de sólidos totais (TST) (Equação 1).

$$TST\ (\%) = \frac{Mi - Mf}{Mi} * 100 \quad (1)$$

Em que:

TST (%) = Teor de sólidos totais em porcentagem; Mi = Massa seca da amostra em gramas; Mf = Massa do extrato, após a secagem, em gramas.

Para a determinação do teor de taninos condensados (TTC) presente em cada amostra, foi empregado o método de Stiasny, descrito por Guangcheng et al. (1991). Para tanto, em 50 mL do extrato bruto foram adicionados 4 mL de formaldeído (37% m/m) e 1 mL de ácido clorídrico concentrado. Cada mistura foi submetida à fervura sob refluxo por 30 minutos.

Nestas condições, os taninos formam complexos insolúveis que podem ser separados por filtração simples. Para este caso, foi empregado filtro de papel posto em funil de Büchner de 10 cm de diâmetro e 4 cm de profundidade. O material retido no filtro foi seco em estufa a 103 ± 2 ºC por 24 horas, em seguida foi calculado o índice de Stiasny (Equação 2).

$$I\ (\%) = (M2 / M1) * 100 \quad (2)$$

Em que:

I (%) = Índice de Stiasny em porcentagem; M1 = Massa de sólidos em 50 mL de extrato; M2 = Massa do precipitado taninos – formaldeido.

A quantidade de taninos presente em cada amostra foi obtida ao multiplicar o índice de Stiasny pelo teor de sólidos totais (Equação 3). O teor de não taninos foi obtido pela diferença entre o teor de sólidos totais e o teor de taninos condensados obtido de cada amostra.

$$TTC\ (\%) = TST * I / 100 \quad (3)$$

Em que:

TTC (%) = Teor de taninos condensados em porcentagem; TST = Teor de sólidos totais; I = Índice de Stiasny.

Avaliação dos resultados

Para a avaliação dos resultados foi utilizado um delineamento inteiramente casualisado, onde as análises estatísticas foram processadas por meio do Sistema de Análises Estatísticas e Genéticas (SAEG), desenvolvido pela Central de Processamentos de Dados da Universidade Federal de Viçosa, sendo analisados o teor de sólidos totais (TST), índice de Stiasny, teor de taninos condensados (TTC) e de não taninos na casca da planta. Por se tratar de dados em porcentagens, os valores foram transformados em arcsen [raiz quadrada (valores em porcentagem/100)]. Esta transformação, sugerida por Steel e Torrie (1980), é necessária para homogeneizar as variâncias e permitir a análise dos dados.

3. Resultados e discussão

A casca de *Myracrodruonurundeuva* apresentou teor médio de sólidos totais (TST) de 22,76 ± 1,00%, índice de Stiasny (IS) de 94,93 ± 8,18% e teor de taninos condensados (TTC) de 21,55 ± 1,00%, evidenciando elevado potencial para obtenção de compostos fenólicos de interesse biotecnológico, como indicado na Tabela 1 abaixo.

Tabela 8: Valores médios do teor de sólidos totais (TST), índice de Stiasny (I) e teor de taninos condensados (TTC) da casca da aroeira-do-sertão (Myracrodruon urundeuva Allemão)

Amostras	TST %	I %	TTC %
1	21,89	103,7	22,7
2	23,86	87,39	20,85
3	22,53	96,69	21,11
Média	22,76 (±1,0)	94,93 (±8,18)	21,55 (±1,0)

O elevado índice de Stiasny evidencia que a maior parte dos compostos fenólicos presentes no extrato corresponde a taninos condensados reativos ao formaldeído, característica desejável para aplicações tecnológicas, especialmente na produção de adesivos naturais e outros produtos de base florestal (Guangcheng et al., 1991; Pizzi, 2003).

Silva (2018) também investigou a composição química de *Myracrodruon urundeuva*, identificando 42 compostos no extrato vegetal e obtendo teor de fenóis totais de 387,49 ± 15,09 mg EAG/g de extrato etanólico bruto. Embora tenham sido empregados parâmetros analíticos e unidades distintos dos utilizados no presente estudo, os resultados evidenciam a presença de compostos fenólicos na espécie e podem ser relacionados ao potencial químico observado para a casca de *M. urundeuva*.

O teor de taninos condensados obtido neste estudo foi superior ao observado para a casca da espécie *Mimosa tenuiflora* (15,5%), relatado por Calegari et al. (2016), espécie amplamente reconhecida pelo elevado potencial tanífero e frequentemente utilizada como matéria-prima para obtenção de extratos vegetais. Esse resultado demonstra que a casca de *M. urundeuva* apresenta elevada concentração desses metabólitos, reforçando seu potencial químico como fonte de compostos fenólicos.

Resultados semelhantes também foram observados por Medeiros (2015), que, empregando a mesma metodologia baseada no método de Guangcheng et al. (1991), encontrou teores de taninos condensados de 32,6% para *Acacia mearnsii*, 26,2% para *Mimosa tenuiflora* e

20,3% para *Anadenanthera colubrina*. Embora *A. mearnsii* e *M. tenuiflora* apresentem maiores concentrações de taninos condensados, a casca de *M. urundeuva* apresentou teor superior ao registrado para *A. colubrina*, evidenciando desempenho comparável ao de espécies reconhecidas pelo elevado potencial tanífero.

Marques et al. (2021), avaliando diferentes espécies florestais, também verificaram elevado índice de Stiasny para *Acacia mangium* e *Mimosa caesalpiniifolia*, indicando predominância de taninos condensados nos extratos vegetais. Os autores destacam que valores elevados desse índice refletem maior proporção de compostos fenólicos condensados, especialmente na produção de adesivos à base de taninos. Os elevados valores obtidos para *M. urundeuva* corroboram essa interpretação e reforçam a qualidade química dos extratos produzidos.

Os resultados obtidos evidenciam seu elevado potencial químico como fonte natural de taninos condensados. Dessa forma, o presente estudo contribui para ampliar o conhecimento sobre a composição fenólica da espécie, fornecendo subsídios para pesquisas voltadas ao aproveitamento sustentável de seus metabólitos, à conservação da biodiversidade e ao desenvolvimento de alternativas tecnológicas baseadas em compostos naturais.

4. Conclusões

A casca de *Myracrodruonurundeuva* apresenta elevado potencial como fonte de taninos condensados, evidenciando a presença de compostos fenólicos de interesse biotecnológico.

5. Agradecimentos

Os autores agradecem à Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), à Escola Agrícola de Jundiaí (EAJ/UFRN) e ao Laboratório de Produtos Florestais Não Madeireiros (LAPFLONM) pelo suporte técnico e infraestrutura disponibilizados para a realização deste estudo. Agradecem, ainda, à orientadora pelo acompanhamento científico e pelas contribuições ao desenvolvimento da pesquisa.

6. Referências bibliográficas

Anjos, B. F. D. (2021). Produção de agentes coagulantes para clarificação da água a partir de taninos de espécies florestais da Caatinga (Dissertação de mestrado). Universidade Federal do Rio Grande do Norte.

Calegari, L., Haselein, C. R., Hillig, É., Santini, E. J., Gatto, D. A., & Trevisan, R. (2016). Potencial de taninos vegetais de cascas de espécies florestais para produção de adesivos. *Ciência Florestal*, *26*(2), 691–702.

Capo, L. F. M., Moraes, M. L. T., Zulian, D. F., Wrege, M. S., Portela, R. M., Cambuim, J., Silva, A. M., Soares, M. T. S., Sousa, V. A., & Aguiar, A. V. (2022). Distribuição natural de *Myracrodruonurundeuva* Fr. All. no Brasil em cenários climáticos atuais e futuros devido a mudanças climáticas globais. *Revista Árvore*, *46*, e460009.https://doi.org/10.1590/1806-908820220000009https://doi.org/10.1590/1806-908820220000009

Chaves, I. L. S., Gonçalves, F. G., Brito, A. S., Paes, J. B., Lelis, R. C. C., Lopez, Y. M., Jesus, F. Q., Dambroz, G. B. V., &Fantuzzi Neto, H. (2021). Taninos vegetais: Qualidade e rendimento são influenciados pelo ambiente? Em M. G. da Silva Santos (Org.), *Sistemas integrados de produção: Pesquisa e desenvolvimento de tecnologias* (pp. 33–52). Editora Científica Digital.https://doi.org/10.37885/210605031https://doi.org/10.37885/210605031

Couto, L. C., Scárdua, F. P., Cordeiro, S. A., Rodrigues, C. C., et al. (2021). *Taninos vegetais ou polifenóis*. Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri.

Domingos, F. R., & Silva, M. A. P. (2020). Uso, conhecimento e conservação de *Myracrodruonurundeuva*: Uma revisão sistemática. *Research, Society and Development*, *9*(11), e2329118851.https://doi.org/10.33448/rsd-v9i11.8851https://doi.org/10.33448/rsd-v9i11.8851

Guangcheng, Z., Yunlu, L., & Yazaki, Y. (1991). Extractive yields, Stiasny values and polyflavanoid contents in barks from six *Acacia* species in Australia. *Australian Forestry*, *54*(2), 154–156.

Instituto de Desenvolvimento Sustentável e Meio Ambiente do Rio Grande do Norte. (2013). *Perfil do seu município: Extremoz*. Governo do Estado do Rio Grande do Norte.http://adcon.rn.gov.br/ACERVO/idema/DOC/DOC000000000016680.PDFhttp://adcon.rn.gov.br/ACERVO/idema/DOC/DOC000000000016680.PDF

Leal, I. R., Tabarelli, M., & Silva, J. M. C. (2023). A Caatinga: Um bioma exclusivamente brasileiro. *Ciência e Cultura*, *75*(4), 28–33.

Marques, S. S., Carnaval, T. K. A., Paes, J. B., Vieira, M. C., & Moulin, J. C. (2021). Tannin content and antioxidant activity of barks from forest species grown in the Brazilian semiarid region. *Floresta e Ambiente, 28*(4), e20200094.

Medeiros, J. X. (2015). *Potencial tanífero de espécies florestais da Caatinga para produção de adesivos naturais* (Dissertação de mestrado). Universidade Federal do Rio Grande do Norte.

Oliveira Junior, I., Santos, N. A., Pereira, A. J., & Souza, R. C. (2025). Desmatamento na Caatinga: Espacialização, fatores e implicações da deterioração da vegetação. *Revista do Departamento de Geografia, 45*, e225656.https://doi.org/10.11606/eISSN.2236-2878.rdg.2025.225656https://doi.org/10.11606/eISSN.2236-2878.rdg.2025.225656

Pizzi, A. (2003). Tannins. In A. Pizzi& K. L. Mittal (Eds.), *Handbook of adhesive technology* (2nd ed., pp. 573–582). Marcel Dekker.

Reis, G. M. F., Marchesan, R., Silva, M. A., Saraiva, K. F., Moraes, T. P. E., Fortes, R. A., Carvalho, A. G., Lima, V. O., & Santos, A. F. (2025). Durabilidade natural da madeira de *Myracrodruonurundeuva* Fr. All. *Ciência Florestal, 35*, e87970.https://doi.org/10.5902/1980509887970https://doi.org/10.5902/1980509887970

Silva, D. P. D. (2018). *Caracterização de compostos fenólicos por espectrometria de massas e potencial antioxidante das cascas de Myracrodruon urundeuva (aroeira-do-sertão) do Cariri Paraibano* (Dissertação de mestrado). Universidade Federal da Paraíba.

Teles, J. S. (2022). *Quantificação dos teores de taninos por espectrofotometria no visível do extrato, elixir e entrecasca triturada de aroeira-do-sertão (Myracrodruonurundeuva)* (Trabalho de Conclusão de Curso). Universidade Federal do Ceará.

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Quantificação e caracterização por FTIR de taninos da casca de *Mimosa tenuiflora*: Efeito do espaçamento

Rodolpho Stephan Santos Braga[1]; Glaucileide Ferreira[1]; Nédia Pereira Correia Mendes Correia[1;] Kamilla Crysllayne Alves da Silva[3]; Felipe da Silva Gomes[1]; Juliana Lorensi do Canto[2]; Tatiane Kelly Barbosa de Azevêdo[2;] Juarez Benigno Paes[1]

[1] Universidade Federal do Espírito Santo (UFES)
[2] Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN)
[3] Universidade de São Paulo (USP)

Resumo: A *Mimosa tenuiflora* destaca-se devido ao elevado teor de taninos condensados presentes em sua casca. Este estudo avaliou o efeito de espaçamentos de plantio (2 × 2 m e 3 × 3 m), sobre o rendimento e a caracterização química dos taninos condensados da casca. Determinaram-se o teor de sólidos totais, o índice de Stiasny, o teor de taninos condensados e o teor de não taninos. A caracterização química foi realizada por FTIR. O espaçamento de 3×3 m apresentou maiores teores de sólidos totais (19,96%) e de taninos condensados (17,67%), correspondendo a incremento de aproximadamente 29,2% em relação ao espaçamento de 2×2 m. Os espectros de FTIR evidenciaram bandas características de taninos condensados em ambos os tratamentos, indicando manutenção da estrutura química dos compostos extraídos. Conclui-se que o maior espaçamento de plantio favorece o rendimento de taninos condensados, entretanto, o espaçamento não altera sua composição química fundamental, demonstrando o potencial de plantios destinados à produção industrial.

Palavras-chave: Compostos fenólicos; Grupos funcionais; Biorrefinaria

Quantification and FTIR characterization of tannins from *Mimosa tenuiflora* bark: Effect of spacing

Abstract: *Mimosa tenuiflora* stands out due to the high content of condensed tannins in its bark. This study evaluated the effect of planting spacing (2 × 2 m and 3 × 3 m) on the yield and chemical characterization of bark condensed tannins. Total solids content, Stiasny number, condensed tannin content, and non-tannin content were determined. Chemical characterization was performed using FTIR. The 3×3 m spacing showed higher levels of total solids (19.96%) and condensed tannins (17.67%), representing an increase of approximately 29.2% compared to the 2×2 m spacing. FTIR spectra revealed bands characteristic of condensed tannins in both treatments, indicating the preservation of the chemical structure of the extracted compounds. It is concluded that wider planting spacing favors the yield of condensed tannins; however, the spacing does not alter their fundamental chemical composition, demonstrating the potential of plantations intended for industrial production.

Keywords: Phenolic compunds; Functional groups; Biorefining

1. Introdução

Os taninos vegetais destacam-se como compostos renováveis, sustentáveis e de baixo impacto ambiental, apresentando elevado potencial para diversas aplicações industriais. Esses compostos polifenólicos pertencem a uma ampla classe de metabólitos secundários e são, geralmente, armazenados nos vacúolos das células vegetais na forma de ésteres ou glicosídeos (Fraga-Corral et al., 2020).

Os taninos são classificados em hidrolisáveis e condensados, sendo os taninos condensados são os mais abundantes na casca de diversas espécies vegetais (Zhang et al., 2022). Sua ocorrência é amplamente distribuída em árvores gimnospermas e angiospermas, estando presentes em diferentes partes, como raízes, troncos, folhas e frutos (Paes et al., 2006). Entretanto, em grande parte das espécies arbóreas, as maiores concentrações são encontradas na casca, tornando esse tecido a principal matéria-prima empregada na produção industrial de taninos (Ucella-Filho et al., 2022).

A composição química e o teor de taninos são influenciados por diversos fatores, como idade da planta, condições edafoclimáticas, época de coleta, espécie e até mesmo variações intraespecíficas, refletindo diretamente na concentração de taninos condensados (Azevêdo et al., 2017; Silva et al., 2025b; Gomes et al., 2025). Apesar desses avanços, ainda são escassos os estudos que investigam, de forma aprofundada, como práticas silviculturais, especialmente o espaçamento de plantio, influenciam a composição química e a estrutura molecular dos taninos em espécies florestais nativas, logo, essa lacuna limita a compreensão da variabilidade química desses compostos.

Nesse contexto, a espécie *Mimosa tenuiflora* (Willd.) Poir., pertencente à família Fabaceae, é uma espécie pioneira e destaca-se por sua ampla distribuição no bioma Caatinga e elevada adaptação às condições edafoclimáticas do semiárido brasileiro (Santos et al., 2022). Estudos recentes demonstram que sua casca apresenta elevado potencial para produção de taninos condensados (Gomes et al., 2025; Silva et al., 2026), além de possuir reconhecida importância ecológica, econômica e social, sendo amplamente utilizada em sistemas produtivos da região semiárida (Silva et al., 2025a).

Para melhor caracterização química desses compostos, a espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier (FTIR) destaca-se como um método rápido e confiável. Além do baixo custo operacional e da facilidade de execução, a técnica permite identificar grupos funcionais e detectar alterações estruturais nos compostos fenólicos, fornecendo informações químicas detalhadas (Ricci et al., 2015; Tondi, 2017).

Diante desse contexto, o presente estudo teve como objetivo quantificar e caracterizar quimicamente, por meio da espectroscopia FTIR, os taninos extraídos da casca de *Mimosa tenuiflora* (Willd.) Poir. cultivada sob dois diferentes espaçamentos de plantio (2 × 2 m e 3 × 3 m). Espera-se que os resultados contribuam para ampliar o conhecimento sobre a variabilidade química dos taninos da espécie e subsidiem estratégias para otimizar seu aproveitamento tecnológico e industrial, promovendo a valorização comercial da casca de *Mimosa tenuiflora*.

2. Material e métodos

a. Coleta do material

O material foi obtido a partir da coleta de 10 árvores de *Mimosa tenuiflora*, em Abril de 2026 com aproximadamente 13 anos de idade e em boas condições fitossanitárias, localizadas em uma plantação florestal da Unidade Acadêmica Especializada em Ciências Agrárias – Escola Agrícola de Jundiaí, localizada no município de Macaíba, Rio Grande do Norte, Brasil – 5°51’30” S e 35°21’14” O. Foram abatidas 5 árvores para cada espaçamento presente no plantio (2 × 2 m e 3 × 3 m), após o abate, as árvores foram seccionadas em toras de 1 metro, sendo utilizado o critério de 3 cm de diâmetro mínimo para aproveitamento madeireiro, em seguida as toras foram descascadas e as cascas armazenadas em sacos de ráfia de acordo com cada árvore e o espaçamento.

Para a densidade de plantio (árvores/hectare), foi considero o estudo realizado por Canto, Rodrigues, e Santana (2025), por se tratar do mesmo plantio em que foi coletado o material e onde foi levado em consideração a porcentagem de sobrevivência, sendo de 95,2% para 2 × 2 m e 98,3% para 3 × 3 m. O preparo do solo para plantio, adubação, irrigação, controle de pragas e tratos culturais também foram descritos anteriormente pelos autores.

O clima local, de acordo com a classificação de Köppen, é caracterizado como tropical chuvoso (transição entre os tipos As e BSw), apresentando estação chuvosa no outono e inverno, com temperatura média de 27 °C, máxima de 32 °C e mínima de 21 °C, umidade relativa média anual de 76% e precipitação variando entre 863,7 e 1.070,7 mm (Alvares et al., 2014).

b. Quantificação dos taninos vegetais

Para analisar o teor de taninos, as cascas de cada espaçamento foram secas ao ar em casa de vegetação durante 2 semanas e posteriormente, reduzidas a fragmentos menores, com o

auxílio de um triturador forrageiro elétrico, em seguida, foram moídas em moinho tipo Willey para obtenção de um material de menor granulometria. A fração utilizada nas análises correspondeu ao material que passou pela peneira de 32 mesh e ficou retido na peneira de 60 mesh. Posteriormente, o material foi homogeneizado e o teor de umidade determinado, em base seca, para permitir os cálculos do teor de taninos presente em cada amostra.

Para a quantificação dos taninos foram utilizadas três amostras secas de 25 g. As amostras foram transferidas para balões de fundo chato com capacidade de 500 mL, aos quais foram adicionados 250 mL de água destilada, e submetidas à fervura sob refluxo, por duas horas. Cada amostra foi submetida a duas sequências de extrações, a fim de se retirar a máxima quantidade de extrativos presentes.

Após cada extração, o material foi passado em peneira de 0,105 mm para retenção de partículas finas. O extrato obtido foi homogeneizado e filtrado em funil de vidro sinterizado de porosidade 2. Em seguida, concentrado para 250 mL pela evaporação da água. Três alíquotas de 50 mL foram retiradas de cada extrato, onde duas foram utilizadas para a determinação do Teor de Taninos Condensados (TTC) e uma foi evaporada em estufa a 103 ± 2 ºC por 48 horas, para a determinação da porcentagem de Teor de Sólidos Totais (TST).

Para a determinação do teor de taninos condensados (TTC), presente em cada amostra, foi empregado o método de Stiasny, descrito por Guangcheng et al. (1991). Sendo assim, aos 50 mL do extrato bruto foram adicionados 4 mL de formaldeído e 1 mL de HCl concentrado, sendo a mistura submetida à fervura sob refluxo por 30 minutos. Após esse processo, os taninos foram separados por filtração simples, utilizando funil e papel de filtro. O material retido no filtro foi seco em estufa à 103 ± 2 ºC por 24 horas, para a obtenção e o cálculo do Índice de Stiasny. A quantidade de taninos presente em cada amostra foi obtida ao multiplicar o índice de Stiasny pelo Teor de Sólidos Totais e o teor de não taninos pela diferença entre o TST e TTC.

c. Caracterização química dos taninos vegetais

Os taninos foram caracterizados quimicamente por Espectroscopia de Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR). A caracterização foi realizada no equipamento Bruker ALPHA II, utilizando uma faixa de varredura de 4.000 a 400 cm^{-1}, onde cada espectro será adquirido com 32 varreduras e resolução de 4 cm^{-1}. Em seguida, foi medida a transmitância das amostras de taninos condensados.

d. Análise estatística

O estudo consistiu em Delineamento Inteiramente Casualizado (DIC), envolvendo a *Mimosa tenuiflora* sob dois diferentes espaçamentos de plantio e foram realizadas três repetições (2 × 3) para cada extração, totalizando 6 repetições no total. Os dados foram analisados estatisticamente no programa R. versão 4.4.2, ao realizarem a estatística descritiva e análise de variância (R Core Team, 2024). Para tanto os pressupostos de normalidade da distribuição dos dados (Shapiro-Wilk, $p < 0,05$) e homogeneidade de variâncias (Bartlett, $p < 0,05$) foram checados. Na sequência, utilizou-se teste de Tukey ($p > 0,05$) para agrupamento das médias.

3. Resultados e discussão

O espaçamento de plantio 3 × 3 m (1.092 árvores.ha^{-1}) promoveu incremento significativo no teor de sólidos totais (TST) e no teor de taninos condensados (TTC) em comparação ao espaçamento de 2 × 2 m (2.380 árvores.ha^{-1}), evidenciando maior capacidade de extração de compostos fenólicos da casca de *Mimosa tenuiflora*. Em contrapartida, o índice de Stiasny (IS) e o teor de não taninos (TNT) não diferiram significativamente entre os tratamentos. Esses resultados sugerem que a menor densidade de plantio favoreceu a produção de compostos fenólicos, logo, o aumento do rendimento ocorreu sem comprometer a pureza ou a reatividade dos taninos condensados extraídos em função do espaçamento de plantio (Tabela 1).

Tabela 1 – Teor de sólidos totais (%), índice de Stiasny (%), teor de taninos condensados (%), teor de não taninos (%) e densidade de árvores por hectare (árv.ha^{-1}), presentes nas cascas de *Mimosa tenuiflora* em diferentes espaçamentos de plantio.

Plantio	2 × 2 m	3 × 3 m	Incremento (%)
Teor de sólidos totais (%)	16,23±1,52 b	19,96±0,46 a	+22,98
Índice de Stiasny (%)	84,48±3,22	88,55±1,03	+4,82
Teor de taninos condensados(%)	13,68±0,75 b	17,67±0,40 a	+29,17
Teor de não taninos (%)	2,55±0,79	2,29±0,23	-10,20
Densidade (árv.ha^{-1})	2380	1092	-54,12

As médias seguidas de letra minúscula, na mesma linha, não diferem entre si (Tukey, $P > 0,05$).

Os valores médios de sólidos totais de 16,23% e 19,96% encontrado no presente estudo (para idade de até 13 anos) está próximo aos relatados por Gomes et al. (2025) (19,38% e 16,25%) para os plantios com 6 anos e 7 anos, respectivamente, os autores observaram que a idade da planta influencia no teor de sólidos totais, assim como no teor de taninos condensados. Além disso, os teores de taninos condensados observados por Azevêdo et al. (2017) (17,60% e 16,04% para coleta em agosto) e Silva et al. (2026) (13,56%) estão em consonância ao estimado neste estudo.

Observa-se na Tabela 1 que a redução da densidade de plantio de 2.380 para 1.092 árvores.ha^{-1} foi acompanhada por um aumento de 22,98% no teor de sólidos totais e 29,17% no teor de taninos condensados, demonstrando que o maior espaçamento favoreceu a síntese ou o acúmulo de compostos fenólicos na casca.

Esse comportamento pode estar relacionado à menor competição entre plantas por luz, água e nutrientes em espaçamentos mais amplos, favorecendo maior disponibilidade de fotoassimilados para o metabolismo secundário. Esse resultado é consistente com a Hipótese do Balanço Carbono–Nutrientes (Carbon–Nutrient Balance Hypothesis – CNBH), segundo a qual a disponibilidade relativa de carbono e nutrientes influencia a alocação de recursos para a síntese de compostos secundários, como taninos (Bryant et al., 1983). Em condições de menor limitação por recursos, o excedente de carbono pode ser direcionado à produção de compostos fenólicos.

Da mesma forma, a Hipótese do Equilíbrio Crescimento–Diferenciação (Growth–Differentiation Balance Hypothesis – GDBH) propõe que, quando as condições ambientais reduzem a necessidade de priorização exclusiva do crescimento, parte dos recursos assimilados pode ser destinada aos processos de diferenciação, incluindo a biossíntese de metabólitos secundários relacionados à defesa vegetal. Assim, alterações na densidade de plantio podem modificar o balanço entre crescimento e diferenciação, refletindo diretamente na quantidade de compostos fenólicos acumulados nos tecidos vegetais (Herms & Mattson, 1992). Contudo, essas hipóteses fornecem um arcabouço teórico para interpretar os resultados, não sendo possível confirmar, apenas com os dados deste estudo, que o aumento da produção de taninos decorreu diretamente desses mecanismos fisiológicos.

Os espectros de FTIR indicam a estrutura química dos extratos em pó à base de taninos de *Mimosa tenuiflora*. (Figura 1). Segundo Tondi, (2017), a faixa de 1800–600 cm^{-1} é a região mais importante para os taninos. Os espectros de FTIR evidenciaram bandas

características de taninos condensados em ambos os tratamentos, destacando-se as vibrações atribuídas às hidroxilas fenólicas (~3225 cm^{-1}), ao estiramento C=C do anel aromático (1604 e 1508 cm^{-1}) e às ligações C–O fenólicas (1307–1023 cm^{-1}). Essas bandas são amplamente descritas para taninos condensados, indicando que os compostos extraídos mantiveram sua estrutura química entre tratamentos. Bem como, a estrutura encontrada está semelhante a trabalhos realizados anteriormente ao analisar taninos condensados de *Mimosa tenuiflora* (Marques et al., 2021; Lopes et al., 2021; Silva et al., 2026).

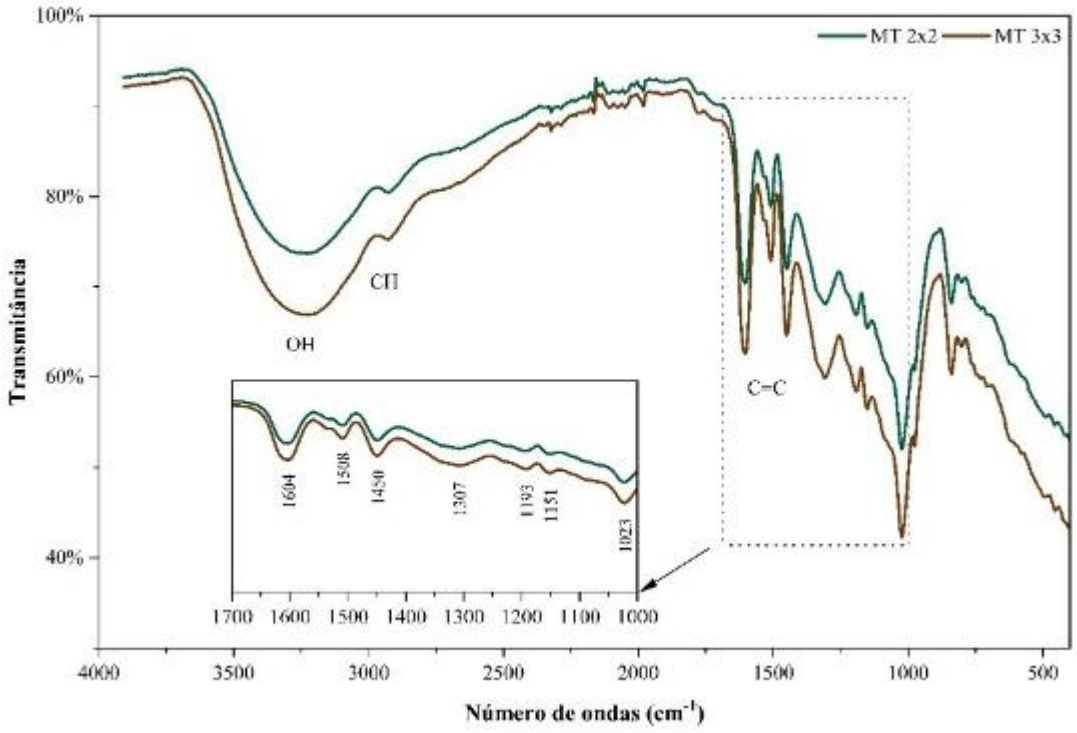


Figura 1 – Espectros de FTIR dos extratos em pó à base de taninos de *Mimosa tenuiflora*.

A elevada similaridade entre os espectros de FTIR dos extratos obtidos nos dois espaçamentos (Figura 1) evidencia que o espaçamento de plantio não promoveu alterações na estrutura química fundamental dos taninos extraídos (Tabela 2). Entretanto, observou-se maior intensidade relativa das bandas associadas ao esqueleto aromático e aos grupos fenólicos no extrato proveniente do espaçamento 3 × 3 m, resultado que sugere maior teor de taninos condensados determinado pelo índice de Stiasny. Esses resultados indicam que o aumento do espaçamento influenciou principalmente a proporção relativa dos compostos fenólicos extraídos, sem modificar as classes de metabólitos secundários detectáveis por FTIR. Assim, o espaçamento de 3 × 3 m mostrou-se tão eficiente para a produção de taninos

vegetais quanto o espaçamento 2 × 2 m, evidenciando o potencial de ambos para o manejo de plantios destinados à obtenção de extratos tânicos para aplicações industriais.

Tabela 2 - Espectros de FTIR dos extratos em pó à base de taninos de *Mimosa tenuiflora*.

Picos (cm^{-1})		Eventos
MT 2 × 2 m	MT 3 × 3 m	
3,229	3,224	Estiramento O–H em ligações de hidrogênio.
2,928	-	Vibração de estiramento C-H em grupos metoxila aromáticos e em grupos metila e metileno de cadeias laterais.
1,604	1,603	Vibrações de estiramento C=C de ligações aromáticas.
1,508	1,508	Vibrações de estiramento C=C de ligações aromáticas.
1,449	1,450	Movimentos vibracionais de grupos C=C em anéis aromáticos, flexão C-H aromática, estiramento C-O e deformação C-OH.
1,307	1,307	Estiramento (C–O) de grupos fenólicos e flavonoides.
1,193	1,191	Estiramento assimétrico C–O–C e C–O em grupos fenólicos.
1,150	1,151	Alongamento da ligação C-O no anel piranosídico dos taninos e vibrações de estiramento C-OH.
1,023	1,023	Estiramento C–O associado a álcoois primários, grupos fenólicos e ligações C–O–C dos flavonoides.
975	975	Deformação fora do plano de C–H aromático.
839	839	Deformação fora do plano de C–H aromático.

4. Conclusões

O espaçamento de plantio influenciou os teores de sólidos totais e de taninos condensados, com maiores valores observados no espaçamento de 3 × 3 m. Entretanto, o índice de Stiasny não diferiu entre os espaçamentos, indicando que a reatividade dos taninos foi mantida independentemente do espaçamento adotado. A análise por FTIR demonstrou que, apesar das diferenças quantitativas observadas entre os espaçamentos, não ocorreram alterações relevantes na estrutura química dos taninos condensados. Embora o espaçamento de 3 × 3 m tenha apresentado maior rendimento de taninos por árvore, o espaçamento de 2 × 2 m apresenta maior densidade de plantas por unidade de área, podendo compensar o menor rendimento individual. Dessa forma, ambos os espaçamentos apresentam potencial para a produção de taninos condensados, sendo a escolha do espaçamento dependente do objetivo produtivo e do sistema de manejo adotado.

5. Agradecimentos

À Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação do Espírito Santo (FAPES), à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pelo apoio à pesquisa.

6. Referências bibliográficas

Alvares, C. A., Stape, J. L., Sentelhas, P. C., Gonçalves, J. L. M., & Sparovek, G. (2014). Köppen's climate classification map for Brazil. Meteorologische Zeitschrift, 22(6), 711–728. https://doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507

Azevêdo, T. K. B., Paes, J. B., Calegari, L., & Santana, G. M. (2017). Teor de taninos condensados presente na casca de jurema-preta (*Mimosa tenuiflora*) em função das fenofases. Floresta e Ambiente, 24, e00026613. https://doi.org/10.1590/2179-8087.026613

Bryant, J. P., Chapin, F. S., III, & Klein, D. R. (1983). Carbon/nutrient balance of boreal plants in relation to vertebrate herbivory. Oikos, 40(3), 357–368. https://doi.org/10.2307/3544308

Canto, J. L., Rodrigues, A. A. M., & Santana, J. A. S. (2025). Crescimento e produtividade da *Mimosa tenuiflora* (Willd.) Poiret (jurema-preta) em plantio homogêneo com diferentes espaçamentos. In E. C. A. Silva, T. K. B. Azevêdo, A. S. Pimenta, J. L. Canto, & J. G. M. Ucella Filho (Eds.), *Mimosa tenuiflora* (Willd.) Poir.: Uma espécie estratégica para o desenvolvimento sustentável da Caatinga (pp. 19–29). Editora Science.

Fraga-Corral, M., García-Oliveira, P., Pereira, A. G., Lourenço-Lopes, C., Jimenez-Lopez, C., Prieto, M. A., & Simal-Gandara, J. (2020). Technological application of tannin-based extracts. Molecules, 25(3), 614. https://doi.org/10.3390/molecules25030614

Gomes, J. P. S., Azevêdo, T. K. B., Silva, B. R. F., Ucella Filho, J. G. M., Moraes, C. R. A., Souza, D. S., Paiva, K. L. B., Nascimento, P. E. P., Canto, J. L., & Silva, E. C. A. (2025). A idade da *Mimosa tenuiflora* influencia na concentração de taninos condensados? In E. C. A. Silva, T. K. B. Azevêdo, A. S. Pimenta, J. L. Canto, & J. G. M. Ucella Filho (Eds.), *Mimosa tenuiflora* (Willd.) Poir.: Uma espécie estratégica para o desenvolvimento sustentável da Caatinga (pp. 46–56). Editora Science.

Guangcheng, Z., Yunlu, L., & Yazaki, Y. (1991). Extractive yields, Stiasny values and polyflavonoid contents in barks from six Acacia species in Australia. Australian Forestry, 54(2), 154–156. https://doi.org/10.1080/00049158.1991.10674572

Herms, D. A., & Mattson, W. J. (1992). The dilemma of plants: To grow or defend. The Quarterly Review of Biology, 67(3), 283–335. https://www.jstor.org/stable/2830650

Lopes, P. J. G., Calegari, L., Silva, W. A. M., Gatto, D. A., Medeiros Neto, P. N., Melo, R. R., Bakke, I. A., Delucis, R. A., & Missio, A. L. (2021). Tannin-based extracts of *Mimosa tenuiflora* bark: Features and prospecting as wood adhesives. Applied Adhesion Science, 9(3). https://doi.org/10.1186/s40563-021-00133-y

Marques, S. R. R., Azevêdo, T. K. B., Castilho, A. R. F., Braga, R. M., & Pimenta, A. S. (2021). Extraction, quantification, and FTIR characterization of bark tannins of four forest species grown in Northeast Brazil. Revista Árvore, 45, e4541. https://doi.org/10.1590/1806-908820210000041

Paes, J. B., Diniz, C. E. F., Marinho, I. V., & Lima, C. R. (2006). Avaliação do potencial tanífero de seis espécies florestais de ocorrência no Semiárido brasileiro. Cerne, 12, 232–238.

R Core Team. (2024). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing. https://www.R-project.org/

Ricci, A., Olejar, K. J., Parpinello, G. P., Kilmartin, P. A., & Versari, A. (2015). Application of Fourier transform infrared (FTIR) spectroscopy in the characterization of tannins. Applied Spectroscopy Reviews, 50(5), 407–442. https://doi.org/10.1080/05704928.2014.1000461

Santos, R. F., Santos, A. P., Oliveira, L. B., & Ferreira, T. C. (2022). Propriedades antimicrobianas de extratos da casca de jurema-preta (*Mimosa tenuiflora* (Willd.) Poir.). Brazilian Journal of Development, 8(3), 16915–16930. https://doi.org/10.34117/bjdv8n3-094

Silva, B. R. F., Ucella-Filho, J. G. M., Lourenço, Y. B. C., Anjos, B. F., Silva, K. C. A., Gomes, J. P. S., Braga, R. M., Azevêdo, T. K. B., & Mori, F. A. (2026). Optimization of turbidity removal in water using chemically modified tannins from Brazilian species. Water Environment Research, 98, e70429. https://doi.org/10.1002/wer.70429

Silva, E. C. A., Azevêdo, T. K. B., Pimenta, A. S., Canto, J. L., & Ucella Filho, J. G. M. (Eds.). (2025a). *Mimosa tenuiflora* (Willd.) Poir.: Uma espécie estratégica para o desenvolvimento sustentável da Caatinga. Editora Science.

Silva, L. C., Nascimento, P. E. P., Paiva, K. L. B., Souza, D. S., Pimenta, A. S., Ucella-Filho, J. G. M., & Azevêdo, T. K. B. (2025b). Quantification and FTIR-based chemical characterization of condensed tannins extracted from the bark of tropical tree species. Revista Árvore, 49, 1–12. https://doi.org/10.53661/1806-9088202549263864

Tondi, G. (2017). Tannin-based copolymer resins: Synthesis and characterization by solid-state 13C NMR and FT-IR spectroscopy. Polymers, 9(6), 223. https://doi.org/10.3390/polym9060223

Ucella-Filho, J. G. M., Freire, A. D. S. M., Carréra, J. C., Lucas, F. M. F., Zucolotto, S. M., Dantas Júnior, A. F., & Mori, F. A. (2022). Tannin-rich bark extract of plants as a source of antimicrobial bioactive compounds: A bibliometric analysis. South African Journal of Botany, 150, 1038–1050. https://doi.org/10.1016/j.sajb.2022.09.018

Zhang, L., Zhang, H., Tang, L., Hu, X., & Xu, M. (2022). Isolation, characterization, antioxidant activity, metal-chelating activity, and protein-precipitating capacity of condensed tannins from plum (*Prunus salicina*) fruit. Antioxidants, 11(4), 714. https://doi.org/10.3390/antiox11040714

Rastreabilidade taxonômico-botânica de espécies madeireiras em concessão florestal na Amazônia

Resumo: A exploração sustentável dos recursos madeireiros na Amazônia depende da correta identificação taxonômica das espécies e da integração entre informações de manejo florestal e bases botânicas especializadas. O estudo avaliou a representatividade taxonômico-botânica de espécies madeireiras comerciais da UPA 23, na concessão florestal da Madeflona, em Rondônia, comparando o potencial explorável indicado no POA com os registros disponíveis no Reflora e no SpeciesLink. Foram analisadas as espécies de maior volume, táxons sem identificação científica confirmada e casos de ambiguidade nomenclatural.Os resultados evidenciaram a concentração do volume explorável em poucas espécies, com destaque para *Dinizia excelsa*, e a predominância de Fabaceae. Também foram observadas divergências entre as bases quanto à ocorrência, sinonímia e correspondência entre nomes comuns e científicos. Conclui-se que a documentação botânica permanece desigual, sendo necessário ampliar a coleta de vouchers, validar nomenclaturas e integrar inventários florestais e herbários para fortalecer a rastreabilidade e o manejo sustentável dos recursos florestais.
Palavras-chave: Concessão florestal; Taxonomia botânica; Rastreabilidade.

Taxonomic-botanical traceability of timber species in a forest concession in the Amazon

Abstract: The sustainable use of timber resources in the Amazon depends on the accurate taxonomic identification of species and the integration of forest management data with specialized botanical databases.The study evaluated the taxonomic and botanical representation of commercially valuable timber species from UPA 23, within the Madeflona forest concession in Rondônia, by comparing the exploitable potential indicated in the POA with the records available in Reflora and SpeciesLink. The species with the highest volumes, taxa lacking confirmed scientific identification, and cases of nomenclatural ambiguity were analyzed. The results revealed that the exploitable volume was concentrated in a few species, particularly *Dinizia excelsa*, as well as a predominance of Fabaceae. Divergences were also observed between the databases regarding species occurrence, synonymy, and the correspondence between common and scientific names. It is concluded that botanical documentation remains uneven, highlighting the need to expand voucher collection, validate nomenclature, and integrate forest inventories with herbaria to strengthen the traceability and sustainable management of forest resources.
Keywords: Forest concession; Botanical taxonomy; Traceability.

1. Introdução

A Floresta Amazônica é essencial à regulação climática, à conservação da biodiversidade e à sustentação socioeconômica regional (Manzatto & Moreira, 2023; Soares et al., 2025). Em Rondônia, o manejo em Florestas Nacionais é estratégico para o setor florestal brasileiro. Seu potencial madeireiro exige manejo sustentável que concilie produção, conservação da diversidade biológica e do patrimônio genético (Palmieri & Batistella, 2022; Manzatto & Moreira, 2023).

Regulamentadas pela Lei de Gestão de Florestas Públicas, as concessões florestais são instrumento de política pública para a exploração legal e sustentável dos recursos florestais da União. Ao delegar o manejo a entes privados sob monitoramento estatal, visam ordenar o território, coibir a grilagem e a exploração predatória e conciliar produção e biodiversidade (Soares & Bezerra, 2021; Palmieri & Batistella, 2022).

O controle da extração em áreas públicas baseia-se nos Planos Operacionais Anuais (POA) e nos relatórios de gestão das concessionárias, registrados em sistemas do IBAMA, como o Sinaflor e o Documento de Origem Florestal (DOF). Esses instrumentos subsidiam rastreabilidade, transporte e comercialização da madeira, mas inconsistências nos registros oficiais demandam a integração das informações em bases regionais robustas e transparentes e o fortalecimento da rastreabilidade botânica das espécies exploradas (Soares & Bezerra, 2021; Palmieri & Batistella, 2022).

A identificação das espécies madeireiras permanece frágil, sobretudo pelo uso de nomes comuns em substituição à nomenclatura científica. Nomes desatualizados, sinonímias não tratadas e o agrupamento de espécies distintas sob a mesma denominação popular produzem redundâncias e discrepâncias entre os cadastros e a diversidade botânica explorada (Andrade et al., 2022). A limitada integração entre exploração florestal e documentação botânica constitui, portanto, uma lacuna que requer consulta a herbários e bases especializadas, como a Flora do Brasil 2020, para confirmar identidades taxonômicas e fortalecer a rastreabilidade e a confiabilidade do manejo (Andrade et al., 2022).

Diante dessa lacuna, este trabalho teve como objetivo analisar a relação entre o potencial de exploração madeireira e a documentação taxonômico-botânica das espécies manejadas na UPA 23 da concessão florestal da Madeflona, em Rondônia, mediante a comparação entre o POA e bases botânicas especializadas.

2. Material e métodos

A pesquisa foi desenvolvida por meio de análise documental, taxonômica e descritiva do Plano Operacional Anual (POA) 16, Unidade de Produção Anual (UPA) 23 (Brasil, 2026) da concessão florestal da Madeflona Industrial Madeireira Ltda., na Floresta Nacional do Jamari, Rondônia. A partir do POA, foram extraídos os dados das espécies selecionadas, incluindo nome comum, nome científico, número de árvores e volume previsto para exploração.

A partir da lista original, foram selecionadas: (i) as cinco espécies com maior volume previsto para exploração; (ii) aquelas identificadas apenas por nomes comuns; e (iii) as que

apresentavam ambiguidades nomenclaturais, incluindo associações entre diferentes nomes vernaculares e um mesmo nome científico.

A validação taxonômica e nomenclatural foi realizada na base Reflora (Flora e Funga do Brasil, 2026), para confirmar os nomes científicos válidos, sinonímias, nomes comuns e ocorrência em Rondônia. Nos casos identificados apenas por nomes vernaculares, foram analisadas as possíveis correspondências taxonômicas retornadas pela base. Posteriormente, os nomes validados foram consultados no SpeciesLink (2026), visando quantificar os registros de coleta em Rondônia e os herbários com material depositado.

Por fim, os dados foram comparados descritivamente quanto à representatividade das espécies, à correspondência entre nomes comuns e científicos, à suficiência dos nomes vernaculares para a identificação, às divergências de ocorrência entre as bases e às possíveis inconsistências taxonômicas. Essa abordagem permitiu avaliar a integração entre Reflora e SpeciesLink e identificar lacunas na documentação botânica das espécies exploradas na concessão.

3. Resultados e discussão

A UPA 23 do POA da Madeflona reúne 88 espécies inventariadas, das quais cinco ainda não possuíam identificação laboratorial confirmada e não seriam exploradas, apesar de constarem na planilha como registros internos. O documento estabelece DMC de 60 cm para espécies dos gêneros *Dipteryx*, *Cedrela* e *Handroanthus*, conforme a Instrução Normativa IBAMA nº 28/2024, e de 50 cm para as demais.

O volume explorável totaliza 9.831,4369 m³, distribuídos em 1.456 árvores, correspondendo a 25,56 m³/ha na área efetiva de 384,7119 ha, abaixo dos 25,80 m³/ha previstos no PMFS. As espécies *Dinizia excelsa*, *Peltogyne lecointei*, *Allantoma lineata*, *Hymenolobium pulcherrimum* e *Qualea brevipedicellata* concentram 5.730,8739 m³, equivalentes a 58,3% do volume explorável, com destaque para D. excelsa, responsável por cerca de 30% desse total (Tabela 1).

A lista inclui diferentes famílias botânicas, com predominância de Fabaceae, grupo de reconhecida importância ecológica e madeireira na Amazônia (Silva et al., 2021; Myster, 2023; Morais et al., 2024). Esses dados reforçam a relevância do POA para estudos de exploração florestal e rastreabilidade botânica.

Tabela 1 – Espécies selecionadas no POA da UPA 23 da Madeflona e seus atributos de exploração

Nome comum	Nome científico	Número de árvores	Volume (m^3)
Faveira-ferro*	*Dinizia excelsa* Ducke	221	2.952,3779
Jequitibá-rosa*	*Allantoma lineata* (Mart. ex O.Berg) Miers	123	866,1118
Roxinho*	*Peltogyne lecointei* Ducke	208	861,8534
Cambará-preto*	*Qualea brevipedicellata* Stafleu	119	532,2617
Angelim-pedra*	*Hymenolobium pulcherrimum* Ducke	63	518,2691
Abiorana-sp**	---	11	31,2746
Angelim-amarelo**	---	42	215,9434
Pajurá**	---	88	360,0207
Peroba-da-água**	---	8	23,6915
Sucupira-marreta**	---	5	19,8899
Taxí-preto**	*Tachigali paniculata* Aubl.	183	734,0439
Taxí-vermelho**	*Tachigali paniculata* Aubl.	23	84,3897

*número de árvores e volume passível de exploração; ** número de árvores e volume acima do diâmetro mínimo de corte.

Entre as espécies avaliadas, *Dinizia excelsa* destacou-se por apresentar o maior volume estimado e o maior número de árvores previstas para exploração. Trata-se de uma espécie amazônica amplamente reconhecida na literatura e em bases taxonômicas como uma árvore de grande porte e elevada importância econômica, ecológica e madeireira, sendo frequentemente registrada em inventários florestais e em áreas sob manejo na região (Conceição et al., 2020; Lima et al., 2024; Lima et al., 2026). Entre 2017 e 2026, mais de 15 milhões de m^3 de madeira dessa espécie foram comercializados, reforçando sua expressiva relevância na cadeia produtiva florestal (IBAMA, 2026). Sua posição na lista evidencia sua representatividade na composição explorada e reforça a necessidade de documentação botânica consistente.

Além de *Dinizia excelsa*, outras espécies pertencem a famílias de interesse florestal, como Lecythidaceae e Vochysiaceae, indicando a concentração do manejo em grupos amazônicos de reconhecida importância madeireira (Cysneiros et al., 2018; Lima et al., 2024). A instabilidade dos nomes vernaculares e a ausência de identificação científica em alguns

registros evidenciam limitações na padronização do POA e reforçam a necessidade de validação taxonômica em bases como Reflora e SpeciesLink (Baraloro et al., 2007; Lacerda; Nimmo, 2010; Guitet et al., 2014; BFG, 2022).

As espécies selecionadas no POA da Madeflona diferem quanto ao potencial de exploração, à documentação botânica e à correspondência entre nomes vernaculares e científicos. Entre aquelas com maior volume previsto, *Dinizia excelsa*, *Allantoma lineata*, *Peltogyne lecointei*, *Qualea brevipedicellata* e *Hymenolobium pulcherrimum* apresentaram níveis variados de registro nas bases consultadas, desde ampla documentação até ocorrências escassas ou inconsistentes (Tabela 2).

Tabela 2 – Correspondência taxonômica, ocorrência e registros de coleta das espécies selecionadas em bases botânicas

Nome comum	Nome científico	Número de amostras catalogadas*	Número de herbários	Estados de ocorrência	Nomes vernáculos (REFLORA)
Faveira-ferro	*Dinizia excelsa* Ducke	66	18	AC, AM, AP, PA, RO, RR, TO e MT.	Não relatado
Jequitibá-rosa	*Allantoma lineata* (Mart. ex O.Berg) Miers	4	2	AM, AP, PA, RO e RR.	cheru, churu, xuru, ceru
Roxinho	*Peltogyne lecointei Ducke*	2	1	PA	Nã relatado
Cambará-preto	*Qualea brevipedicellata* Stafleu	6	4	AM, RO	Não relatado
Angelim-pedra	*Hymenolobium pulcherrimum* Ducke	9	2	AM, PA, RO e MT	Angelim, angelim-da-mata, angelim-pedra, faveira, sucupira-preta, sucupira-amarela, sucupira-peluda
Taxí-preto	*Tachigali*	83	14	AC, AM,	Tachi, tachi-

	paniculata			AP, PA, RO, RR, MA, MT e MG.	amarelo, tachi-preto
Taxí-vermelho	*Tachigali paniculata*	83	14	Acre, Amazonas, Amapá, Pará, Rondônia, Roraima, Maranhão, Mato Grosso, Minas Gerais	Tachi, tachi-amarelo, tachi-preto

*com coleta em RO.

A espécie *Dinizia excelsa* apresentou o maior volume estimado de exploração e também um número expressivo de registros no SpeciesLink, com coletas distribuídas em diferentes localidades de Rondônia, incluindo áreas próximas a grandes empreendimentos e à região de Porto Velho. Esse padrão indica boa representação em herbários, embora a busca por nome comum no Reflora não tenha retornado associação direta, o que pode dificultar sua rastreabilidade em documentos técnicos.

Para *Allantoma lineata*, observou-se correspondência parcial entre o nome comum "jequitibá-rosa" e os registros de ocorrência. No Reflora, a busca pelo nome vernacular recuperou principalmente espécies da Mata Atlântica, como *Cariniana estrellensis* e *Cariniana legalis*, enquanto o nome científico da espécie analisada corresponde a um táxon amazônico com registros em Rondônia e amostras na Flona do Jamari. Esse caso evidencia que o uso isolado de nomes populares pode levar a interpretações taxonômicas incorretas.

Situação semelhante foi observada para *Peltogyne lecointei*, cuja associação com o nome comum "roxinho" não é exclusiva. O mesmo nome vernacular aparece vinculado a outras espécies com ocorrência em Rondônia, como *Dialium guianense*, *Martiodendron elatum* e *Peltogyne densiflora*. Além disso, o Reflora indicou ocorrência restrita para a espécie, enquanto o SpeciesLink reuniu registros na Flona do Jamari, reforçando a existência de divergências entre as bases.

Para *Hymenolobium pulcherrimum*, os dados mostraram maior consistência entre nome científico, ocorrência amazônica e registros em Rondônia, inclusive com coletas na Flona do Jamari e em municípios próximos. Ainda assim, o nome comum "angelim-pedra" também aparece associado a outros táxons do gênero, o que demonstra que a nomenclatura vernacular nem sempre é suficiente para garantir identificação inequívoca.

As espécies do gênero *Tachigali* também evidenciaram problemas de padronização. *Tachigali* paniculata apresentou ampla distribuição e vários registros em Rondônia, mas a variação ortográfica entre “taxí” e “tachi” dificultou a recuperação de dados no Reflora. Além disso, o nome comum foi associado a outros táxons e sinônimos, como *Tachigali myrmecophila* e *Tachigali glauca*, cuja ocorrência em Rondônia é tratada de forma divergente entre as bases. Esses resultados reforçam a necessidade de atenção à grafia e à sinonímia na consulta de bases botânicas.

Entre os táxons sem identificação científica no POA (Tabela 1), como “abiorana-sp”, “angelim-amarelo”, “pajurá”, “peroba-da-água” e “sucupira-marreta”, verificou-se que o Reflora e o SpeciesLink apresentam respostas distintas e, em alguns casos, incompletas. Em “pajurá”, por exemplo, o nome popular pode corresponder a mais de uma espécie, sendo que uma delas apresenta registros apenas no SpeciesLink e outra não tem ocorrência confirmada para Rondônia em nenhuma das bases. Já “sucupira-marreta” não retornou correspondência direta no Reflora, indicando limitação da base quando o dado de entrada é apenas vernacular.

A análise evidenciou que as espécies de maior relevância comercial na UPA 23 concentram a maior parte do volume passível de exploração, mas nem sempre contam com documentação botânica equivalente nas bases consultadas. Táxons como *Dinizia excelsa*, *Peltogyne lecointei* e *Allantoma lineata* reúnem expressivo potencial produtivo e, em alguns casos, boa representatividade em coleções botânicas; entretanto, outras espécies exploradas apresentam registros escassos, inconsistências nomenclaturais ou divergências entre Reflora e SpeciesLink. Esse cenário indica que a exploração madeireira está concentrada em poucas espécies de alto valor, enquanto a rastreabilidade botânica permanece desigual, reforçando a necessidade de maior integração entre inventários florestais e bases taxonômicas (Sccoti et al., 2023).

Além disso, os resultados mostram que Reflora e SpeciesLink não operam de forma plenamente integrada: em alguns casos, espécies sem ocorrência registrada no Reflora apresentam amostras coletadas em Rondônia no SpeciesLink, inclusive próximas à área de manejo da Flona do Jamari. Essas divergências evidenciam lacunas na documentação botânica e na atualização das bases, e reforçam a importância de cruzar informações taxonômicas, vernaculares e geográficas para ampliar a rastreabilidade das espécies exploradas em concessões florestais (Cardoso et al., 2017).

Nesse contexto, as concessões florestais constituem instrumentos relevantes para o manejo legal e sustentável, pois organizam a exploração com base em inventários, critérios

técnicos e volumes autorizados (Lima et al., 2018). O POA da Madeflona, além de orientar operacionalmente a exploração, contribui para políticas de controle dos recursos florestais e combate à exploração ilegal ao estabelecer limites de corte, registrar espécies exploráveis e sistematizar informações da produção.

Entretanto, o descompasso entre o volume explorável e a documentação botânica reforça a necessidade de ampliar a coleta de vouchers, solucionar problemas nomenclaturais e reduzir ambiguidades nos nomes comuns. A consolidação de uma base regional de referência, integrada a inventários, herbários e sistemas de gestão, é fundamental para fortalecer a identificação das espécies, a fiscalização da cadeia madeireira, a conservação e o uso sustentável dos recursos florestais (Marín-Rodulfo et al., 2024).

4. Conclusões

A exploração madeireira tem concentração do volume explorável em poucas espécies de alto valor comercial, especialmente *Dinizia excelsa*, associada a documentação botânica desigual e divergências entre bases taxonômicas, o que evidencia a necessidade de ampliar vouchers, validar nomenclaturas e integrar inventários florestais e coleções botânicas para fortalecer a rastreabilidade e o manejo sustentável.

5. Referências bibliográficas

Andrade, M., Santos, H., Nunes, F., Julia, N. C., & Lentini, M. W. (2022). *Produção de madeira e diversidade de espécies arbóreas exploradas na Amazônia brasileira: Situação atual e recomendações para o setor florestal*. IMAFLORA.

Baraloto, C., Ferreira, E., Rockwell, C., & Walthier, F. (2007). Limitations and applications of parataxonomy for community forest management in Southwestern Amazonia. *Ethnobotany Research and Applications, 5*, 77–84. https://ethnobotanyjournal.org/index.php/era/article/view/120

BFG – The Brazil Flora Group. (2022). Brazilian Flora 2020: Leveraging the power of a collaborative scientific network. *TAXON, 71*(1), 178–198. https://doi.org/10.1002/tax.12640

Brasil. Serviço Florestal Brasileiro. (2026). *Madeflona Industrial Madeireira: Execução técnica da concessão (Jamari – UMF I).* https://www.gov.br/florestal/pt-br/assuntos/concessoes-e-monitoramento/concessoes-florestais-em-andamento/floresta-nacional-do-jamari-ro-2/madeflona-industrial-madeireira-execucao-tecnica-da-concessao-jamari-umf-i-2

Cardoso, D., Särkinen, T., Alexander, S., Amorim, A. M., Bittrich, V., Celis, M., Daly, D. C., Fiaschi, P., Funk, V. A., Giacomin, L. L., Goldenberg, R., Heiden, G., Iganci, J., Kelloff, C. L., Knapp, S., Lima, H. C., Machado, A. F. P., Mello-Silva, R., Santos, R. M., ... Forzza, R. C. (2017). Amazon plant diversity revealed by a taxonomically verified species list. *Proceedings of the National Academy of Sciences, 114*(40), 10695–10700. https://doi.org/10.1073/pnas.1706756114

Conceição, A. K. C., Lira, Á. G. S., Sousa, L. M. R., Maestri, M. P., & Aquino, M. G. C. (2020). Exploração e valoração em tora de 10 espécies florestais no Baixo Amazonas, estado do Pará, entre 2006–2016. *Enciclopédia Biosfera, 17*(31), 80–95. https://doi.org/10.18677/EnciBio_2020A7

Flora e Funga do Brasil. (2026). *Jardim Botânico do Rio de Janeiro*. http://floradobrasil.jbrj.gov.br/

Guitet, S., Sabatier, D., Brunaux, O., Hérault, B., Aubry-Kientz, M., Molino, J.-F., & Baraloto, C. (2014). Estimating tropical tree diversity indices from forestry surveys: A method to integrate taxonomic uncertainty. *Forest Ecology and Management, 328*, 270–281. https://doi.org/10.1016/j.foreco.2014.05.045

IBAMA. (2026). *Painéis analíticos da gestão madeireira: Industrialização, comércio e transporte de produtos florestais*. Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis. https://www.gov.br/ibama/pt-br/assuntos/biodiversidade/flora-e-madeira/paineis-analiticos-da-gestao-madeireira-1

Lacerda, A. E. B., & Nimmo, E. R. (2010). Can we really manage tropical forests without knowing the species within? Getting back to the basics of forest management through taxonomy. *Forest Ecology and Management, 259*(5), 995–1002. https://doi.org/10.1016/j.foreco.2009.12.005

Lima, F. B., Souza, Á. N., Matricardi, E. A. T., Gaspar, R. O., Lima, I. B., Souza, H. J., Santos, M. L., Miguel, E. P., Borges, L. A. C., Santos, C. R. C., Gouveia, F. N., & Lima, M. F. B. (2024). Alternative tree species for sustainable forest management in the Brazilian Amazon. *Forests, 15*(10), Article 1763. https://doi.org/10.3390/f15101763

Lima, L. S., Merry, F., Soares-Filho, B., Rodrigues, H. O., Damaceno, C. S., & Bauch, M. A. (2018). Illegal logging as a disincentive to the establishment of a sustainable forest sector in the Amazon. *PLOS ONE, 13*(12), e0207855. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0207855

Lima, R. B., Pereira de Oliveira, C., da Silva, D. A. S., Granato-Souza, D., Aparecida Gonçalves, L., Vasconcelos, C. C., Batista, A. P. B., Ramos de Matos Filho, J., Gomes da Silva, J. P., da Silva Aparício, P., Campelo de Souza, C. S., Coelho de Abreu, J., Correa Lopes, I. J., Ometto, J. P., & Görgens, E. B. (2026). Warmer climate threatens the occurrence of giant trees in the Amazon basin. *Journal of Environmental Management, 399*, 128616. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2026.128616

Manzatto, A. G., & Moreira, D. N. (2023). As potencialidades que favorecem ao desenvolvimento sustentável na Amazônia. *Revista Brasileira de Planejamento e Desenvolvimento, 12*(3), 751–777. https://doi.org/10.3895/rbpd.v12n3.15547

Marín-Rodulfo, M., Rondinel-Mendoza, K. V., Martín-Girela, I., Cañadas, E. M., & Lorite, J. (2024). Old meets new: Innovative and evolving uses of herbaria over time as revealed by a literature review. *Plants, People, Planet, 6*(6), 1261–1271. https://doi.org/10.1002/ppp3.10541

Morais, V. A., Silva, L. B. D., Araújo, E. J. G. de, Curto, R. D., & Ataíde, D. H. dos S. (2024). Desvendando os tesouros botânicos da Amazônia: O magnífico legado da família Fabaceae. *Cadernos de Linguagem e Metodologia, 24*(5). https://doi.org/10.53660/CLM-3063-24E26

Myster, R. W. (2023). The contributions of Neotropical tree families to the structure of common Amazon forest-types. *International Journal of Plant Biology, 14*, 339–346. https://doi.org/10.3390/ijpb14020028

Palmieri, R. H., & Batistella, M. (2022). A importância das populações locais e dos arranjos institucionais para as concessões florestais no Brasil. *Ambiente & Sociedade, 25*, 1–22. https://doi.org/10.1590/1809-4422asoc20200238r2vu2022L4AO

Sccoti, M. S. V., Mascarenhas, A. R. P., Rebelo, A. C., Fernandes, I. M., Vendruscolo, J., Rocha, J. D. S., & Moreto, R. F. (2023). Current practices of conducting forest management plans in the Amazon may risk the survival of timber species. *Environmental Science and Pollution Research, 30*, 82589–82600. https://doi.org/10.1007/s11356-023-28311-4

Silva, S. P., Ferreira, E. J. L., & Santos, L. R. (2021). Fitossociologia e diversidade em fragmentos florestais com diferentes históricos de intervenção na Amazônia Ocidental. *Ciência Florestal, 31*(1), 233–251. https://doi.org/10.5902/1980509839027

Soares, C. C., & Bezerra, M. G. F. (2021). Gestão de florestas públicas: Uma revisão de literatura com ênfase à concessão florestal. *Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais, 12*(4), 627–641. https://doi.org/10.6008/CBPC2179-6858.2021.004.0049

Soares, L. M. A., Sousa, V. V., Moraes, B. M., & Rocha, L. P. (2025). Conservação da Amazônia: A importância da redução de emissões de gases de efeito estufa e da valorização da sociobiodiversidade. *Revista Contribuciones a las Ciencias Sociales, 18*(2), 1–15. https://doi.org/10.55905/revconv.18n.2-155

SpeciesLink. (2026). *speciesLink network*. https://specieslink.net/search

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Rotas de Utilização da Lignina na Produção de Adesivos para *Plywood*

Ana Paula Senra Soares[1]; Allan de Amorim dos Santos[1]; Larisse Aparecida Ribas Batalha[2]; Diana Catalina Cubides Roman[2]; Fernando José Borges Gomes[2]; Vinicius Fernandes Nunes da Silva[3]; Ewellyn Capanema[4]

[1] Instituto Senai de Inovação em Biossintéticos e Fibras, Rio de Janeiro – RJ, Brasil
[2] Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro – RJ, Brasil
[3] Klabin S/A, Brasil
[4] RISE Research Institutes of Sweden, Estocolmo, Suécia

Resumo: As resinas fenol-formaldeído (PF) são muito utilizadas na indústria madeireira, mas dependem de compostos petroquímicos com potencial tóxico. Com isso, a lignina surge como uma alternativa renovável ao fenol devido à sua estrutura aromática e à presença de grupos funcionais reativos. Nesse trabalho, foram avaliadas duas rotas para obter resinas adesivas à base de lignina de *Pinus* spp. e *Eucalyptus* spp.: a substituição parcial do fenol em resinas PF e a produção de resinas a partir de lignina esterificada. A resina lignina-fenol-formaldeído com 50% de substituição do fenol por lignina de *Pinus* spp. atendeu aos limites de emissão de formaldeído e apresentou módulo de elasticidade perpendicular e resistência a cisalhamento superior ao da resina comercial, enquanto os adesivos integralmente à base de lignina *Eucalyptus* spp. ainda requerem melhora para elevar a resistência ao cisalhamento.

Palavras-chave: Substituição; Reticulação; Painel de madeira

Lignin Utilization Routes to Produce Adhesives for *Plywood*

Abstract: Phenol-formaldehyde (PF) resins are widely used in the wood industry, but they rely on petrochemical compounds with potential toxicity. In this context, lignin has emerged as a renewable alternative to phenol due to its aromatic structure and the presence of reactive functional groups. In this study, two approaches were evaluated to produce lignin-based adhesive resins from Pinus spp. and Eucalyptus spp.: the partial replacement of phenol in PF resins and the production of resins from esterified lignin. The lignin–phenol–formaldehyde resin with 50% substitution of phenol by *Pinus* spp. lignin met the formaldehyde emission limits and exhibited a higher modulus of elasticity perpendicular to the surface and higher shear strength than the commercial resin, whereas the fully lignin-based adhesives derived from *Eucalyptus* spp. still require further improvement to enhance shear strength.

Keywords: Substitution; Crosslinking; Wood Panel

1. Introdução

A lignina é uma das matérias-primas mais promissoras para a substituição parcial ou total do fenol em resinas fenol-formaldeído para produzir materiais mais sustentáveis, por possuir uma estrutura baseada em unidades fenilpropano e grupos fenólicos reativos capazes de participar de reações de polimerização (Whetten & Sederoff, 1995).

Diversos estudos relatam a produção de resinas fenol-formaldeído utilizando lignina como substituta do fenol (Anter et al., 2025; Sharulnizam et al., 2026). Qiao et al. (2015) obtiveram substituição de até 50% (m/m) do fenol por lignina recuperada da indústria de bioetanol, sem prejuízo da resistência adesiva de painéis prensados a 130 °C, 1,2 MPa, por 4 minutos, enquanto Zhao et al. (2016) alcançaram substituição de até 70% (m/m) com lignina proveniente de palha de trigo, produzindo adesivos e compensados que atenderam às normas técnicas para painéis após prensagem a 150 °C e 1,5 MPa por 7 minutos (Qiao et al., 2015; Zhao et al., 2016). De forma geral, a literatura indica que a lignina não modificada pode substituir parcialmente o fenol, em proporções de até 50% (m/m), sem comprometer muito o desempenho das resinas (Kalami et al., 2017).

Diferentes estratégias químicas têm sido relatadas para a obtenção de materiais termorrígidos à base de lignina Kraft. Hu et al. (2025) desenvolveram uma resina totalmente à base de lignina reticulada com glutaraldeído, que apresentou elevada resistência adesiva e ao cisalhamento, comparável à de adesivos fenólicos convencionais (Hu et al., 2025). Di Francesco et al. (2022) mostraram que a reticulação da lignina Kraft com ácido adípico gera resinas com elevada estabilidade térmica e alto grau de reticulação, com potencial para adesivos à base de lignina (Di Francesco et al., 2022).

Neste trabalho, foram investigadas duas rotas para a produção de resinas adesivas à base de lignina de *Pinus spp.* e *Eucalyptus spp.*: a substituição parcial do fenol em resinas fenol-formaldeído, utilizando proporções de 30/70 e 50/50, e a obtenção de resinas por meia da esterificação da lignina com os ácidos adípico e sebácico, seguida de reticulação para obtenção de uma resina livre de fenol. As duas rotas foram comparadas quanto às propriedades das resinas e ao desempenho dos painéis produzidos, visando identificar a rota mais promissora para o desenvolvimento de adesivos sustentáveis.

2. Material e métodos

Material

As ligninas utilizadas neste estudo foram fornecidas pela Klabin S/A, sendo obtidas como subproduto da produção de celulose kraft de *Eucalyptus* spp. e *Pinus* spp.

Caracterização da Lignina

As ligninas *Eucalyptus* spp. e *Pinus* spp. foram caracterizadas por meio da determinação dos teores de lignina insolúvel (TAPPI UM 222), lignina solúvel (TAPPI UM 250), cinzas (TAPPI T-211 om 02). O teor de carboidratos foi calculado por diferença, e a pureza da lignina foi estimada pela soma dos teores de lignina insolúvel e lignina solúvel. A estrutura química das ligninas foi investigada por ressonância magnética nuclear bidimensional (RMN). A massa molecular foi determinada por cromatografia de permeação em gel (GPC/APC). Além disso, o teor de hidroxilas livres das ligninas foi determinado pelo método espectrofotométrico de Folin–Ciocalteau.

Produção da resina Lignina-Fenol-Formaldeído

As ligninas foram utilizadas como substitutas parciais do fenol na resina PF, em proporções de 30/70 e 50/50 (m/m). O fenol fundido foi colocado em reator sob aquecimento e agitação, seguido da adição gradual da lignina. Em seguida, adicionou-se metade da solução de NaOH (50% m/m), o formaldeído por gotejamento e, a segunda porção de NaOH, elevando a temperatura até aproximadamente 85 °C, onde a reação foi mantida pelo tempo definido conforme o tipo de lignina e o grau de substituição. As resinas foram avaliadas enquanto à viscosidade (ISO 2555:2018), ao pH (ISO 8975), aos sólidos (ABNT NBR 8877) e ao tempo de gelificação (ISO 9396).

Produção da resina adesiva a base de lignina

A lignina foi esterificada com uma mistura reticulante derivada dos ácidos adípico e sebácico, ativados com acetato de isopropenila em meio ácido, conforme adaptação da metodologia de Di Francesco et al. (2022). A lignina seca foi incorporada na proporção de 1:1 (reticulante:lignina), utilizando etileno glicol como solvente e plastificante para reduzir a tensão superficial e a viscosidade da resina. As resinas foram caracterizadas quanto à temperatura de cura por Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC). A viscosidade foi determinada em reômetro Discovery HR30 (TA Instruments), na faixa de taxa de cisalhamento de 0 a 2000 s^{-1}. Para as formulações selecionadas, também foram avaliados o pH, o teor de sólidos (ABNT NBR 8877) e o tempo de gel (ISO 9396).

Preparação dos compensados de madeira

Lâminas de pinus foram utilizadas na produção dos painéis compensados nas dimensões de 45 × 45 × 0,2 cm. Os painéis colados com resina lignina-fenol-formaldeído foram fabricados com três lâminas, gramatura de 280 g/m² e prensagem a 150 °C por 5 minutos sob 10 kgf/cm². Para as resinas à base de lignina esterificada e reticulada, utilizaram-se lâminas de 1 mm, com prensagem a 200 °C por 10 minutos e mesma pressão de 10 kgf/cm². Após a prensagem, os painéis foram resfriados e acondicionados em ambiente climatizado (23 °C e 65% UR). Em cada um dos painéis foram amostrados 10 corpos de prova nas dimensões de 15 x 2,54 cm, conforme as normas ABNT NBR ISO 12466-1 e ABNT NBR ISO 17002 para ensaios mecânicos, nos quais 5 deles foram utilizados para ensaios de tração a seco e a úmido. Todos os resultados foram submetidos à análise de variância (ANOVA) e, estabelecendo-se diferenças significativas, os tratamentos foram comparados entre si pelo teste de Tukey com nível de confiança de 95 %. A liberação de formaldeído dos painéis produzidos pelas resinas com formaldeído em sua composição foi avaliada pelo método do frasco EN 717-3.

3. Resultados e discussão

Caracterização da Lignina

Os resultados da caracterização das ligninas (Tabela 1) foram compatíveis com os valores reportados na literatura (de Magalhães et al., 2019; Gomes et al., 2023). O teor de cinzas e o conteúdo de carboidratos, está relacionado ao grau de pureza da lignina Kraft, influenciado por componentes inorgânicos da madeira, do processo de polpação, do sistema de recuperação química e da água utilizada.

Tabela 9- Caracterização de lignina de *Pinus* spp. e de *Eucalyptus* spp.

Análises	Lignina *Pinus* spp (%)	Lignina de *Eucalyptus* spp (%)
Lignina Insolúvel	91,1 ± 1,1	92,1 ± 0,3
Lignina Solúvel	1,6 ± 0,1	6,0 ± 0,1
Cinzas	1,1 ± 0,0	0,8 ± 0,0
Carboidratos	6,2 ± 1,2	1,9 ± 0,2
Pureza	92,7 ± 1,2	98,2 ± 0,4

A análise de RMN 2D das ligninas foi realizada baseada em trabalhos anteriores (Balakshin et al., 2007; Lancefield et al., 2018). Conforme esperado para ligninas do tipo Kraft,

foram observados sinais característicos das principais ligações interunidades, incluindo β-O-4', β-β (resinol e epiresinol) e β-5, além de grupos metoxila associados às unidades aromáticas. Também foram identificados sinais atribuídos a álcool cinâmico, cinamaldeído, aril hidroxietilacetona, xilanos e às unidades de guaiacila e siringila. As unidades de guaiacila foram identificadas pelos sinais C2-H2, C5-H5 e C6-H6, enquanto as unidades de siringila foram atribuídas aos sinais C2,6-H2,6, incluindo estruturas β-O-4' γ-hidroxiladas e formas oxidadas (Cα=O).

A lignina de *Pinus* spp. apresentou maior massa molar (11.652 g/mol) e elevado grau de polidispersão (9,7), indicando uma estrutura mais heterogênea. Em contraste, a lignina de *Eucalyptus* spp. apresentou menor massa molar (2.149 g/mol) e polidispersão (2,84). A elevada polidispersão da lignina pode comprometer sua aplicação em resinas, especialmente em altas proporções, devido à ampla distribuição de massas molares, que afeta a cura, a reticulação e as propriedades do material (Pappa et al., 2022)

O teor de hidroxilas livres nas ligninas varia em função do tipo de lignina e do processo de extração empregado (Constant et al., 2016). A lignina de *Eucalyptus spp.* apresentou maior teor de hidroxilas livres (6,62 mmol/g) que a de *Pinus spp.* (4,55 mmol/g), indicando maior reatividade devido à maior disponibilidade de sítios ativos para reações de modificação e reticulação, o que favorece sua aplicação na síntese de resinas à base de lignina (Di Francesco et al., 2022), sendo esta escolhida para seguir para a rota de produção de resinas a partir de lignina esterificada.

Resina Lignina-Fenol-Formaldeído

Na etapa de substituição parcial do fenol por ligninas de *Pinus* spp. e *Eucalyptus* spp., foram avaliadas diferentes condições reacionais para a síntese de resinas fenol-formaldeído. Os tempos e as temperaturas de reação variaram em função do tipo de lignina e do teor de substituição do fenol. A Tabela 2 apresenta as propriedades das resinas produzidas, incluindo viscosidade, teor de sólidos, pH e tempo de gel.

Tabela 10- Tempos de reação e propriedades dos adesivos obtidos por substituição do fenol por lignina *Pinus* spp. (S70/30 e S50/50) e *Eucalyptus* spp. (H70/30 e H50/50).

Propriedades	S70/30	S50/50	H70/30	H50/50
Tempo de reação a 85°C	1h20min	1h	4h20min	2h
Viscosidade, mPa.s 25°C	524,0	693,0	570,0	684,0
Sólidos, %	53,5	49,9	52,1	48,6
Tempo de gel, min	14,1	14,6	14,5	14,9
pH	10,6	10,3	10,8	10,9

O aumento da substituição do fenol por lignina resultou em maior viscosidade e tempo de gel das resinas, devido ao elevado peso molecular da lignina e à sua menor reatividade em relação ao fenol, o que influencia a cinética das reações de condensação. As formulações com lignina de *Eucalyptus* spp. apresentaram maiores tempos de reação, possivelmente devido a diferenças estruturais das ligninas avaliadas. Além disso, o maior teor de lignina reduziu o teor de sólidos e o pH, associado à menor adição de NaOH e à maior formação de água nas reações de condensação. De modo geral, as resinas obtidas por substituição direta apresentaram características compatíveis com as exigidas para resinas fenol-formaldeído comerciais, com viscosidade entre 600 e 800 cP a 25 °C, teor de sólidos entre 40 e 60% e pH na faixa de 10 a 13 (Pizzi & Mittal, 2018).

Resina adesiva a base de lignina

Na síntese utilizando ácido adípico, foi empregada uma proporção de 1:1 entre lignina e reticulante, com adição de 10 mL de etileno glicol, resultando em viscosidades entre 645 e 698 cP, enquanto na formulação com ácido sebácico foram utilizados 12 mL de etileno glicol, obtendo-se viscosidades na faixa de 584 a 640 cP, sendo compatíveis com os de resinas comerciais. As análises de DSC (Figura 1) revelaram eventos exotérmicos em aproximadamente 215 °C e 220 °C para as resinas formuladas com ácido adípico e ácido sebácico, respectivamente. A etapa de cura em mufla (200 °C por 3 h) confirmou a formação de materiais sólidos e mecanicamente resistentes.

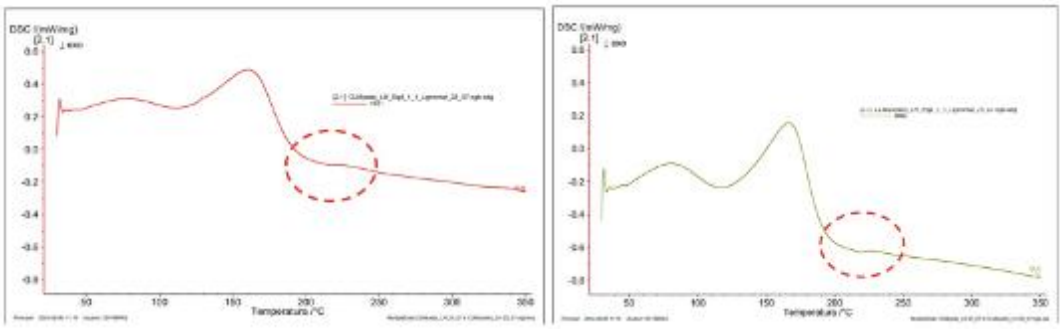


Figura 8- DSC da resina CLM com ácido sebácico e com ácido adípico.

As resinas apresentaram pH 4,01 para ácido sebácico e 2,88 para ácido adípico, condição que favorece a reticulação e a adesão, embora pHs muito baixos possam comprometer a integridade da madeira na interface de colagem (Xi et al., 2024). Os teores de sólidos variaram entre 44,7% e 50,8%, sendo que valores mais altos favorecem a resistência de colagem e

reduzem perdas de voláteis, e valores mais baixos podem comprometer a cura e a qualidade dos compósitos (Luo et al., 2017). Além disso, a resina contendo ácido sebácico apresentou maior tempo de gelificação (42 min) que a formulada com ácido adípico (21 min), devido à maior proporção de etilenoglicol, retardando a evaporação do solvente e polimerização.

Compensados de madeira

Segundo a ISO 12466-2, painéis destinados a uso externo protegido ou ambientes úmidos devem apresentar resistência ao cisalhamento mínima de 1 MPa em condições secas e úmidas. Nos ensaios de cisalhamento, a substituição de 30% do fenol por lignina de *Eucalyptus spp.* resultou em valores superiores aos requisitos normativos e até mesmo à resina comercial. Para a lignina de *Pinus spp.*, foi possível substituir até 50% do fenol sem comprometer a resistência ao cisalhamento, devido à maior reatividade da lignina de *Pinus spp.*, rica em unidades guaiacílicas, que possuem maior disponibilidade de sítios reativos para reação com o formaldeído (Ferdosian et al., 2017).

Figura 9- Resistência ao cisalhamento (MPa) na linha de cola. CR: Resina Comercial; 30/70 e 50/50 de substituição do fenol por lignina de Eucalyptus spp. (H) e Pinus spp. (S)

Para o módulo de elasticidade (MOE) perpendicular às fibras (Figura 7), apenas a formulação com 50% de lignina de *Pinus* spp. (S50/50), entre as resinas com substituição parcial do fenol, apresentou rigidez superior à referência. Já para a resistência à flexão paralela às fibras, destacou-se a formulação com 30% de substituição por lignina de *Eucalyptus* spp. (H70/30), que também superou a resina de referência em rigidez.

Figura 10- Módulo de Elasticidade: Resistencia a flexão perpendicular e paralela as fibras (Mpa). CR: Resina Comercial; 30/70 e 50/50 de substituição do fenol por lignina de Eucalyptus spp. (H) e Pinus spp. (S).

A emissão de formaldeído dos painéis foi avaliada (Tabela 3). As amostras produzidas com lignina de *Eucalyptus* spp. apresentaram emissões inferiores às da resina comercial, enquanto apenas a formulação com 70/30 lignina de *Pinus* spp. exibiu valor inferior à referência. No entanto, todas as amostras atenderam aos limites estabelecidos pelas normas brasileiras (inferiores a 8 mg/kg), sendo aprovadas para uso. A lignina de *Eucalyptus* spp. apresentou o melhor desempenho, destacando-se pela menor emissão de formaldeído entre todas as formulações avaliadas.

Tabela 11- Emissão de formaldeído dos painéis por substituição parcial do fenol por lignina de *Eucalyptus* spp. (H) e *Pinus* spp. (S).

Amostras	CR	*Pinus* spp.		*Eucalyptus* spp.	
		S70/30	S50/50	H70/30	H50/50
mg formaldeído/ kg amostra	0,138	0,120	0,183	0,107	0,105

Observa-se na Figura 4-a que os painéis produzidos com resinas à base de lignina e reticulantes de ácido sebácico ou adípico apresentaram resistência ao cisalhamento inferior à da resina comercial, indicando menor adesão à madeira e menor capacidade de suportar tensões, que pode estar relacionado à estrutura mais complexa e menos reativa da lignina, que dificulta a formação de uma rede polimérica coesa e reduz a reticulação (Yaakob et al., 2021). Além disso, a maior sensibilidade da lignina à umidade pode comprometer o desempenho dos painéis (Gonçalves et al., 2024).

Os resultados do módulo de elasticidade (MOE) (Figura 4-b) indicaram que, nos ensaios de flexão paralela, os painéis produzidos com resinas à base de lignina apresentaram maior rigidez que a resina comercial. Na flexão perpendicular, a resina formulada com ácido sebácico também superou a resina comercial, enquanto a formulação com ácido adípico apresentou desempenho inferior. A maior rigidez está associada à sua estrutura rica em anéis aromáticos, que confere elevada resistência à deformação, embora sua resistência ao cisalhamento seja menor que a das resinas fenol-formaldeído convencionais.

Figura 11- (a) Resistência ao cisalhamento na linha de cola e (b) Módulo de elasticidade: Resistência a flexão perpendicular e paralela as fibras dos painéis. CR: Resina Comercial; AS: Reticulante de ácido sebácico + lignina; AA: Reticulantede ácido adípico + lignina

4. Conclusões

As resinas Lignina-Fenol-Formaldeído atenderam aos limites de emissão de formaldeído estabelecidos pelas normas brasileiras, demonstrando conformidade com os requisitos ambientais para aplicação em painéis de madeira. A resistência ao cisalhamento foi o principal critério de avaliação, destacando-se a formulação contendo 50% de lignina de *Pinus* spp.. Em relação aos adesivos à base de lignina, apesar dos resultados positivos, a resistência ao cisalhamento ainda representa um desafio, evidenciando a necessidade de aprimoramentos nas formulações e nos processos de reticulação para ampliar sua competitividade frente às resinas fenol-formaldeído convencionais.

5. Agradecimentos

Os autores agradecem à Klabin S/A pelo fornecimento das ligninas utilizadas neste estudo e pela parceria estabelecida, à UFRRJ pelo apoio institucional e científico, e à FINEP (01.22.0476.00) e à Vinnova (2019-03509) pelo suporte financeiro concedido ao projeto, fundamentais para o desenvolvimento desta pesquisa.

6. Referências bibliográficas

Anter, N., Chennani, A., Guida, M.-Y., Atmani, F. ezzahra, Moubarik, A., Rakib, E. M., Medaghri-Alaoui, A., & Hannioui, A. (2025). Dual-functionalized lignin as a sustainable modifier for high-performance phenol-formaldehyde adhesives in plywood production. *RSC Advances*, *15*(39), 32118–32130. https://doi.org/10.1039/D5RA04233J

Balakshin, M. Yu., Capanema, E. A., & Chang, H. (2007). MWL fraction with a high concentration of lignin-carbohydrate linkages: Isolation and 2D NMR spectroscopic analysis. *Holzforschung*, *61*(1), 1–7. https://doi.org/10.1515/HF.2007.001

Constant, S., Wienk, H. L. J., Frissen, A. E., Peinder, P. de, Boelens, R., van Es, D. S., Grisel, R. J. H., Weckhuysen, B. M., Huijgen, W. J. J., Gosselink, R. J. A., & Bruijnincx, P. C. A. (2016). New insights into the structure and composition of technical lignins: a comparative characterisation study. *Green Chemistry*, *18*(9), 2651–2665. https://doi.org/10.1039/C5GC03043A

de Magalhães, M. A., Vital, B. R., Carneiro, A. de C. O., da Silva, C. M. S., Fialho, L. de F., Figueiró, C. G., & Ferreira, J. C. (2019). Adição de lignina Kraft à resina fenólica para a fabricação de compensados. *Revista Ciência Da Madeira - RCM*, *10*(2), 142–149. https://doi.org/10.12953/2177-6830/rcm.v10n2p142-149

Di Francesco, D., Rigo, D., Reddy Baddigam, K., Mathew, A. P., Hedin, N., Selva, M., & Samec, J. S. M. (2022). A New Family of Renewable Thermosets: Kraft Lignin Poly-adipates. *ChemSusChem*, *15*(11). https://doi.org/10.1002/cssc.202200326

Ferdosian, F., Pan, Z., Gao, G., & Zhao, B. (2017). Bio-Based Adhesives and Evaluation for Wood Composites Application. *Polymers*, *9*(2), 70. https://doi.org/10.3390/polym9020070

Gomes, F. J. B., Lelis, R. C. C., Brito, E. O., Batalha, L. A. R., Cubides-Roman, D. C., Junior, D. L., Demuner, I. F., Santos, F. A., & Souza, R. E. de. (2023). Lignin Sources and Uses: A Review. In *Novel Aspects on Chemistry and Biochemistry Vol. 1* (pp. 65–76). B P International (a part of SCIENCEDOMAIN International). https://doi.org/10.9734/bpi/nacb/v1/18555D

Gonçalves, S., Paiva, N. T., Martins, J., Magalhães, F. D., & Carvalho, L. H. (2024). Effect of Lignosulphonates on the Moisture Resistance of Phenol–Formaldehyde Resins for Exterior Plywood. *Materials*, *17*(15), 3715. https://doi.org/10.3390/ma17153715

Hu, S., Chen, X., Ni, S., Wang, Z., Fu, Y., Qin, M., & Zhang, Y. (2025). Formaldehyde-Free, High-Bonding Performance, Fully Lignin-Based Adhesive Cross-Linked by Glutaraldehyde. *ACS Applied Polymer Materials*, *7*(2), 859–867. https://doi.org/10.1021/acsapm.4c03378

Huang, C., Peng, Z., Li, J., Li, X., Jiang, X., & Dong, Y. (2022). Unlocking the role of lignin for preparing the lignin-based wood adhesive: A review. *Industrial Crops and Products*, *187*, 115388. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2022.115388

Kalami, S., Arefmanesh, M., Master, E., & Nejad, M. (2017). Replacing 100% of phenol in phenolic adhesive formulations with lignin. *Journal of Applied Polymer Science*, *134*(30), 45124. https://doi.org/10.1002/app.45124

Lancefield, C. S., Wienk, H. L. J., Boelens, R., Weckhuysen, B. M., & Bruijnincx, P. C. A. (2018). Identification of a diagnostic structural motif reveals a new reaction intermediate and condensation pathway in kraft lignin formation. *Chemical Science*, *9*(30), 6348–6360. https://doi.org/10.1039/C8SC02000K

Luo, J., Li, L., Luo, J., Li, X., Li, K., & Gao, Q. (2017). A High Solid Content Bioadhesive Derived from Soybean Meal and Egg White: Preparation and Properties. *Journal of Polymers and the Environment*, *25*(3), 948–959. https://doi.org/10.1007/s10924-016-0875-3

Pappa, C., Feghali, E., Vanbroekhoven, K., & Triantafyllidis, K. S. (2022). Recent advances in epoxy resins and composites derived from lignin and related bio-oils. *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry*, *38*, 100687. https://doi.org/10.1016/j.cogsc.2022.100687

Pizzi, A., & Mittal, K. L. (2018). *Handbook of adhesive technology* (3ª Ed). Boca Raton: Taylor & Francis Group.

Qiao, W., Li, S., Guo, G., Han, S., Ren, S., & Ma, Y. (2015). Synthesis and characterization of phenol-formaldehyde resin using enzymatic hydrolysis lignin. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, *21*, 1417–1422. https://doi.org/10.1016/j.jiec.2014.06.016

Sharulnizam, N. A., Osman, L. S., Idris, N. N., Brosse, N., Ziegler-Devin, I., & Hussin, M. H. (2026). Formaldehyde-free lignin-phenol glyoxal adhesives from coconut-shell Kraft lignin for plywood bonding. *Biomass and Bioenergy*, *212*, 109273. https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2026.109273

Whetten, R., & Sederoff, R. (1995). Lignin Biosynthesis. *The Plant Cell*, 1001–1013. https://doi.org/10.1105/tpc.7.7.1001

Xi, X., Pizzi, A., Lei, H., Zhou, X., & Du, G. (2024). Self-Neutralizing Melamine–Urea–Formaldehyde–Citric Acid Resins for Wood Panel Adhesives. *Polymers*, *16*(13), 1819. https://doi.org/10.3390/polym16131819

Yaakob, M. N. A., Bin Roslan, R., Salim, N., & Zakaria, S. (2021). Comparison of Phenol-Formaldehyde and Lignin-Formaldehyde Resin Adhesives for Wood Application. *Materials Science Forum*, *1025*, 307–311. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.1025.307

Zhao, M., Jing, J., Zhu, Y., Yang, X., Wang, X., & Wang, Z. (2016). Preparation and performance of lignin–phenol–formaldehyde adhesives. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, *64*, 163–167. https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2015.10.010

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Síntese de adesivos de nanoligninas-ureia-formaldeído e os efeitos na emissão de formaldeído

Iara Fontes Demuner[1]; Thamirys Andrade Lopes [1]; Thaynara Silva Vieira[1]; Angélica de Cássia Oliveira Carneiro [1]; Gustavo Henrique Denzin Tonoli[2]; Marcela Ribeiro Coura[1]; Verônica Oliveira de Paula Barbosa[1]; Ana Márcia Macedo Ladeira Carvalho[1]

[1] Universidade Federal de Viçosa
[2] Universidade Federal de Lavras

Resumo: Buscando melhorias na qualidade e na sustentabilidade dos adesivos utilizados na colagem de madeira, o objetivo deste trabalho foi utilizar nanoligninas kraft de pinus e eucalipto na síntese de adesivos ureia-formaldeído. Foram avaliadas a viscosidade, a resistência ao cisalhamento das juntas coladas e a emissão de formaldeído. As nanoligninas foram produzidas a partir de lignina kraft de pinus e eucalipto. Os adesivos foram sintetizados adicionando-se 0, 2, 4, 6, 8 e 10% de nanoligninas, em substituição à massa total de ureia. Os tratamentos que apresentaram melhor desempenho em relação ao controle foram submetidos à quantificação das emissões de formaldeído. A adição de nanoligninas promoveu aumento da viscosidade dos adesivos. Os tratamentos com 4% de nanolignina de eucalipto e 6% de nanolignina de pinus aumentaram a resistência ao cisalhamento em 10% na condição seca e a emissão de formaldeído dos adesivos selecionados foi reduzida em até 75%. A incorporação de nanoligninas ao adesivo ureia-formaldeído promoveu melhorias na qualidade do adesivo e possibilitou a substituição da ureia por um recurso renovável.

Palavras-chave: Sustentabilidade; Biorrefinaria; lignina kraft

Synthesis of nanolignin-urea-formaldehyde adhesives and their effects on formaldehyde emission

Abstract: Seeking improvements in the quality and sustainability of adhesives used for wood bonding, the objective of this study was to use pine and eucalyptus kraft nanolignins in the synthesis of urea-formaldehyde adhesives. Viscosity, shear strength of the glued joints, and formaldehyde emission were evaluated. The nanolignins were produced from pine and eucalyptus kraft lignins. The adhesives were synthesized by adding 0, 2, 4, 6, 8, and 10% nanolignins, replacing the total mass of urea. The treatments that showed the best performance compared with the control were subjected to formaldehyde emission quantification. The addition of nanolignins promoted an increase in adhesive viscosity. Treatments containing 4% eucalyptus nanolignin and 6% pine nanolignin increased shear strength by 10% under dry conditions, while formaldehyde emissions from the selected adhesives were reduced by up to 75%. The incorporation of nanolignins into urea-formaldehyde adhesives improved adhesive quality and enabled the replacement of urea with a renewable resource.

Keywords: Sustainability; Biorefinery; Kraft lignin

1. Introdução

O adesivo ureia-formaldeído é amplamente utilizado em compensados, painéis de partículas, painéis de fibras de média densidade e outros painéis à base de madeira devido ao seu baixo custo, cura rápida e bom desempenho de colagem a seco (Ridho et al., 2024). Entretanto, esses adesivos apresentam como desvantagens a baixa resistência à umidade e a emissão de formaldeído quando comparados aos adesivos fenólicos.

A redução da emissão de formaldeído por meio da utilização de uma baixa razão molar formaldeído/ureia pode, algumas vezes, comprometer as propriedades de cura, a densidade de reticulação ou a resistência da ligação (Dazmiri et al., 2019). Da mesma forma, a adição de outros componentes durante a síntese pode melhorar o desempenho quanto às emissões, mas aumentar a viscosidade ou interferir na penetração da resina na madeira. Portanto, são necessárias modificações nos adesivos à base de ureia para reduzir as emissões de formaldeído sem comprometer seu desempenho mecânico de colagem.

A fim de melhorar a qualidade e o desempenho desses adesivos, materiais alternativos precisam ser avaliados. A lignina kraft é um resíduo do processo de produção de celulose kraft. Atualmente, ela é queimada para geração de energia. Entretanto, no conceito de biorrefinaria, seu uso em produtos de alto valor agregado tem sido amplamente estudado para aumentar a sustentabilidade das fábricas de celulose kraft, por meio de um melhor aproveitamento dos resíduos (Demuner et al., 2021).

As ligninas provenientes do processo kraft apresentam tamanhos de partículas da ordem de 10 a 100 µm. Esse tamanho pode prejudicar sua dispersão e seu desempenho quando misturada a outros polímeros (Kim et al., 2017), bem como sua reatividade com o formaldeído (Pizzi, 2018; Zhao et al., 2025) durante a síntese de adesivos. Dessa forma, alguns processos podem ser aplicados para aumentar sua reatividade, como a produção de nanopartículas.

O uso da lignina em escala nanométrica (nanopartículas de lignina) constitui uma alternativa para aumentar a área superficial, facilitando sua dispersão e incorporação. Além disso, ela pode ser quimicamente modificada devido à presença de diversos grupos funcionais, como tióis, álcoois e grupos hidroxila alifáticos e fenólicos, ampliando, assim, seu potencial de aplicação (Melro et al., 2018).

Entretanto, os estudos sobre a síntese e modificação de adesivos ureia-formaldeído utilizando nanolignina ainda são limitados. Em particular, a influência da nanolignina sobre a estrutura do adesivo, o comportamento de cura e o desempenho da colagem ainda não foi completamente compreendida. Além disso, os efeitos da fonte da nanolignina (pinus ou

eucalipto) e do seu nível de incorporação sobre a síntese, as propriedades e o desempenho dos adesivos ureia-formaldeído ainda não foram investigados sistematicamente.

Acredita-se que a adição de nanoligninas possa contribuir para a melhoria do adesivo ureia-formaldeído, principalmente quanto à sua resistência à umidade e à emissão de formaldeído. A redução das emissões de formaldeído é importante para o setor de adesivos e painéis de madeira, uma vez que o formaldeído é carcinogênico (Grupo 1 da IARC) (Iarc, 2011), além de ser irritante para os olhos, a pele e o trato respiratório dos seres humanos (Chen et al., 2025). Assim, o objetivo deste trabalho foi utilizar nanolignina kraft de pinus e eucalipto na síntese de adesivos ureia-formaldeído para a colagem de juntas de madeira, visando melhorar a qualidade e a sustentabilidade do setor de adesivos e painéis de madeira.

2. Material e métodos

Ligninas kraft em pó de *Eucalyptus* sp. e *Pinus* sp., obtidas de fontes industriais e isoladas por precipitação ácida, foram utilizadas neste estudo. As nanoligninas kraft de *Eucalyptus* sp. e *Pinus* sp. foram produzidas por um processo mecânico utilizando um moinho Super Masscolloider Masuko Sangyo (MKCA6-2), operando a 1500 rpm. A distância entre os discos de moagem foi ajustada para 100 µm. Para cada tipo de lignina, foram avaliados dois níveis de processamento, correspondentes ao número de passes pelo moinho (5 e 10 passes). Após a moagem, as suspensões foram centrifugadas a 4000 rpm por 60 min a 10 °C para remover o excesso de água.

A síntese do adesivo ureia-formaldeído controle foi baseada na metodologia descrita por Ferreira (2017). Foi considerada uma razão molar inicial formaldeído:ureia (F:U) de 2,09:1, visando obter uma razão molar final de 1,26:1. Foram adicionados 170 g de formaldeído e 60 g de ureia a um balão tritubulado de fundo chato com capacidade de 500 mL. Essa mistura foi submetida a uma placa de aquecimento sob agitação mecânica constante, em capela de fluxo laminar, equipada com condensador e termômetro. A solução foi aquecida a 90 °C. O pH da solução foi ajustado para 9,0 utilizando NaOH, mantendo-se o aquecimento a 90 °C por 45 minutos. Após esse período, o pH da solução foi ajustado para 5,0 com ácido fórmico. A reação prosseguiu a 90 °C por 15 minutos. Em seguida, foram adicionados 30 g de ureia à solução, mantendo-se a temperatura de 90 °C por mais 20 minutos. O pH da mistura foi ajustado para aproximadamente 8,0, mediante a adição de NaOH, e outros 10 g de ureia foram adicionados à solução. Nessa etapa da síntese, a temperatura foi reduzida para 70 °C, mantendo-se a reação

por 45 minutos. Após esse período, a síntese foi concluída e o adesivo foi resfriado à temperatura ambiente.

Para os adesivos nanolignina-ureia-formaldeído, as nanoligninas liofilizadas foram adicionadas nas proporções de 2, 4, 6, 8 e 10%, em substituição à massa total de ureia a ser utilizada na síntese, sendo adicionadas no início da síntese, conforme descrito por Lopes et al. (2026).

As formulações dos adesivos foram caracterizadas quanto a viscosidade (ASTM, 1998a) e resistência ao cisalhamento da linha de cola, sob condições seca (ASTM D2339-98 (1998b). O ensaio de emissão de formaldeído foi realizado seguindo os procedimentos descritos na norma ASTM (2014), que utiliza o método do dessecador. A quantificação foi obtida por meio do preparo de soluções contendo ácido cromotrópico, em meio fortemente ácido, de acordo com a ASTM (2014).

3. Resultados e discussão

As micrografias de MEV e MET (Figura 1) mostraram a redução do tamanho das partículas das ligninas de pinus e eucalipto, passando da macroescala para a nanoescala. De acordo com as imagens de MEV, as partículas de lignina de eucalipto (Fig. 1A) e pinus (Fig. 1E) apresentam formato irregular, com ampla distribuição de tamanho, encontrando-se em escala micrométrica. A partir da análise das imagens de MET, é possível observar algumas estruturas isoladas em escala nanométrica (com diâmetro inferior a 100 nm), tendendo a apresentar formato aproximadamente esférico para ambos os tipos de nanolignina. As nanopartículas apresentam-se na forma de aglomerados com diferentes formatos, com tamanhos em torno de 200 nm. Nair et al. (2014) e Lopes et al. (2018), utilizando métodos mecânicos para obtenção de nanoligninas (homogeneização mecânica e moinho SuperMassColloder, respectivamente), observaram que as partículas se encontravam em escala nanométrica e na forma de aglomerados, conforme observado neste estudo.

Os tamanhos médios das partículas de lignina de eucalipto após 5 e 10 passes pelo moinho foram de 193,41 e 179,77 nm, respectivamente, correspondendo a uma redução de 13,64 nm. Para a lignina de pinus, os tamanhos médios das partículas após 5 e 10 passes foram de 248,22 e 207,41 nm, respectivamente, representando uma redução de 40,81 nm. O teste de Tukey, ao nível de significância de 5%, revelou diferenças estatisticamente significativas entre os tamanhos das partículas obtidos após 5 e 10 passes para ambos os tipos de lignina, confirmando que o aumento do número de passes no moinho promoveu uma redução adicional

no tamanho das partículas. Entretanto, a magnitude dessa redução diferiu entre as ligninas, sendo substancialmente maior para a lignina de pinus do que para a lignina de eucalipto.

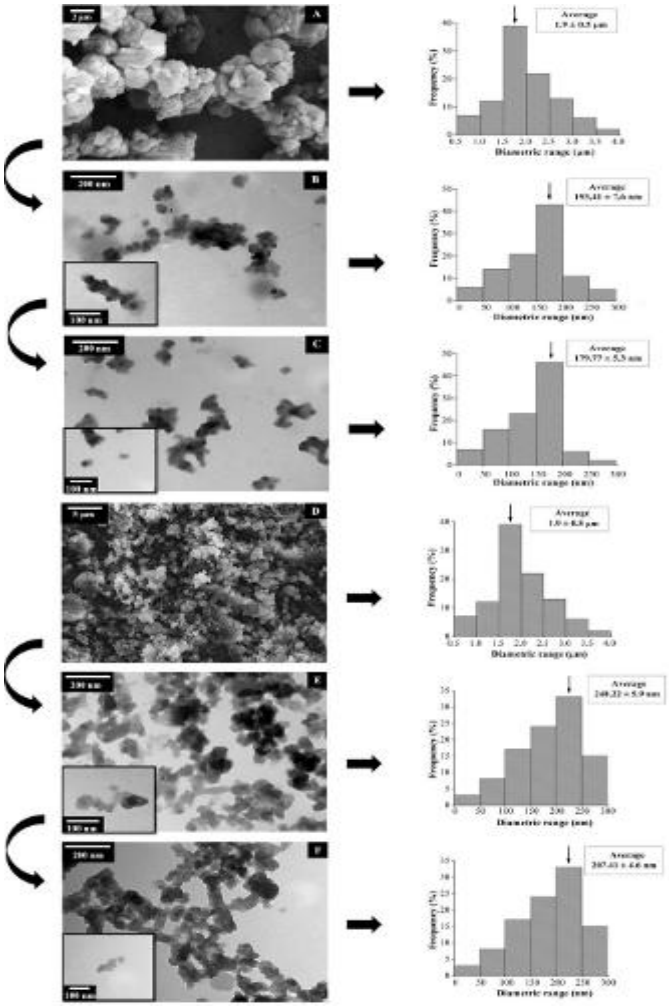


Figura 1 – Micrografias de MEV e MET das ligninas e nanoligninas de eucalipto e pinus e suas respectivas frequências de diâmetro. MEV das partículas de lignina de eucalipto (A) e pinus (D); MET das nanoligninas de eucalipto (B) e pinus (E); MET das nanoligninas de eucalipto (C) e pinus (F) após 10 passes no moinho.

As observações por MET indicaram que ambas as condições de moagem produziram nanopartículas com tendência à formação de aglomerados. Entretanto, não foi observado aumento evidente da aglomeração quando o número de passes no moinho aumentou de 5 para 10. Nas condições de processamento avaliadas, 10 passes no moinho resultaram em uma redução estatisticamente significativa do tamanho das partículas, sem efeitos adversos evidentes sobre a morfologia ou a aglomeração das partículas.

Os adesivos nanoligninas-ureia-formaldeído foram sintetizados com as nanoligninas de eucalipto e pinus (5 e 10 passes no moinho) e os resultados de viscosidade estão apresentados na Figura 2. À medida que aumentou a porcentagem de nanolignina adicionada às sínteses, os

valores de viscosidade também aumentaram. Durante a síntese, a etapa ácida exerce forte influência sobre a viscosidade final do adesivo. Nessa fase, são formadas ligações metileno e metileno-éter entre as unidades de ureia. Isso resulta na formação de moléculas poliméricas de ureia-formaldeído com massa molecular média a alta, aumentando a viscosidade da formulação (Luckman et al., 2021).

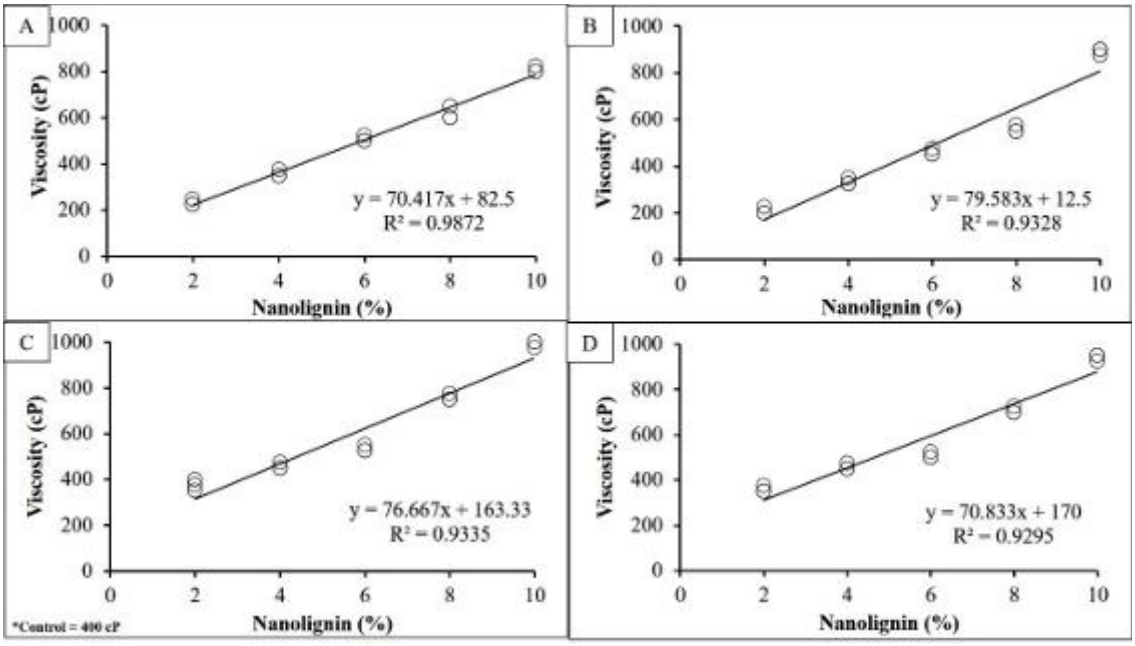


Figura 2 – Valores médios de viscosidade dos adesivos ureia-formaldeído modificados em função das adições de nanoligninas: A) nanolignina de pinus: 5 passes; B) nanolignina de pinus: 10 passes; C) nanolignina de eucalipto: 5 passes; D) nanolignina de eucalipto: 10 passes.

O tempo da etapa ácida foi o mesmo para todos os adesivos. Dessa forma, as formulações com maiores porcentagens de nanoligninas apresentaram maior grau de condensação, resultando, consequentemente, em adesivos mais viscosos. Os valores de viscosidade das formulações contendo nanoligninas de eucalipto foram superiores aos das formulações produzidas com nanoligninas de pinus. O tamanho das partículas de nanoligninas incorporadas pode afetar a viscosidade do adesivo (Sanghvi et al., 2022). Partículas menores e com menor formação de aglomerados, como observado para a nanolignina de eucalipto, proporcionam maior área superficial específica, aumentando as interações com a matriz da resina UF.

Os valores de resistência ao cisalhamento (em condição seca) dos adesivos de ureia-formaldeído modificados são apresentados na Figura 3. Os valores médios de resistência ao cisalhamento dos adesivos formulados com 4% de nanolignina de eucalipto e 6% de nanolignina de pinus foram significativamente superiores aos do controle (3,72 Mpa),

independentemente do número de passagens no moinho. A resistência ao cisalhamento desses adesivos aumentou, em média, 10% em relação ao controle. A madeira maciça de pinus (6,91 MPa), utilizada para confeccionar as juntas coladas, apresentou resistência ao cisalhamento superior à das juntas de madeira coladas. Melhores resultados foram obtidos com o eucalipto, provavelmente porque suas partículas, menores e mais uniformes, favorecem a interação com a resina, melhorando a adesão e a dispersão no sistema adesivo.

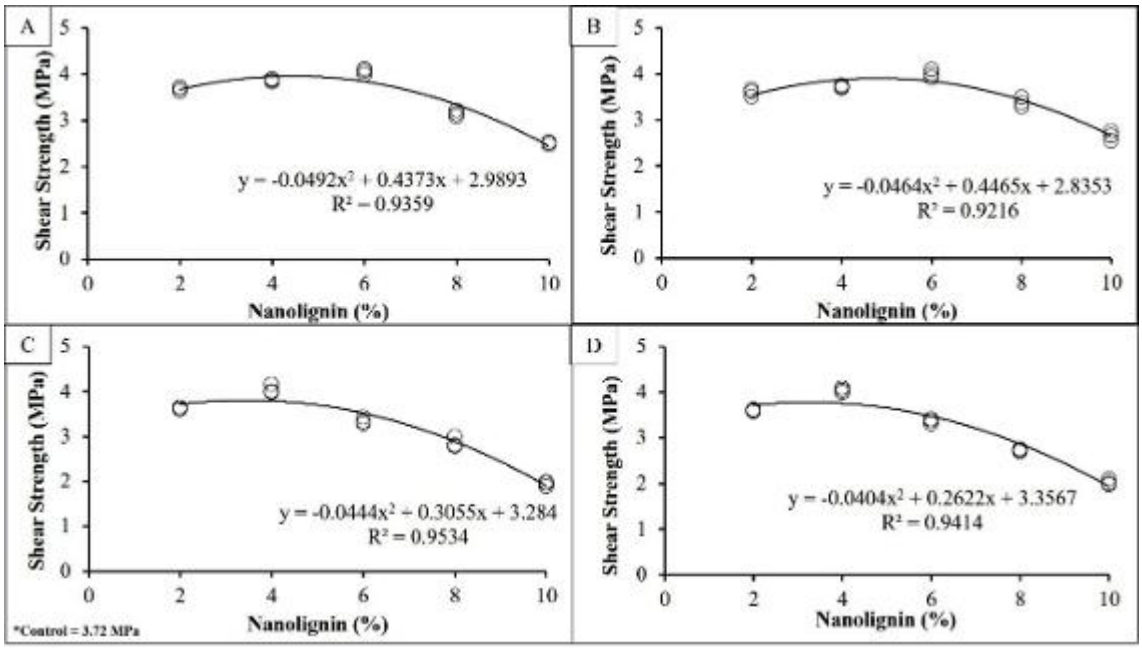


Figura 3 – Valores médios de resistência ao cisalhamento (condição seca) dos adesivos ureia-formaldeído modificados em função das adições de nanoligninas: A) Nanolignina de pinus: 5 passes; B) Nanolignina de pinus: 10 passes; C) Nanolignina de eucalipto: 5 passes; D) Nanolignina de eucalipto: 10 passes.

Os adesivos com melhores resultados de resistência ao cisalhamento foram submetidos ao teste de emissão de formaldeído, onde foi observado uma redução da emissão redução na emissão de formaldeído nos adesivos produzidos com nanoligninas, em comparação com o adesivo controle (Figura 4).

Para o adesivo controle (UF), a emissão de formaldeído foi de 1,99 mg/L. Para os adesivos E5P 4% e P5P 6%, as emissões foram de 0,43 e 0,48 mg/L, respectivamente, correspondendo a uma redução média de aproximadamente 75% nas emissões. Ambos foram classificados na classe E0 pela norma chinesa GB 18580 (2001), caracterizada pela classe de menor emissão de formaldeído, e na classe F*** pela norma japonesa JAS 233 (2003), que estabelece emissão ≤ 0,5 mg/L pelo método do dessecador.

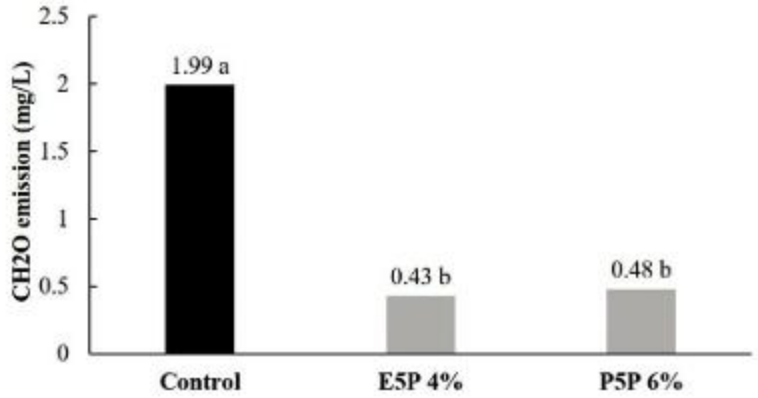


Figura 4 – Emissão de formaldeído pelos adesivos. Controle (adesivo ureia-formaldeído); E5P 4% (adesivo com 4% de nanolignina de eucalipto – 5 passes); P5P 6% (adesivo com 6% de nanolignina de pinus – 5 passes).

As reduções nas emissões de formaldeído obtidas para os adesivos produzidos com nanoligninas podem estar associadas à menor higroscopicidade das nanoligninas em comparação à ureia, reduzindo a hidrólise das ligações existentes nos adesivos, bem como ao maior número de ligações cruzadas formadas entre suas cadeias (Artner et al., 2020). Como resultado, ocorre menor liberação de moléculas de formaldeído durante a formação da rede tridimensional, além do aumento da resistência mecânica ao cisalhamento das juntas coladas, conforme verificado.

4. Conclusões

As adições de nanoligninas kraft de pinus e eucalipto na síntese do adesivo ureia-formaldeído promoveram um aumento nos valores de viscosidade. Entre os tratamentos avaliados, as formulações contendo 4% de nanolignina de eucalipto (E5P 4%) e 6% de nanolignina de pinus (P5P 6%), ambas produzidas com cinco passes de moagem, apresentaram o melhor desempenho geral. Esses tratamentos aumentaram a resistência ao cisalhamento em até 10% sob condições secas, em comparação com o adesivo controle.

As reduções nas emissões de formaldeído foram de até 75% com as adições de E5P 4% e P5P 6%. A incorporação de nanoligninas ao adesivo ureia-formaldeído promoveu melhorias na qualidade do adesivo e possibilitou a substituição parcial da ureia por um recurso renovável. Outro aspecto de destaque é a sustentabilidade, decorrente da redução nas emissões de formaldeído.

De modo geral, os resultados demonstram que nanoligninas kraft podem ser incorporadas aos adesivos UF em concentrações adequadas para reduzir as emissões de

formaldeído, mantendo ou melhorando o desempenho de colagem nas condições avaliadas neste estudo.

5. Agradecimentos

Agradecemos o apoio financeiro da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG), do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES).

6. Referências bibliográficas

American Society for Testing and Materials. (1998a). *D1084-97: Standard test methods for viscosity of adhesives*. ASTM International.

American Society for Testing and Materials. (1998b). *D2339-98: Standard test method for strength properties of adhesives in two-ply wood construction in shear by tension loading*. ASTM International.

American Society for Testing and Materials. (2014). *D5582-14: Standard test method for determining formaldehyde levels from wood products using a desiccator*. ASTM International.

Artner, M. A. (2020). *Incorporation of microfibrillated cellulose during synthesis of urea-formaldehyde adhesive.* Tese de doutorado. Universidade Federal do Paraná

Chen, L., Long, Y., Huang, B., Sun, C., Kang, S., & Wang, Y. (2025). Technological innovations review in reducing formaldehyde emissions through adhesives and formaldehyde scavengers for building materials. *Environmental Research*, 121242. https://doi.org/10.1016/j.envres.2025.121242

Dazmiri, M. K., Kiamahalleh, M. V., Dorieh, A., & Pizzi, A. (2019). Effect of the initial F/U molar ratio in urea-formaldehyde resins synthesis and its influence on the performance of medium density fiberboard bonded with them. *International Journal of Adhesion and Adhesives, 95*, 102440.

Demuner, I. F., Gomes, F. J. B., Gomes, J. S., Coura, M. R., Borges, F. P., Carvalho, A. M. M. L., & Silva, C. M. (2021). Improving kraft pulp mill sustainability by lignosulfonates production from processes residues. *Journal of Cleaner Production, 317*, 128286. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128286

Ferreira, J. C. (2017). *Sínteses de adesivos de ureia-formaldeído com adição de lignina kraft e celulose nanocristalina.* Tese de doutorado. Universidade Federal de Viçosa

International Agency for Research on Cancer. (2011). International Agency for Research on Cancer monographs on the identification of carcinogenic hazards to humans. *IARC Monographs Newsletter*, 1–102.

Japanese Agricultural Standard. (2003). *JAS 233: Japanese Agricultural Standard for plywood —MAFF Notification No. 233*.

Kim, D., Cheon, J., Kim, J., Hwang, D., Hong, I., Kwon, O. H., & Cho, D. (2017). Extraction and characterization of lignin from black liquor and preparation of biomass-based activated carbon there-from. *Carbon Letters, 22*, 81–88. https://doi.org/10.5714/CL.2017.22.081

Lopes, M. S. (2018). *Obtaining and characterizing lignins and nanoparticles of Klason and kraft lignin*. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Viçosa

Lopes, T. A., Carneiro, A. D. C. O., Vieira, T. S., Tonoli, G. H. D., Demuner, I. F., Coura, M. R., ... Jesus, M. (2026). Urea–formaldehyde synthesis with kraft lignin nanoparticles and effects on formaldehyde emissions. *Processes, 14*(14), 2243.

Luckman, S. S., Cunha, A. B., Rios, P. D., & Zanatta, P. (2021). Influence of the incorporation of kraft lignin to the urea-formaldehyde adhesive on the technological properties of conventional chipboards. *Scientia Forestalis, 49*, 131–144. https://doi.org/10.18671/scifor.v49n131.10

Melro, E. A. L., Antunes, F. E., & Medronho, B. (2018). A brief overview on lignin dissolution. *Journal of Molecular Liquids, 265*, 578–584. https://doi.org/10.1016/j.molliq.2018.06.021

Nair, S. S., Sharma, S., Pu, Y., Sun, Q., Pan, S., Zhu, J. Y., & Ragauskas, A. J. (2014). High shear homogenization of lignin to nanolignin and thermal stability of nanolignin–polyvinyl alcohol blends. *ChemSusChem, 7*, 3513–3520. https://doi.org/10.1002/cssc.201402314

Pizzi, A., & Mittal, K. L. (2018). *Handbook of adhesive technology* (3rd ed.). CRC Press.

Ridho, M. R., Lubis, M. A. R., Nawawi, D. S., & Fatriasari, W. (2024). Optimization of areca leaf sheath nanolignin synthesis by a mechanical method for in situ modification of ultra-low molar ratio urea-formaldehyde adhesives. *International Journal of Biological Macromolecules*. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.132614

Sanghvi, M. R., Tambare, O. H., & More, A. P. (2022). Performance of various fillers in adhesives applications: A review. *Polymer Bulletin, 79*(12), 10491–10553.

Wang, Q. Q., Zhu, J. Y., Gleisner, R., Kuster, T. A., Baxa, U., & McNeil, S. E. (2012). Morphological development of cellulose fibrils of a bleached eucalyptus pulp by mechanical fibrillation. *Cellulose, 19*, 1631–1643. https://doi.org/10.1007/s10570-012-9745-x

Zhao, D., Li, Z., Zhang, Y., & Fu, P. (2025). The role of lignin in adhesives for lignin-based formaldehyde-based resins: A review. *Biomass Conversion and Biorefinery, 15*, 16307–16341. https://doi.org/10.1007/s13399-024-06397-1

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Taninos florestais no Brasil: aplicações biotecnológicas em adesivos sustentáveis e tratamento de efluentes

Elaine Cristina Alves da Silva[1], Átila Bruno de Moraes Almeida[1], Bruna Rafaella Ferreira da Silva[2], Andreza Martins Pontes dos Santos[1], Kayo Lucas Batista de Paiva[1]; Paula Evanyn Pessoa do Nascimento[1]; Denys Santos de Souza[1], Tatiane Kelly Barbosa de Azevedo Carnaval[1]

[1] Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN)
[2] Universidade Federal de Campina Grande (UFCG)

Resumo: A transição para a bioeconomia destaca os taninos florestais como polímeros versáteis para a substituição de insumos fósseis e minerais. Este trabalho teve como objetivo analisar a eficiência e as aplicações tecnológicas de taninos florestais no Brasil, focando em adesivos para painéis de madeira e coagulantes para tratamento de águas e efluentes. A busca bibliográfica compreendeu o período de 2006 a 2026 na base da Scopus. Na indústria madeireira, a adição de nanolignina e nanofibrilas de celulose em resinas tânicas reduz emissões de formaldeído e reduzir a viscosidade e aumentar a resistência mecânica da colagem de painéis. No saneamento, os coagulantes tânicos cationizados removem mais de 90% da turbidez e cor de águas e efluentes, sem alterar o pH e gerando lodo biodegradável sem metais pesados. Os taninos florestais consolidam-se como uma alternativa sustentável, promovendo maior resistência e menor toxicidade na indústria de painéis e garantindo o tratamento eficaz e ecológico de águas e efluentes.

Palavras-chave: Biorrefinaria; Resinas biobaseadas; Sustentabilidade

Forest tannins in Brazil: biotechnological applications in sustainable adhesives and wastewater treatment

Abstract: The transition to a bioeconomy highlights forest tannins as versatile polymers for the replacement of fossil and mineral inputs. This study aimed to analyze the efficiency and technological applications of forest tannins in Brazil, focusing on adhesives for wood panels and coagulants for water and wastewater treatment. The bibliographic search covered the period from 2006 to 2026 in the Scopus database. In the wood industry, the addition of nanolignin and cellulose nanofibrils to tannin resins reduces formaldehyde emissions, lowers viscosity, and enhances the mechanical bonding strength of panels. In sanitation, cationized tannin-based coagulants remove over 90% of turbidity and color from water and wastewater without altering the pH and generating biodegradable sludge free of heavy metals. Forest tannins establish themselves as a sustainable alternative, promoting higher strength and lower toxicity in the panel industry while ensuring effective, eco-friendly water and wastewater treatment

Keywords: Biorefinery; Bio-based resins; Sustainability.

1. Introdução

A transição global para uma bioeconomia circular e de baixo carbono impulsiona a busca por matérias-primas renováveis capazes de substituir insumos de origem fóssil em processos industriais e ambientais (Dias, 2025). Nesse cenário, a biorrefinaria florestal destaca-se pelo aproveitamento integral da biomassa, valorizando não apenas a madeira serrada e a celulose, mas também os produtos não madeireiros, como as cascas de árvores originadas do manejo e do processamento industrial (Cademartori, et al., 2026).

Dentre os extrativos vegetais presentes nas cascas, os taninos representam uma classe promissora de biopolímeros polifenólicos (Borges et al., 2023). Historicamente associados ao setor de curtumes, os taninos condensados possuem características químicas únicas, como elevado teor de anéis aromáticos, reatividade com aldeídos e capacidade de complexação de partículas coloidais, que os posicionam como plataformas biotecnológicas versáteis no Brasil (Borges et al., 2025).

No contexto brasileiro, a abundância de maciços florestais de espécies exóticas cultivadas (como *Acacia mearnsii* e *Eucalyptus* spp.) (Pasa et al., 2022, Bonfatti Júnior e Lengowski, 2022) e o elevado potencial de espécies nativas (como *Mimosa tenuiflora* e *Stryphnodendron adstringens*) (Almeida et al., 2024; Dias et al., 2026; Mori et al., 2003;) oferecem suporte para a expansão do uso industrial dos taninos. Duas frentes destacam-se como prioritárias para a sustentabilidade e a inovação tecnológica no país: o desenvolvimento de adesivos para a indústria de painéis de madeira reconstituída (em substituição às resinas sintéticas tóxicas) e a formulação de coagulantes/floculantes orgânicos para o clareamento de águas de abastecimento e purificação de efluentes industriais (em substituição aos sais metálicos convencionais).

Apesar da crescente produção científica sobre o tema, faz-se necessário sintetizar os avanços recentes e as limitações operacionais dessas duas aplicações no Brasil, identificando como a modificação química e a incorporação de aditivos têm impulsionado a eficiência desses biopolímeros.

Diante do exposto, o objetivo deste trabalho foi realizar uma revisão da literatura sobre o panorama das aplicações tecnológicas e a eficiência de taninos obtidos de espécies florestais no Brasil, delimitando a investigação aos eixos de adesivos sustentáveis para painéis de madeira e coagulantes/floculantes para o tratamento de águas e efluentes.

2. Material e métodos

O presente trabalho consiste em uma revisão de literatura, de caráter qualitativo e exploratório, estruturada para mapear o panorama tecnológico e a eficiência da utilização de taninos obtidos de espécies florestais no Brasil.

A busca bibliográfica compreendeu o período de 2006 a 2026 na base de dados da Scopus. Foram empregados descritores em português e inglês combinados por operadores booleanos (AND/OR), associando os termos centrais (*"tanino"* / *"tannin"* e *"Brasil"* / *"Brazil"*) a temas relacionados ao aproveitamento tecnológico e sustentável da biomassa florestal não madeireira, tais como: *"biorrefinaria"* / *"biorefinery"*, *"adesivo"* / *"adhesive"*, *"painéis de madeira"* / *"wood panels"*, *"coagulação"* / *"coagulation"* e *"tratamento de água e efluentes"* / *"water and wastewater treatment"*.

Foram estabelecidos como critérios de inclusão artigos originais e revisões que abordassem a extração, modificação química (como cationização e sulfitação) e aplicação prática de taninos de espécies nativas e exóticas cultivadas no país, focados estritamente nas frentes de colagem de madeira e clarificação/tratamento de matrizes hídricas.

Publicações focadas exclusivamente na caracterização fitoquímica isolada, preservação de madeiras, uso farmacológico, medicinal, cosmético ou alimentício foram desconsideradas para garantir o direcionamento do estudo e o aprofundamento das duas temáticas centrais.

As informações selecionadas foram categorizadas criticamente e organizadas nos dois eixos temáticos propostos para a fundamentação dos resultados e discussão.

3. Resultados e Discussão

3.1. Adesivos e resinas sustentáveis para painéis de madeira

A busca por alternativas aos adesivos sintéticos derivados do petróleo, como as resinas fenol-formaldeído (PF), ureia-formaleno (UF) e melamina-formaleno (MF), representa um dos pilares mais ativos da biorrefinaria florestal. O uso extensivo de resinas sintéticas tradicionais enfrenta crescentes pressões ambientais e regulatórias devido à elevada toxicidade,

volatilidade e emissão de formaldeído livre durante o processo de prensagem e ao longo da vida útil dos painéis reconstituídos (Gonçalves et al., 2016).

Nesse cenário, os taninos condensados (ou proantocianidinas) destacam-se como os principais substitutos para a formulação de resinas adesivas. A estrutura química dos taninos condensados, composta por unidades flavonoides altamente reativas com anéis aromáticos ricos em hidroxilas, confere a essas moléculas um comportamento químico análogo ao do fenol sintético (Carvalho, 2013).

A aplicação de matrizes tânicas na fabricação de painéis de madeira (como compensados, painéis de partículas/MDP e painéis de fibras/MDF) apresenta diversas vantagens operacionais significativas, como a redução na emissão de voláteis (VOCs), a substituição parcial ou total do fenol sintético por tanino reduz drasticamente a liberação de formaldeído, alinhando a produção de painéis às exigências de qualidade do ar de ambientes interiores (Tostes et al., 2024).

A consolidação dos taninos como matrizes adesivas no Brasil abrange desde a otimização da tradicional *Acacia mearnsii* (Barbosa et al., 2000; Baldin et al., 2016; Souza et al., 2017; Lourenço et al., 2025) até o aproveitamento de espécies nativas e adaptadas, como *Mimosa tenuiflora* (Azevedo et al., 2015; Silva et al., 2022), *Acacia mangium* (Souza et al., 2020), *Stryphnodendron adstringens* (Zidane et al., 2024) e *Myrcia splendens* (Rodrigues et al., 2025).

A literatura evidencia que, embora extratos brutos, não modificados quimicamente, alcancem desempenho mecânico satisfatório em painéis de madeira engenheirada (*Cross-Laminated Timber* - CLT) e compensados para uso interno (Souza et al., 2020; Silva et al., 2022), a superação de gargalos históricos, como a alta viscosidade e a fragilidade da linha de cola, exige estratégias de modificação química ou incorporação de aditivos funcionais.

Nesse contexto, estudos pioneiros e contemporâneos demonstram que a flexibilização macromolecular com ésteres adípicos (Barbosa et al., 2000), a introdução de nanolignina para ganho de hidrofobicidade (Lourenço et al., 2025), o reforço com nanofibrilas de celulose (Rodrigues et al., 2025) e a inclusão de cinzas de resíduos agrícolas ricos em sílica (Zidane et al., 2024) potencializam a reologia do adesivo e a resistência mecânica da colagem.

Todavia, observa-se que a eficiência da resina tânica apresenta limites operacionais, tais como baixa resistência mecânica da matéria-prima e baixa capacidade de compactação ao ser aplicada a matrizes de alta fragilidade estrutural, como o capim-annoni ou a casca de arroz (Baldin et al., 2016; Souza et al., 2017). Bem como variações físico-químicas decorrentes do

período de coleta da casca (Azevedo et al., 2015), reforçando a necessidade de padronização do extrato para a escala industrial.

Apesar dos avanços, a literatura sinaliza gargalos técnicos que ainda exigem otimização, como a alta viscosidade de extratos tânicos em elevadas concentrações de sólidos e o tempo de montagem mais curto quando comparado às resinas sintéticas puras. O ajuste de variáveis de processo, tais como o pH da emulsão, temperatura de prensagem, teor de sólidos e adição de catalisadores, permanece como o foco central para viabilizar o uso amplo dos adesivos tânicos em escala industrial no Brasil.

3.2. Coagulantes e biopolímeros orgânicos para tratamento de águas e efluentes

A utilização de biopolímeros vegetais no saneamento e na gestão ambiental de efluentes industriais surge como uma alternativa sustentável e de alto desempenho frente aos coagulantes metálicos convencionais, como o sulfato de alumínio, o cloreto e o sulfato ferroso. Embora os sais inorgânicos sejam historicamente consolidados no mercado, seu uso contínuo gera inconvenientes operacionais e ambientais severos, incluindo a alteração drástica do pH, o aumento do teor de sais solúveis e, principalmente, a geração de grandes volumes de lodo químico contaminado por metais pesados, cujo descarte seguro representa um alto custo econômico (Silva et al., 2026).

Nesse contexto, os coagulantes e floculantes à base de tanino vêm se destacando no cenário nacional. Por serem polímeros orgânicos de origem vegetal, a aplicação desses compostos apresenta vantagens técnicas determinantes para a potabilização de águas de abastecimento público e para a purificação de efluentes da agroindústria, mineração e do setor de papel e celulose.

Os taninos naturais são compostos predominantemente aniônicos ou neutros. Para atuar na coagulação de partículas coloidais (geralmente de carga negativa), os extratos tânicos passam por processos de modificação química, como a reação de Mannich, convertendo-se em taninos cationizados (Santos et al.,2024). Essa modificação permite que o biopolímero atue eficazmente por meio de neutralização de carga e formação de pontes interpartículas, gerando flocos maiores, mais densos e de rápida sedimentação.

Ao contrário do lodo originado por coagulantes de alumínio, que é considerado um resíduo perigoso e sem aplicação agronômica devido à fitotoxicidade do metal, o lodo gerado pelo tratamento com taninos, pode ser totalmente biodegradável e isento de metais solúveis

adicionados, a depender do efluente tratado. Isso viabiliza sua destinação para compostagem ou aplicação direta como condicionador de solo agrícola e biofertilizante (Schmitt et al., 2021).

A aplicação de biopolímeros baseados em taninos no saneamento e na engenharia ambiental consolida-se como uma alternativa de alto desempenho frente aos coagulantes metálicos convencionais (como o sulfato de alumínio), cuja substituição elimina o aporte de sais solúveis e a geração de lodos químicos tóxicos de difícil destinação (Corrugado, 2006; Nardi et al., 2008; Skoronski et al., 2014; Schmitt et al., 2021).

A eficiência destes coagulantes vegetais fundamenta-se na sua alta capacidade de desestabilização coloidal por neutralização de carga e ponte interpartícula, maximizada quando os extratos de espécies como *Terminalia catappa* L. (Silva et al., 2025), *Stryphnodendron adstringens* e *Mimosa tenuiflora* (Silva et al., 2026) passam por processos de cationização, aumentando a densidade de cargas positivas e otimizando a rápida flotação/sedimentação dos flocos.

No contexto da potabilização e clareamento de águas de abastecimento público e de comunidades rurais (Lima et al., 2020), o emprego de formulações comerciais (como o *Tanfloc*) e extratos puros em mananciais de alta turbidez, como os rios Tubarão, Pirapó e Caveiras, atingiram remoções de turbidez e cor aparente superiores a 90-98%, atendendo estritamente aos parâmetros da Portaria de Potabilidade do Ministério da Saúde sem alterar o pH ou consumir a alcalinidade do meio (Skoronski et al., 2014; Bongiovanni et al., 2016; Oliveira et al., 2022). Adicionalmente, Bongiovanni et al. (2016) demonstraram que a associação da coagulação tânica à filtração e cloração minimiza significativamente a formação de precursores de trihalometanos (TTHM), mitigando riscos à saúde pública.

Na esfera dos efluentes agroindustriais e complexos, os taninos comprovam versatilidade e robustez operacional, ao promover o condicionamento e reuso da vinhaça de cana-de-açúcar combinados a sistemas de filtração por membranas (Lebron et al., 2020), alcançam eficiências de remoção de turbidez e cor de até 99,6% com redução drástica da condutividade elétrica em efluentes cervejeiros (Janz et al., 2018), além de ampliarem a remoção de DQO e óleos/graxas no tratamento primário de efluentes de suinocultura e abatedouros avícolas (Nardi et al., 2008; Kunz et al., 2010).

Em síntese, a literatura nacional corroboram que a tecnologia de polímeros tânicos atinge paridade ou superioridade técnica em relação aos sais de alumínio (Schmitt et al., 2021; Silva et al., 2025), apresentando a sustentabilidade e a biodegradabilidade do lodo gerado como o principal diferencial competitivo para a bioeconomia circular.

4. Conclusões

Os taninos de espécies florestais no Brasil apresentam elevada eficiência técnica para a substituição de insumos sintéticos e minerais nos dois eixos analisados.

Na indústria de painéis, as resinas tânicas modificadas reduzem a emissão de formaldeído e garantem alta resistência mecânica à linha de cola. No tratamento de águas e efluentes, os coagulantes tânicos promovem a remoção de turbidez e cor superior a 90% sem alterar o pH da água e gerando lodo biodegradável.

Assim, o aproveitamento de taninos no país consolida-se como uma alternativa viável e sustentável para a valoração da biomassa florestal não madeireira.

5. Referências bibliográficas

Azevedo, T. K. B., Paes, J. B., Calegari, L. & Santini, E. J. Qualidade do tanino de *Mimosa tenuiflora* para produção de adesivo tanino-formaldeído. Ciência Florestal, v. 25, n. 2, p. 487-498, 2015.

Almeida, Á., Braz, R., Azevêdo, T., Sousa, T., Paiva, K., Nascimento, P., Souza, D. Extração com uso de solvente natural e quantificação de taninos condensados de galhos de *Prosopis juliflora* & *Mimosa tenuiflora* (Willd.) Poir. Agropecuária Científica no Semiárido, v. 20, n. 2, p. 167-171, 2024.

Baldin, T., Vidkowski, C., Silveira, A. G., Talgatti, M. & Cazarolli, F. C. Qualidade de painéis aglomerados produzidos com diferentes proporções de madeira e capim-annoni. Revista Brasileira de Ciências Agrárias, v. 11, n. 3, p. 230-237, 2016.

Barbosa, A. P., Pizzi, A., Lissoba, A. D. & De Souza, G. W. Reduction of brittleness of tannin-based adhesives in wood joints. Holz als Roh- und Werkstoff, v. 58, n. 4, p. 233-238, 2000.

Bonfatti Júnior, E. A. & Lengowski, E. C. Modelagem da relação hipsométrica de um plantio misto de *Eucalyptus* spp. em Santa Catarina, Brasil. Cadernos de Ciência & Tecnologia, v. 39, n. 3, p. e27149-e27149, 2022.

Bongiovanni, M. C., Conegero, M. O., Coral, L. A. & Bergamasco, R. Tannin as a natural coagulant in surface water treatment to minimize total trihalomethanes formation. Desalination and Water Treatment, v. 57, n. 45, p. 21230-21238, 2016.

Borges, A. V., Minhoni, R. T. A., Chaves, M. R. M. & Campos, R. T. Eficiência do polímero natural derivado de tanino *Acacia mearnsii* no tratamento de água residuária. Ambciências, v. 2, n. 2, p. 1-12, 2023.

Borges, L. V. B. S., Souza, Y. S., Colim, A. N., Barbosa, H. F. G. & Lourenção, B. Análise de vinhos tintos secos produzidos a partir de diferentes uvas. Intercursos, p. 92-111, 2025.

Cademartori, P. H. G., Ferreira, L. L. B. C., Leite, B., Bento, A. V., Sousa, A. F., Mattos, B. D., Missio, D. A. & Magalhães, W. L. E. Valorização de biomassa florestal no Brasil: inovações em biorrefinarias e oportunidades para uma economia de baixo carbono. Pesquisa Agropecuaria Brasileira, p. e04117-e04117, 2026.

Carvalho, A. G. Utilização de adesivos tânicos de *Stryphnodendron adstringens* (Mart.) Coville em painéis de madeira reconstituída. 2013. 100 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia da Madeira) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2013.

Corrugado, J. A. V. Desenvolvimento de coagulante orgânico a base de tanino para tratamento de água e efluente na indústria de celulose e papel. O Papel, v. 67, n. 8, p. 80-87, 2006.

Dias, M. A. N., Lima, P. S. R., De Sá, R. A., Oliveira, T. B., Paula, T. D. N. A., Lima Junior, H. S., Melo, F. C. S. & Albernaz, M. R. A. Mitigação climática por silvicultura no brasil: carbono, restauração e florestas plantadas para ods 13 e 15. Remunom, v. 2, n. 01, p. 1-30, 2026.

Dias, R. Bioeconomia, inclusão social e sustentabilidade: caminhos para uma transição verde e justa. RECIMA21 - Revista Científica Multidisciplinar, v. 6, n. 3, p. e636303-e636303, 2025.

Gonçalves, F. G., Segundinho, P. G. A., Schayder, L. F., Tinti, V. P. & Santiago, S. B. Avaliação da resistência ao cisalhamento da madeira de *Pinus* sp. coladas em temperatura ambiente. Revista Ciência da Madeira, v. 7, n. 1, p. 1-10, 2016.

Janz, R. A., Môra, R., Lopes, T. P. & Santos, W. D. Eficiência de coagulantes orgânicos e inorgânicos no tratamento de efluente da indústria cervejeira. Revista Brasileira de Gestão Ambiental e Sustentabilidade, v. 5, n. 11, p. 1105-1115, 2018.

Kunz, A., Miele, M. & Steinmetz, R. L. R. Advanced treatment of swine wastewater using a compact physical-chemical and biological process. Water Science and Technology, v. 61, n. 12, p. 3061-3067, 2010.

Lebron, Y. A. R., Moreira, V. R. & Amaral, M. C. S. Vinasse treatment by membrane separation processes combined with tannin coagulation: Technical and economic feasibility evaluation. Separation and Purification Technology, v. 250, p. 117152-117152, 2020.

Lima, R. M. M., Silva, M. M., Santos, E. C. & Medeiros, A. S. Tecnologias simplificadas para o tratamento de água em comunidades rurais do semiárido brasileiro. Revista Virtual de Química, v. 12, n. 6, p. 1540-1552, 2020.

Lourenço, H. M., Ferreira, L. R., Souza, M. H., Bufalino, L. & Mori, F. A. Plywood produced with *Erythrina poeppigiana* veneers bonded with tannin–nanolignin adhesive. Cerne, v. 31, p. e-103546-e-103546, 2025.

Nardi, I. R., Daniel, L. A., Zaiat, M. & De Nolasco, M. A. Assessment of a dissolved air flotation unit treating poultry slaughterhouse wastewater. Resources, Conservation and Recycling, v. 52, n. 5, p. 733-744, 2008.

Mori, F. A., Mori, C. L. S. D. O., Mendes, L. M., Silva, J. R. M. D., Melo, V. M. D. Influência do sulfito e hidróxido de sódio na quantificação em taninos da casca de barbatimão (*Stryphnodendron adstringens*). Floresta e ambiente, v. 10, n. 1, p. 86-92, 2003.

Oliveira, D. C., Schmitt, C. C. & Lisbôa, H. M. Performance of a tannin-based coagulant in surface water clarification and sludge characterization. Environmental Technology, v. 43, n. 12, p. 1805-1816, 2022.

Pasa, D. L., Ximendes, M. C., Souza, P. D. & Farias, J. A. Estimativa de oferta e demanda de *Acacia mearnsii* (acácia-negra) no Rio Grande do Sul, Brasil. Revista do Instituto Florestal, v. 34, n. 1, p. 66-74, 2022.

Rodrigues, E. S., Silva, B. R. F., Paes, J. B., Calegari, L. & Souza, J. B. Development and characterization of natural adhesives from amazonian forest species reinforced with cellulose nanofibrils for wood bonding. International Journal of Biological Macromolecules, v. 334, p. 149094-149094, 2025.

Santos, D., Nascimento, P. E. P., Paiva, K. L. B., Azevedo, H. B. B., Silva, P. L. A. & Azevedo, T. K. B. Eficiência dos taninos de cajueiro anão precoce no tratamento de efluentes. Agropecuária Científica no Semiárido, v. 20, n. 1, p. 15-19, 2024.

Schmitt, C. C., Oliveira, D. C. & Lisbôa, H. M. Natural polymers based on tannins as alternatives to aluminum sulfate in drinking water treatment plants. Cleaner Engineering and Technology, v. 4, p. 100099-100099, 2021.

Silva, A. C., Paes, J. B., Calegari, L. & Souza, J. B. Evaluation of a natural coagulant based on *Terminalia catappa* L. bark extract for water treatment. Ambiente & Água, v. 20, p. e3060-e3060, 2025.

Silva, B. R. F., Paes, J. B., Calegari, L., Souza, J. B. & Azevedo, T. K. B. Properties of cross-laminated timber bonded with an adhesive based on tannins from the bark of *Mimosa tenuiflora* trees. Revista Árvore, v. 46, p. e46020-e46020, 2022.

Silva, B. R. F., Paes, J. B., Calegari, L., Souza, J. B. & Azevedo, T. K. B. Performance of cationized tannins from *Stryphnodendron adstringens* and *Mimosa tenuiflora* barks for turbidity removal in water treatment. Water Environment Research, v. 98, n. 1, p. e70429-e70429, 2026.

Skoronski, E., Freitas, A. M., Souza, M. P. & Joaquim, M. S. Aplicação de tanino extraído de *Acacia mearnsii* no tratamento de água do Rio Tubarão. Ambiente & Água, v. 9, n. 4, p. 718-728, 2014.

Souza, J. B., Paes, J. B., Calegari, L., Silva, B. R. F. & Azevedo, T. K. B. Plywood bonding with an adhesive based on tannins from *Acacia mangium* Wild. bark from trees grown in Northeastern Brazil. Revista Brasileira de Ciências Agrárias, v. 15, n. 4, p. e8659-e8659, 2020.

Souza, J. T., Paes, J. B., Calegari, L. & Azevedo, T. K. B. Avaliação das propriedades físico-mecânicas de painéis de casca de arroz e adesivo tanino-formaldeído. Ciência Florestal, v. 27, n. 3, p. 1001-1014, 2017.

Tostes, A. S., Lelis, R. C. C., Pereira, K. R. M. & Brito, E. O. Colagem de chapas de madeira aglomerada com adesivo uréia-formaldeído (UF) modificado com tanino da casca de *Eucalyptus pellita* F. Muell. Floresta e Ambiente, v. 11, n. 2, p. 14-19, 2024.

Zidanes, U. L., Santos, R. C., Menezes, C. R., Mori, F. A. & Bufalino, L. Utilization of rice production residues as a reinforcing agent in bioadhesives based on polyphenols extracted from the bark of trees from the Brazilian Cerrado biome. International Journal of Biological Macromolecules, v. 253, p. 127813-127813, 2023.

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

TECNOLOGIA DA MADEIRA APLICADA AO ENFRENTAMENTO DE PROBLEMAS SOCIOAMBIENTAIS

Rickson Alves Marques de Oliveira[1]; Maria Gabriela Alves da Cruz[1]; Erica Souto Abreu Lima [1]; Mariana Ferreira S. C. Coimbra[1]; Íris Rodrigues Malheiros[1]; Vanessa Kunz de Azevedo Corrêa[2]; José Henrique Camargo Pace[3]; Natália Dias de Souza [1]

[1]Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro
[2]Prefeitura Municipal de Armação dos Búzios
[3]Universidade de Brasília

Resumo:
Árvores urbanas ajudam a reter poluentes e a melhorar o ambiente das cidades. Com isso, o objetivo deste estudo foi avaliar metais no sistema solo-planta associado a *Clitoria fairchildiana* por espectrometria de absorção atômica. Foram analisados solo, folhas e madeira de quatro árvores da Zona Norte do Rio de Janeiro. Após digestão ácida, foram determinados os teores de Cu, Mn, Ni, Cr, Zn, Cd e Pb e os fatores de bioacumulação e translocação. Todos os fatores de bioacumulação ficaram abaixo de 1, indicando baixa transferência dos metais do solo para os tecidos. Cu, Mn e Zn apresentaram teores mais altos nas folhas do que na madeira. Nos tecidos vegetais, Cr e Cd foram detectados apenas na madeira. Os dados mostram que a madeira amplia a análise feita com folhas e solo e pode ser usada no biomonitoramento de metais. *C. fairchildiana* demonstrou potencial de retenção de poluentes em áreas urbanas.

Palavras-chave: Bioacumulação; Biomonitoramento; Serviços ecossistêmicos.

WOOD TECHNOLOGY APPLIED TO ADDRESSING SOCIO-ENVIRONMENTAL ISSUES

Abstract: Urban trees help retain pollutants and improve city environments. Thus, this study aimed to assess metals in the soil-plant system associated with *Clitoria fairchildiana* using atomic absorption spectrometry. Soil, leaves, and wood from four trees in the North Zone of Rio de Janeiro were analyzed. After acid digestion, Cu, Mn, Ni, Cr, Zn, Cd, and Pb contents and bioaccumulation and translocation factors were determined. All bioaccumulation factors were below 1, indicating low metal transfer from soil to plant tissues. Cu, Mn, and Zn showed higher contents in leaves than in wood. In plant tissues, Cr and Cd were detected only in wood. The data show that wood broadens the assessment based on leaves and soil and can be used for metal biomonitoring. *Clitoria fairchildiana* showed potential for pollutant retention in urban areas. These findings reinforce the important role of urban trees in improving local environmental quality in densely populated cities.

Keywords: Bioaccumulation; Biomonitoring; Ecosystem services.

1. Introdução

Diante dos impactos adversos causados pela atual crise ambiental, como o aumento da morbidade e da mortalidade em áreas urbanas em decorrência do calor excessivo e da poluição do ar tornam-se necessárias medidas capazes de ampliar a resiliência das cidades. Entre as principais iniciativas para enfrentar as mudanças climáticas e a perda da qualidade ambiental, destacam-se as estratégias de adaptação urbana, como mudanças no uso do solo, sequestro de poluentes e neutralização de carbono (MUELLER et al., 2017; SROUR et al., 2024). Tais medidas vêm ganhando destaque na recuperação de parâmetros ambientais aceitáveis e na melhoria da qualidade de vida nas cidades, através de pesquisas do potencial de incorporação e manejo de indivíduos arbóreos, seja em áreas florestadas ou compondo a arborização urbana (HAVU et al., 2024).

A arborização urbana, juntamente com outras áreas vegetadas, desempenha um papel crucial na promoção de qualidade de vida para as populações humanas, prestando um conjunto de serviços ecossistêmicos que proporcionam benefícios ambientais, sociais e estéticos (PLANAU, 2025; BRASIL, 2026). Entre esses benefícios ressaltam-se a melhoria da qualidade do ar, absorvendo poluentes; consolidação de microclimas agradáveis, com sombreamento, regulação da umidade e sequestro de carbono; estímulo ao lazer e à atividade física, reduzindo o aparecimento de doenças relacionadas ao estilo de vida; fornecimento de habitat para a fauna; além da disponibilização de bioprodutos (WOLF et al.,2020; JONES, 2021; LIANG; HUANG, 2023).

Na prática, de modo geral, as árvores são selecionadas para a arborização urbana com base em suas características morfológicas, razões históricas e/ou culturais (CANEVA et al.,2020; AOKI et al., 2023). Prioriza-se as espécies com conformação natural adequada ao local de plantio, rusticidade, desenvolvimento não superficial do sistema radicular, resistência a pragas e doenças, presença de apelo estético e a ausência de desrama natural excessiva (SÆBØ et al., 2003; ELIAS et al., 2020).

Além dessas características, a madeira dessas árvores pode servir como parâmetro para a escolha das espécies, devido à sua capacidade de absorver e reter poluentes ambientais (CUCIUREAN et al., 2024; IŞINKARALAR et al., 2022). Outro fator importante é a ampla distribuição e facilidade de amostragem dessas árvores, tornando a madeira um material estratégico para o monitoramento e remediação da poluição urbana (NABAIS et al., 1999; CARDOSO et al., 2017; MARTIN et al., 2018).

Nesse contexto, a análise química da madeira destaca-se como uma ferramenta importante na avaliação dos serviços ecossistêmicos prestados pelas árvores, sobretudo no que

se refere à capacidade de absorção e estocagem de poluentes. A quantificação dos teores de metais presentes na madeira possibilita compreender o impacto de cada espécie no enfrentamento dos problemas ambientais urbanos, fornecendo subsídios para estratégias de monitoramento da qualidade ambiental e de manejo da arborização (CHAPARRO et al., 2020).

Dessa forma, este estudo teve como objetivo avaliar por espectrometria de absorção atômica (AAS), a distribuição de metais potencialmente tóxicos no sistema solo-planta associado a *Clitoria fairchildiana* R.A. Howard, focando nos fatores de bioacumulação e translocação.

2. Material e métodos

Seleção e coleta do material

O sombreiro (*Clitoria fairchildiana* R.A. Howard) é uma espécie frequentemente utilizada na arborização urbana do município do Rio de Janeiro. Sua seleção para o presente estudo baseou-se na representatividade da espécie no inventário do Plano Diretor de Arborização Urbana da Cidade do Rio de Janeiro (RIO DE JANEIRO, 2015).

Foram amostrados quatro indivíduos da espécie na Zona Norte do Rio de Janeiro, Vila Kosmos (Figura 1), considerando parâmetros dendrométricos de altura total (Ht) e diâmetro à altura do peito (DAP), além de características como inclinação do fuste, bifurcação e lesões/cavidades no fuste (Tabela 1).



Figura 1. *Indivíduos de sombreiro (Clitoria fairchildiana R.A. Howard) (A-D) amostrados.*

Tabela 1*. Parâmetros morfométricos dos indivíduos de Sombreiro (C. fairchildiana, 1-4) amostrados*

Nº de amostra	**1**	**2**	**3**	**4**
Código	CF1	CF2	CF3	CF4
Altura(m)	9	10	12	12
DAP1(cm)	32,5	31,8	41,1	23,2
DAP2(cm)	-	-	12,1	-
DAP3(cm)	-	-	29,9	-

D1	5	5	8	6
D2	3	4	8	6
Informações adicionais	IF	-	FT	-

D1. Diâmetro de copa 1(m). D2. Diâmetro de copa 2 (m). IF. Inclinação do fuste. FT. Fuste trifurcado. LE. Lesão estrutural aparente. FB. Fuste bifurcado.

A amostragem foi estruturada em três compartimentos: folha, madeira e solo. A coleta das amostras foliares foi realizada com auxílio de serrote podador. O solo foi amostrado na projeção da copa das árvores, em profundidade padronizada de 20 cm, utilizando trado helicoidal. Para a obtenção de amostras do fuste, empregou-se trado de incremento, permitindo a retirada de baguetas radiais, na altura padronizada do DAP (1,30 m). Todo o material foi devidamente identificado, acondicionado em recipientes apropriados e posteriormente encaminhado ao laboratório para as análises químicas.

Determinação de metais por espectrometria de Absorção Atômica (AAS) no solo e material vegetal (folhas e madeira)

Os teores pseudototais de Cu, Mn, Ni, Cr, Zn, Cd e Pb no solo e material vegetal foram determinados por digestão ácida conforme o método USEPA 3050B (USEPA, 1996).

Foram coletadas quatro subamostras de solo com o auxílio de trado helicoidal, na camada de 0-20 cm de profundidade, na projeção da copa de cada indivíduo arbóreo avaliado, sendo posteriormente homogeneizadas para a obtenção de uma amostra composta representativa da área. As amostras foram então submetidas ao preparo em ambiente adequado, conforme recomendações para preparo de amostras de solo. O material foi seco ao ar, destorroado manualmente, evitando a fragmentação de constituintes não desejáveis, e peneirado em malha de 100 mesh obtenção da fração terra fina seca ao ar (TFSA). Após o peneiramento, a TFSA de cada amostra foi acondicionada em recipientes devidamente identificados para posterior análise química (TEIXEIRA et al., 2017).

Aproximadamente 1,0 g de solo foi pesado em tubos de digestão e submetido à adição de 10 mL de ácido nítrico concentrado (HNO_3), com aquecimento em bloco digestor a aproximadamente 95 °C por 15 minutos. Após resfriamento, adicionaram-se 5 mL adicionais de HNO_3, mantendo-se o aquecimento por 2 horas. Em seguida, após novo resfriamento, foram adicionados 2 mL de água deionizada e 3 mL de peróxido de hidrogênio (H_2O_2), com aquecimento controlado até cessar a efervescência. Posteriormente, adicionaram-se 10 mL de ácido clorídrico concentrado (HCl), mantendo-se o aquecimento por mais 15 minutos a 95 °C.

Após resfriamento à temperatura ambiente, o volume foi ajustado para 50 mL com água deionizada, seguido de filtração do extrato.

As amostras vegetais (folhas e madeira), previamente secas em estufa até massa constante, foram moídas até obtenção de material homogêneo. Para digestão, aproximadamente 0,5 g de material seco foi submetido à digestão ácida conforme o método USEPA 3050B (USEPA, 1996), com adaptações para matriz orgânica. Inicialmente, adicionaram-se 10 mL de HNO_3 concentrado, mantendo-se aquecimento em bloco digestor a 95 °C por 15 minutos, seguido de digestão por aproximadamente 2 horas. Após resfriamento, adicionaram-se 8 mL de H_2O_2, mantendo-se aquecimento até cessar a efervescência. Ao final do processo, o volume foi ajustado para 50 mL com água deionizada, seguido de filtração.

As concentrações de Cu, Mn, Ni, Cr, Zn, Cd e Pb nos extratos de solo e material vegetal foram determinadas por espectrofotometria de absorção atômica (AAS), utilizando equipamento Varian modelo 55B, com correção de interferências por lâmpada de deutério.

Os fatores de bioacumulação (BAF) e translocação (TF) foram calculados a partir das concentrações de metais no solo, madeira e folhas. O BAF foi determinado pela razão entre a concentração do metal na folha ou na madeira e sua concentração no solo, enquanto o TF foi obtido pela razão entre a concentração na folha e na madeira, conforme metodologias descritas na literatura (PACHURA et al., 2016; GU et al., 2018; AZIZ et al., 2023). Os dados foram apresentados em tabela como média ± desvio padrão, considerando os indivíduos arbóreos analisados.

3. Resultados e discussão

Visando conhecer o comportamento dos metais no sistema solo-planta avaliou-se os fatores de bioacumulação (BAF) e o fator de translocação (TF) (Tabela 2). O BAF expressa o potencial de acumulação a partir do solo, enquanto o TF indica a transferência entre compartimentos, sendo, neste estudo, avaliado da madeira para as folhas (AZIZ et al., 2023).

Tabela 2. Fator de bioacumulação (BAF) e fator de translocação (TF) na espécie sombreiro (CF). Valores expressos como média de BAF e TF por espécie ± desvio padrão. (-) indica valores abaixo do limite de detecção

Metal	BAF folha CF	BAF madeira CF	TF CF
Cu	0,126 ± 0,029	0,089 ± 0,044	1,54 ± 0,34
Mn	0,195 ± 0,097	0,031 ± 0,013	6,83 ± 4,08

Zn	0,070 ± 0,019	0,032 ± 0,007	2,23 ± 0,53
Cr	-	0,201 ± 0,112	-
Cd	-	0,581 ± 0,430	-

De modo geral, os valores de BAF (Planta/Solo) foram inferiores e distantes de 1 para todos os metais, tanto em folha quanto em madeira, indicando baixa bioacumulação e reduzida transferência dos elementos do solo para os tecidos vegetais. Para Cu, Mn e Zn, os valores de TF (Folha/Madeira) foram superiores a 1, o que reflete maiores concentrações nas folhas em relação à madeira. O Mn apresentou o maior valor de TF (6,83 ± 4,08 em CF), porém demostrando alta variabilidade entre indivíduos, seguido por Zn e Cu, que apresentaram valores mais próximos entre si. Para Cr e Cd, não foi possível calcular o TF na maior parte dos casos, pois esses elementos não foram detectados em um dos compartimentos (principalmente nas folhas), estando presentes apenas na madeira, o que sugere a importância do compartimento para análise desses metais no sistema solo-planta. É importante considerar que, apesar dos valores teóricos de suporte para interpretação, a presença de material particulado em abundância no local pode contribuir por deposição atmosférica, influenciando os valores observados nas folhas.

A contaminação por elementos potencialmente tóxicos nas madeiras das espécies estudadas pode estar correlacionada a diferentes fontes. A literatura considera que esses poluentes podem ser incorporados tanto por deposição foliar, com posterior transporte via floema, quanto pela absorção radicular e redistribuição via xilema até a região cambial e demais tecidos lenhosos (BALLIKAYA et al., 2022).

Pesquisa realizada em Ancara (Turquia) avaliou a deposição atmosférica de metais-traço em anéis de crescimento de *Ailanthus altissima* (Mill.) entre 1950 e 2020, evidenciando diferenças significativas entre os compartimentos madeira, casca interna e casca externa. Considerando apenas a madeira, os valores observados foram de Mn (2,6 mg/kg), Cr (0,9 mg/kg), Ni (0,9 mg/kg), Cu (1,2 mg/kg), Zn (1,8 mg/kg) e Cd (0,1 mg/kg) (ISINKARALAR, 2024). Todos os valores foram inferiores aos observados no presente estudo para a espécie sombreiro, com exceção do Ni, que apresentou concentrações abaixo do limite de detecção.

Em estudo realizado por Alahabadi et al. (2017), avaliando a capacidade de diferentes espécies arbóreas (*W. sinensis, C. citrinus, N. morus, S. babylonica, F. excelsior, A. glutinosa, P. deltoides, U. umbraculifera, C. pauciflorus, R. pseudoacacia, P. eldarica, O. europaea, C.*

arizonica e *M. alba*) em acumular metais pesados provenientes do solo e do ar atmosférico em ambiente urbano, foram analisados os fatores de bioacumulação (BAF) foliares para Zn, Cu, Pb e Cd. Os maiores valores de BAF foliar para Zn, Pb e Cd foram observados em *Pinus eldarica* (0,647; 0,227; 0,647, respectivamente), enquanto para Cu o maior valor foi registrado em *Morus alba* (0,280).

A discussão acerca da contaminação por metais torna-se especialmente relevante no contexto dos riscos à saúde humana associados à exposição prolongada a esses elementos. Segundo Briffa *et al.* (2020), elementos como Cr, Mn, Ni, Zn, Cd, Pb e Cu estão relacionados a diferentes efeitos adversos na saúde. O Cr, por exemplo, apresenta reconhecido potencial carcinogênico, estando associado a câncer pulmonar, doenças respiratórias e danos hepáticos e renais. O Mn destaca-se pelos efeitos neurotóxicos, incluindo sintomas semelhantes à Doença de Parkinson. O Ni apresenta associação com doenças respiratórias, distúrbios cardíacos e aumento do risco de câncer pulmonar e nasal. O Zn, embora essencial ao organismo, pode causar alterações gastrointestinais, imunológicas e metabólicas em concentrações elevadas. O Cd relacionado à nefrotoxicidade, danos ao DNA, osteoporose, disfunções renais e câncer. O Pb apresenta forte associação com danos neurológicos, comprometimento cognitivo e alterações no desenvolvimento infantil, enquanto o Cu, em excesso, pode provocar distúrbios hepáticos, renais, hematológicos e neurológicos (BRIFFA *et al.*, 2020).

4. Conclusões

A madeira mostrou-se uma matriz complementar relevante para a avaliação da retenção de metais em áreas urbanas.

As análises de espectrometria de absorção atômica (AAS) demonstraram a presença de metais nos compartimentos solo, folhas e madeira associados a *Clitoria fairchildiana* R.A. Howard. A detecção de elementos como Cu, Cr, Cd, Zn e Mn nos compartimentos avaliados indica que espécies arbóreas urbanas podem atuar na retenção de poluentes ambientais, mesmo em baixas concentrações, apresentando papel relevante na modulação da qualidade ambiental urbana.

5. Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

6. Referências bibliográficas

Alahabadi, A., Ehrampoush, M. H., Miri, M., Ebrahimi Aval, H., Yousefzadeh, S., Ghaffari, H. R., Ahmadi, E., Talebi, P., Abaszadeh Fathabadi, Z., Babai, F., Nikoonahad, A., Sharafi, K., & Hosseini-Bandegharaei, A. (2017). A comparative study on capability of different tree species in accumulating heavy metals from soil and ambient air. Chemosphere, 172, 459–467. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.01.045

Alves, R. H. L., Jardim, I. N., & Hamada, M. O. de S. (2025). Uso de espécies da arborização urbana com potencial bioindicadoras de poluentes metálicos. Meio Ambiente (Brasil), 7(1). https://doi.org/10.66205/mabra.v7i1.488

Aziz, R. A., Yiwen, M., Saleh, M., Salleh, M. N., Gopinath, S. C. B., Giap, S. G. E., Chinni, S. V., & Gobinath, R. (2023). Bioaccumulation and Translocation of Heavy Metals in Paddy (Oryza sativa L.) and Soil in Different Land Use Practices. Sustainability, 15(18), 13426. https://doi.org/10.3390/su151813426

Ballikaya, P., Marshall, J., & Cherubini, P. (2022). Can tree-ring chemistry be used to monitor atmospheric nanoparticle contamination over time? Atmospheric Environment, 268, 118781. https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2021.118781

Brasil. Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima. (2025). Plano Nacional de Arborização Urbana (PlaNAU). https://www.gov.br/mma/pt-br/assuntos/meio-ambiente-urbano-recursos-hidricos-qualidade-ambiental/cidades-verdes-resilientes/areas-verdes-e-arborizacao-urbana/planau

Brasil. Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima. (2026). Coletânea brasileira de arborização urbana: Região Sudeste. Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima.

Briffa, J., Sinagra, E., & Blundell, R. (2020). Heavy Metal Pollution in the Environment and Their Toxicological Effects on Humans. Heliyon, 6(9). https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e04691

Caneva, G., Bartoli, F., Zappitelli, I., & Savo, V.(2020). Street trees in italian cities: story, biodiversity and integration within the urban environment. Rendiconti Lincei. Scienze Fisiche E Naturali, 31(2), 411–417. https://doi.org/10.1007/s12210-020-00907-9

Cardoso, K. M., De Paula, A., Dos Santos, J. S., & Dos Santos, M. L. P. (2017). Uso de espécies da arborização urbana no biomonitoramento de poluição ambiental. Ciência Florestal, 27(2), 535–547. https://doi.org/10.5902/1980509827734

Chaparro, M. A. E., Chaparro, M. A. E., Castañeda-Miranda, A. G., Marié, D. C., Gargiulo, J. D., Lavornia, J. M., Natal, M., & Böhnel, H. N. (2020). Fine air pollution particles trapped by

street tree barks: In situ magnetic biomonitoring. Environmental Pollution, 266, 115229. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.115229

Cuciurean, C. I., Sidor, C. G., Camarero, J. J., Buculei, A., & Badea, O. (2024). Detecting changes in industrial pollution by analyzing heavy metal concentrations in tree-ring wood from Romanian conifer forests. Environmental Research, 252, 118884. https://doi.org/10.1016/j.envres.2024.118884

Elias, G. A., Citadini-Zanette, V., & Santos, R. (2020). Árvores nativas para arborização urbana no sul de Santa Catarina, Brasil. Revista Brasileira de Agroecologia, 15(5), 12. https://doi.org/10.33240/rba.v15i5.22907

Havu, M., Kulmala, L., Lee, H. S., Saranko, O., Soininen, J., Ahongshangbam, J., & Järvi, L. (2024). CO2 uptake of urban vegetation in a warming Nordic city. Urban Forestry & Urban Greening, 94, 128261. https://doi.org/10.1016/j.ufug.2024.128261

Işınkaralar, K., Işınkaralar, Ö., & Şevik, H. (2022). Usability of Some Landscape Plants in Biomonitoring Technique: an Anaysis With Special Regard to Heavy Metals. Kent Akademisi, 15(3), 1413-1421. https://doi.org/10.35674/kent.1078472

Isinkaralar, K. (2022). The large-scale period of atmospheric trace metal deposition to urban landscape trees as a biomonitor. Biomass Conversion and Biorefinery, 14(5), 6455–6464. https://doi.org/10.1007/s13399-022-02796-4

Jones, B. A. (2021). Planting urban trees to improve quality of life? The life satisfaction impacts of urban afforestation. Forest Policy and Economics, 125, 102408. https://doi.org/10.1016/j.forpol.2021.102408

Liang, D., & Huang, G. (2023). Influence of Urban Tree Traits on Their Ecosystem Services: A Literature Review. Land, 12(9), 1699–1699. https://doi.org/10.3390/land12091699

Martin, J. A. R., Gutiérrez, C., Torrijos, M., & Nanos, N. (2018). Wood and bark of Pinus halepensis as archives of heavy metal pollution in the Mediterranean Region. Environmental Pollution, 239, 438–447. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.04.036

Mueller, N., Rojas-Rueda, D., Basagaña, X., Cirach, M., Cole-Hunter, T., Dadvand, P., Donaire-Gonzalez, D., Foraster, M., Gascon, M., Martinez, D., Tonne, C., Triguero-Mas, M., Valentín, A., & Nieuwenhuijsen, M. (2017). Urban and Transport Planning Related Exposures and Mortality: A Health Impact Assessment for Cities. Environmental Health Perspectives, 125(1), 89–96. https://doi.org/10.1289/ehp220

Nabais, C., Freitas, H., & Hagemeyer, J. (1999). Dendroanalysis: a tool for biomonitoring environmental pollution? Science of The Total Environment, 232(1–2), 33–37. https://doi.org/10.1016/s0048-9697(99)00107-2

Pachura, P., Ociepa-Kubicka, A., & Skowron-Grabowska, B. (2015). Assessment of the availability of heavy metals to plants based on the translocation index and the bioaccumulation factor. Desalination and Water Treatment, 57(3), 1469–1477. https://doi.org/10.1080/19443994.2015.1017330

Rio de Janeiro. (2015). Plano Diretor de Arborização Urbana da Cidade do Rio de Janeiro. Prefeitura Municipal do Rio de Janeiro.

Sæbø, A., Benedikz, T., & Randrup, T. B. (2003). Selection of trees for urban forestry in the Nordic countries. Urban Forestry & Urban Greening, 2(2), 101–114. https://doi.org/10.1078/1618-8667-00027

Srour, N., Thiffault, E., & Boucher, J.-F. (2024). Quantifying carbon stocks and functional diversity of roadside ecosystems – A case study in Quebec, Canada. Urban Forestry & Urban Greening, 91, 128163. https://doi.org/10.1016/j.ufug.2023.128163

Teixeira, P. C., Donagemma, G. K., Fontana, A., & Teixeira, W. G. (2017). Manual de métodos de análise de solo (3a ed., rev. e ampl.). Embrapa. http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1085209

United States Environmental Protection Agency. (1996). Acid digestion of sediments, sludges, and soils: EPA method 3050B.

Wolf, K. L., Lam, S. T., McKeen, J. K., Richardson, G. R. A., van den Bosch, M., & Bardekjian, A. C. (2020). Urban Trees and Human Health: A Scoping Review. International journal of environmental research and public health, 17(12), 4371. https://doi.org/10.3390/ijerph17124371

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Teor de taninos condensados em espécies de mangue sob diferentes locais de amostragem

José Ricardo Souza da Silva[1]; Wilkally Críslian Laynne de Moura[1]; Kedma Carla Santana do Nascimento[1]; Denys Santos de Souza[1]; Jéssica Estéfane Silva Chaves[1]; José Lucinaldo Felix[1]; Elaine Cristina Alves da Silva[1]; Tatiane Kelly Barbosa de Azevedo Carnaval[1]

[1] Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN)

Resumo: As condições ambientais dos manguezais podem influenciar a composição dos extratos tânicos. Este trabalho teve como objetivo determinar o teor de sólidos totais (TST), o índice de Stiasny (I) e o teor de taninos condensados (TTC) nas cascas de *Rhizophora mangle* e *Laguncularia racemosa*. Foram amostrados cinco indivíduos de cada espécie presente nas áreas: *R. mangle* e *L. racemosa* na Fazenda SAMISA, em Extremoz-RN, e *L. racemosa* no Parque Solar Ferreiro Torto, em Macaíba-RN. As análises foram realizadas em triplicata, com médias comparadas pelo teste de Tukey a 5%. Na SAMISA, *R. mangle* apresentou TST (29,42%) e TTC (18,43%) superiores aos de *L. racemosa*, sem diferença no índice de Stiasny. Para *L. racemosa*, o índice foi menor no Ferreiro Torto (43,63%) que na SAMISA (66,34%), enquanto TST e TTC não diferiram. Conclui-se que *R. mangle* apresentou maior potencial tanífero na SAMISA e que a diferença entre os locais para *L. racemosa* ocorreu apenas no índice de Stiasny.

Palavras-chave: compostos fenólicos; extrativos vegetais; manguezal.

Condensed Tannin Content in Mangrove Species Across Different Sampling Sites

Abstract: Mangrove environmental conditions may influence the composition of tannin extracts. This study determined total solids content (TSC), Stiasny index (SI), and condensed tannin content (CTC) in the bark of *Rhizophora mangle* and *Laguncularia racemosa*. Five individuals per species and site were sampled: *R. mangle* and *L. racemosa* at SAMISA Farm, in Extremoz-RN, and *L. racemosa* at Ferreiro Torto Solar Park, in Macaíba-RN, Brazil. Analyses were performed in triplicate, and means were compared using Tukey's test at 5%. At SAMISA, *R. mangle* showed higher TSC (29.42%) and CTC (18.43%) than *L. racemosa*, whereas SI did not differ. For *L. racemosa*, SI was lower at Ferreiro Torto (43.63%) than at SAMISA (66.34%), while TSC and CTC did not differ. *R. mangle* showed greater tannin-producing potential at SAMISA, and the difference between sites for *L. racemosa* was restricted to SI.

Keywords: phenolic compounds; plant extractives; mangrove.

1. Introdução

Os manguezais constituem ecossistemas costeiros situados na interface entre os ambientes terrestre e marinho, cuja vegetação está submetida à inundação periódica pelas marés, à salinidade, à baixa disponibilidade de oxigênio no sedimento e a variações na disponibilidade de

nutrientes. Esses fatores atuam conjuntamente e influenciam o estabelecimento, o crescimento e as respostas fisiológicas das espécies vegetais presentes nesses ecossistemas (KRAUSS et al., 2008). Como a intensidade dessas condições pode variar entre diferentes áreas de mangue, indivíduos de uma mesma espécie podem apresentar respostas distintas. Além disso, fatores como disponibilidade hídrica e nutricional, sazonalidade e local de coleta podem estar relacionados a variações nos teores de taninos vegetais (MONTEIRO et al., 2005).

Entre os metabólitos secundários produzidos pelas plantas, destacam-se os taninos, compostos fenólicos encontrados em diferentes órgãos vegetais, como folhas, frutos, sementes, madeira e cascas. Uma de suas principais propriedades é a capacidade de estabelecer interações com proteínas e outras macromoléculas, característica relacionada às suas funções biológicas e ao seu emprego como agentes tanantes (MONTEIRO et al., 2005). Esses compostos são classificados principalmente em hidrolisáveis e condensados e desempenham funções relacionadas à defesa contra herbívoros e organismos patogênicos e à proteção dos tecidos vegetais. Além de sua importância ecológica, apresentam potencial de aplicação no curtimento de couros, no tratamento de águas e efluentes e na produção de adesivos e outros produtos de origem vegetal (AZEVÊDO et al., 2017). Diante dessas aplicações, torna-se relevante investigar fontes vegetais de taninos presentes nos manguezais.

Rhizophora mangle, conhecida como mangue-vermelho, e *Laguncularia racemosa*, denominada mangue-branco, estão entre as espécies características dos manguezais brasileiros e são reconhecidas pela presença de substâncias tânicas. Ao avaliarem folhas dessas espécies provenientes de diferentes localidades da costa brasileira, Godoy et al. (1997) identificaram elevados teores de taninos e variações entre os locais de coleta. Ferreira et al. (2011), por sua vez, constataram atividade antibacteriana em extratos da casca, das folhas e das raízes de *R. mangle*, demonstrando o potencial biológico da espécie.

Além das diferenças entre espécies e órgãos vegetais, as condições do local de desenvolvimento podem estar associadas a variações na composição química das plantas. González-Ocampo et al. (2022) observaram diferenças nos teores de compostos fenólicos e flavonoides de *R. mangle* entre lagoas costeiras submetidas a distintas condições ambientais, indicando que a composição química da espécie pode variar entre localidades.

Nesse contexto, a avaliação de cascas provenientes de diferentes áreas de mangue pode contribuir para a compreensão da variabilidade dos extratos tânicos e para a identificação de espécies com potencial de aproveitamento tecnológico. Assim, este trabalho teve como objetivo determinar o teor de taninos provenientes de árvores coletadas em duas diferentes áreas de manguezais no estado do Rio Grande do Norte.

2. Material e métodos

Foram coletadas amostras de casca do fuste de cinco indivíduos saudáveis de cada espécie presente em cada área. Na Fazenda SAMISA, em Extremoz-RN, foram amostradas *Rhizophora mangle* e *Laguncularia racemosa*. No Parque Solar Ferreiro Torto, em Macaíba-RN, foi amostrada apenas a *L. racemosa.* A coleta foi realizada sem comprometer a integridade das árvores.

Os solos das áreas de coleta são predominantemente classificados como Gleissolos, caracterizados por excesso de água; Organossolos, ricos em matéria orgânica; e Neossolos Flúvicos, formados recentemente por sedimentos aluviais, conforme o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SiBCS) (EMBRAPA, 2018). Em relação às condições climáticas, o município de Macaíba-RN apresenta clima de transição entre os tipos As e BSw, segundo a classificação de Köppen, com temperatura média anual de 27,1 °C, umidade relativa do ar em torno de 76% e precipitação variando entre 863,7 mm e 1.070,7 mm. Já o município de Extremoz-RN possui clima tropical chuvoso com verão seco, classificado como As ou Aw, com temperatura média anual variando entre 26,0 °C e 26,3 °C, máximas em torno de 30 °C, elevada umidade relativa do ar ao longo do ano e precipitação anual superior a 1.225 mm, podendo alcançar até 1.583,5 mm, concentrada principalmente entre os meses de abril e julho, conforme dados do IDEMA (2013).

Após a coleta, as cascas foram secas em casa de vegetação. Para cada combinação entre espécie e local, o material proveniente dos cinco indivíduos foi reunido, triturado em forrageira e homogeneizado, formando três amostras compostas: *R. mangle* da Fazenda SAMISA, *L. racemosa* da Fazenda SAMISA e *L. racemosa* do Parque Solar Ferreiro Torto. O material de cada amostra composta foi peneirado, utilizando-se a fração que passou pela peneira de 0,600 mm e ficou retida na peneira de 0,425 mm.

O material foi homogeneizado e seu teor de umidade em base seca foi determinado para uso nos cálculos. Para essa determinação, uma amostra de 2,0 g do material peneirado foi colocada em cadinho de porcelana de 50 mL e levada à estufa a 103 ± 2 °C por 24 horas. Em seguida, foram

retiradas três porções de 25 g de cada amostra composta, correspondentes às repetições laboratoriais do material seco e peneirado. Cada porção foi transferida para um recipiente de fundo chato com capacidade de 500 mL, ao qual foram adicionados 250 mL de água destilada, sendo posteriormente submetida à fervura sob refluxo por duas horas. O procedimento foi realizado separadamente para cada porção de 25 g. Ao final, o material foi passado por peneira de 0,105 mm para remoção das partículas de serragem. O extrato obtido foi filtrado em cadinho de porosidade 2, para retirada das impurezas, e concentrado para 250 mL. Dessa solução concentrada, foram retiradas três alíquotas de 50 mL: duas destinadas à determinação do teor de taninos condensados (TTC); e uma evaporada em estufa a 103 ± 2 °C por 48 horas, para determinação do teor de sólidos totais (TST) conforme a Equação 1.

$$\%TST = \frac{(Mi - Mf)}{Mi} \times 100 \quad \text{(Equação 1)}$$

Em que: TST = teor de sólidos totais (%); Mi = massa inicial (g); Mf = massa final, após secagem (g).

O índice de Stiasny foi determinado conforme Zheng et al. (1991), com algumas alterações. Aos 50 mL do extrato bruto foram adicionados 4 mL de formaldeído e 1 mL de HCl concentrado. Em seguida, a mistura foi submetida à fervura sob refluxo por 30 minutos. Após esse processo, o precipitado tanino–formaldeído foi separado por filtração simples, utilizando-se funil e papel-filtro. O material retido foi seco em estufa a 103 ± 2 °C por 24 horas, e o índice de *Stiasny* (I) foi determinado conforme a Equação 2.

$$\%I = \frac{M2}{M1} \times 100 \quad \text{(Equação 2)}$$

Em que: I = índice de *Stiasny* (%); M_1 = massa de sólidos presente em 50 mL do extrato (g); e M_2 = massa seca do precipitado tanino–formaldeído (g).

O teor de taninos condensados foi obtido pela multiplicação do teor de sólidos totais pelo índice de Stiasny, conforme a Equação 3.

$$\%TTC = \frac{TST * I}{100} \quad \text{(Equação 3)}$$

Em que: TTC = teor de taninos condensados (%); TST = teor de sólidos totais (%); e I = índice de Stiasny (%).

Os dados de TST, I e TTC, obtidos em três repetições laboratoriais para cada combinação entre espécie e local, foram expressos como média ± desvio-padrão e submetidos à análise de variância (ANOVA) de um fator. Devido ao reduzido número de repetições laboratoriais por

grupo (n = 3), não foram aplicados testes formais de normalidade e homogeneidade das variâncias. Quando constatada diferença significativa, as médias foram comparadas pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade.

3. Resultados e discussão

Os parâmetros avaliados apresentaram diferenças significativas entre alguns dos grupos correspondentes às espécies e aos locais de coleta (Tabela 1). Na Fazenda SAMISA, *Rhizophora mangle* (mangue-vermelho) apresentou teor de sólidos totais de 29,42% e teor de taninos condensados de 18,43%, valores superiores aos obtidos para o *Laguncularia racemosa* (mangue-branco) nesse local. Para *L. racemosa*, os teores de sólidos totais e de taninos condensados não diferiram entre a Fazenda SAMISA e o Parque Solar Ferreiro Torto. Nesse contexto, variações nas condições climáticas e ambientais podem modificar as respostas ecofisiológicas das espécies de mangue (KRAUSS et al., 2008). Entretanto, embora os locais apresentem diferenças de precipitação e temperatura, essas condições não se refletiram em diferenças significativas no TST e TTC de *L. racemosa* nas condições avaliadas.

Tabela 1. Teor de sólidos totais (TST), índice de *Stiasny* (I) e teor de taninos condensados (TTC) de *Rhizophora mangle* e *Laguncularia racemosa* na Fazenda SAMISA e de *L. racemosa* no Parque Solar Ferreiro Torto.

Espécie/Local	TST	I	TTC
R. mangle SAMISA	29,42 (±7,37) a	63,42 (±9,51) a	18,43 (±3,78) a
L. racemosa SAMISA	11,44 (±0,86) b	66,34 (±1,88) a	7,58 (±0,37) b
L. racemosa Ferreiro Torto	14,95 (±1,66) b	43,63 (±2,14) b	6,52 (±0,73) b

Médias seguidas pela mesma letra na coluna não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade. ±: desvio-padrão.

Na Fazenda SAMISA, não houve diferença significativa entre *R. mangle* 63,42% e *L. racemosa* 66,34% quanto ao índice de *Stiasny*, indicando reatividade semelhante das frações precipitáveis pelo método nas condições avaliadas. Para *L. racemosa* coletada no Parque Solar Ferreiro Torto, o índice de *Stiasny* foi menor 43,63% do que o registrado na Fazenda SAMISA, embora os teores de sólidos totais e de taninos condensados não tenham diferido entre os locais. A diferença no índice de *Stiasny*, mesmo sem alteração significativa no TTC, sugere que as

condições ambientais podem ter afetado mais a composição e a reatividade dos compostos presentes no extrato do que sua quantidade total. Nesse sentido, as diferenças de precipitação e temperatura entre os locais podem estar associadas a alterações na composição da fração fenólica do extrato, contribuindo para a diferença observada na proporção de compostos capazes de reagir com o formaldeído.

Na comparação entre as espécies coletadas na Fazenda SAMISA, *R. mangle* apresentou TST e TTC superiores aos de *L. racemosa*, evidenciando maior rendimento de sólidos solubilizados e maior teor de taninos condensados nas condições estudadas. Esse resultado é compatível com o reconhecido potencial tanífero da casca de *R. mangle*, para a qual Rizzini e Mors (1976) mencionam teores de taninos catequínicos que podem atingir 40%. Contudo, esse valor não deve ser diretamente comparado ao TTC de 18,43% obtido no presente estudo, pois não há informações suficientes para confirmar a equivalência entre os métodos de determinação e as bases de expressão dos resultados.

Para *L. racemosa*, os valores de TST e TTC não diferiram entre a Fazenda SAMISA e o Parque Solar Ferreiro Torto; portanto, os dados não evidenciaram efeito do local sobre esses parâmetros. A diferença ocorreu apenas no índice de *Stiasny*, que foi menor no Ferreiro Torto. Esse resultado indica variação na fração reativa ao formaldeído determinada pelo método, sem permitir concluir, isoladamente, que houve menor concentração de taninos condensados. A diferença observada pode estar relacionada às condições de temperatura e precipitação entre os locais, uma vez que variações na disponibilidade hídrica e nas condições ambientais podem influenciar a produção de taninos vegetais (MONTEIRO et al., 2005). Assim, diferentes respostas aos fatores ambientais podem ocorrer entre os parâmetros utilizados na caracterização dos extratos tânicos. Além das condições do local de coleta, os parâmetros utilizados na caracterização dos extratos tânicos podem variar em função do estágio fenológico do material vegetal e do período de coleta (AZEVÊDO et al., 2017). Entretanto, como o presente estudo não avaliou fenofases em diferentes períodos de coleta, esses fatores não podem ser apontados como explicação para a diferença observada no índice de *Stiasny*.

A comparação com outros estudos reforça que a espécie, o órgão vegetal, o local de coleta e o método analítico devem ser considerados conjuntamente. Godoy et al. (1997) verificaram que *L. racemosa* e *R. mangle* não apresentaram o mesmo padrão de variação entre localidades. González-Ocampo et al. (2022), por sua vez, encontraram diferenças nos teores de compostos fenólicos e flavonoides de *R. mangle* entre lagoas costeiras submetidas a condições distintas. Embora esses trabalhos tenham analisado órgãos vegetais ou classes químicas diferentes, eles

corroboram a possibilidade de variação química associada à espécie e às condições do local, sem estabelecer uma relação causal para os resultados deste estudo.

Embora tenham sido consideradas as características climáticas gerais dos municípios estudados, essas variáveis não foram monitoradas diretamente durante o período de coleta. Dessa forma, as condições ambientais podem estar associadas ao comportamento observado, mas não é possível atribuir a diferença no índice de *Stiasny* a um fator climático específico.

4. Conclusões

A *Rhizophora mangle* apresentou maior potencial tanífero que *Laguncularia racemosa* na Fazenda SAMISA. Para *L. racemosa*, os teores de sólidos totais e de taninos condensados foram semelhantes entre os locais, com diferença apenas no índice de *Stiasny*. Essa variação pode estar associada às distintas condições ambientais entre as áreas, incluindo diferenças de precipitação e temperatura, embora não seja possível atribuí-la a um fator específico. Estudos futuros devem incluir o monitoramento das condições ambientais durante o período de coleta e avaliar diferentes épocas de amostragem, permitindo investigar com maior precisão a relação entre essas variáveis e a composição dos extratos tânicos.

5. Agradecimentos

Agradeço à Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN) e ao Laboratório de Produtos Florestais Não Madeireiros (LAPFLONM) pelo apoio e pela infraestrutura disponibilizada. Agradeço também a Wilkally, Kedma e Denys pelo auxílio no desenvolvimento deste trabalho.

6. Referências bibliográficas

AZEVÊDO, T. K. B.; PAES, J. B.; CALEGARI, L.; SANTANA, G. M. Teor de taninos condensados presente na casca de jurema-preta (Mimosa tenuiflora) em função das fenofases. Floresta e Ambiente, v. 24, e00026613, 2017.https://doi.org/10.1590/2179-8087.026613

FERREIRA, F. S.; SANTOS, S. C.; BARROS, T. F.; ROSSI-ALVA, J. C.; FERNANDEZ, L. G. Atividade antibacteriana *in vitro* de extratos de *Rhizophora mangle* L. *Revista Brasileira de Plantas Medicinais*, v. 13, n. 3, p. 305–310, 2011.https://doi.org/10.1590/S1516-05722011000300009

GODOY, S. A. P.; MAYWORM, M. A. S.; LO, V. K.; SALATINO, A.; SCHAEFFER-NOVELLI, Y. Teores de ligninas, nitrogênio e taninos em folhas de espécies típicas do mangue. Revista Brasileira de Botânica, v. 20, n. 1, p. 35–40, 1997.https://doi.org/10.1590/S0100-84041997000100003

GONZÁLEZ-OCAMPO, H. A.; MARTÍNEZ-ÁLVAREZ, I. G.; JARAMILLO-FLORES, M. E.; LUNA-GONZÁLEZ, A. Comparison of phenolic and flavonoid content and antioxidant and chelating activities of Rhizophora mangle in different anthropogenically-polluted coastal lagoons. Frontiers in Marine Science, v. 9, 791748, 2022.https://doi.org/10.3389/fmars.2022.791748

KRAUSS, K. W.; LOVELOCK, C. E.; MCKEE, K. L.; LÓPEZ-HOFFMAN, L.; EWE, S. M. L.; SOUSA, W. P. Environmental drivers in mangrove establishment and early development: a review. Aquatic Botany, v. 89, n. 2, p. 105–127, 2008.https://doi.org/10.1016/j.aquabot.2007.12.014

MONTEIRO, J. M.; ALBUQUERQUE, U. P.; ARAÚJO, E. L.; AMORIM, E. L. C. Taninos: uma abordagem da química à ecologia. *Química Nova*, v. 28, n. 5, p. 892–896, 2005.https://doi.org/10.1590/S0100-40422005000500029

RIO GRANDE DO NORTE. Instituto de Desenvolvimento Sustentável e Meio Ambiente. Perfil do seu município: Extremoz. Natal: IDEMA, 2013. Disponível em: https://adcon.rn.gov.br/ACERVO/idema/DOC/DOC000000000016680.PDF. Acesso em: 19 jul. 2026.

RIO GRANDE DO NORTE. Instituto de Desenvolvimento Sustentável e Meio Ambiente. Perfil do seu município: Macaíba. Natal: IDEMA, 2013. Disponível em: https://adcon.rn.gov.br/ACERVO/idema/DOC/DOC000000000016679.PDF. Acesso em: 19 jul. 2026.

RIZZINI, C. T.; MORS, W. B. *Botânica econômica brasileira*. São Paulo: EPU: EDUSP, 1976.

SANTOS, H. G. dos, Jacomine, P. K. T., Anjos, L. H. C. dos, Oliveira, V. A. de, Lumbreras, J. F., Coelho, M. R., Almeida, J. A. de, Araujo Filho, J. C. de, Oliveira, J. B. de, & Cunha, T. J. F. (2018). *Sistema Brasileiro de Classificação de Solos* (5ª ed., rev. e ampl.). Embrapa. https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1094003

ZHENG, G.; LIN, Y.; YAZAKI, Y. Extractive yields, Stiasny values and polyflavonoid contents in barks from six Acacia species in Australia. Australian Forestry, v. 54, n. 2, p. 154–156, 1991.https://doi.org/10.1080/00049158.1991.10674572

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Tratamento de água com tanino de *Acacia mearnsii*: influência da concentração e época de coleta

Thaynara Silva Vieira[1]; Ariane Mateus de Souza[1]; Raquel Júlia Cipriano dos Santos[1]; Kaike Costa Carvalho[1]; Kezia Ellen Souza Bomfim[1], Pedro Henrique Elias da Silva[1]; Taís Aparecida das Neves Custódio[1], João Gilberto Meza Ucella Filho[1]

[1] Universidade Federal de Viçosa - UFV

Resumo: O uso de coagulantes naturais tem se destacado como alternativa sustentável aos coagulantes inorgânicos no tratamento de água. A eficiência da coagulação com taninos depende da dosagem aplicada e das características da água bruta. Assim, este estudo avaliou a influência da concentração de tanino à base de *Acacia mearnsii* e do período de coleta da água (pré e pós-chuva) na coagulação. Os ensaios foram realizados em Jar Test com dosagens de 0, 2, 4, 6, 8 e 10 mg L^{-1}, avaliando cor aparente, turbidez e pH. A eficiência da remoção de cor aparente e turbidez foi analisada pelo teste de Scott-Knott, enquanto o comportamento do pH foi avaliado em função das dosagens. A dosagem de 4 mg L^{-1} apresentou melhor desempenho no período pré-chuva e a de 8 mg L^{-1} no pós-chuva. O pH apresentou baixa variação entre as dosagens. Os resultados evidenciaram o potencial do tanino à base de *Acacia mearnsii* como coagulante natural, com eficiência influenciada pela dosagem e pelas características da água bruta.

Palavras-chave: Coagulação natural; Jar Test; Qualidade da água

Water treatment with Acacia mearnsii tannin: influence of concentration and sampling period

Abstract:Natural coagulants have emerged as a sustainable alternative to inorganic coagulants for water treatment. Since coagulation efficiency depends on tannin dosage and raw water characteristics, this study evaluated the effects of *Acacia mearnsii* tannin concentration and water collection period (pre- and post-rainfall). Jar tests were performed using dosages of 0, 2, 4, 6, 8, and 10 mg L^{-1}, evaluating apparent color, turbidity, and pH. Apparent color and turbidity removal efficiencies were compared using the Scott-Knott test, while pH behavior was assessed across dosages. The 4 mg L^{-1} dosage showed the best performance during the pre-rainfall period, whereas 8 mg L^{-1} was the most effective after rainfall. pH showed little variation among dosages. The results highlight the potential of *Acacia mearnsii* tannin as a natural coagulant, with efficiency influenced by dosage and raw water characteristics.

Keywords: Natural coagulation; Jar test; Water quality

1. Introdução

A água é um recurso natural importante para a manutenção da vida humana e de todas as demais formas de vida presentes no planeta. Além de ser um dos recursos naturais mais importantes, sua disponibilidade está diretamente relacionada à qualidade de vida, ao desenvolvimento e à sobrevivência das civilizações (Colet *et al*., 2021).

A potabilização da água é realizada por meio de um conjunto de processos, incluindo coagulação, floculação, sedimentação, filtração e desinfecção (Gitis & Hankins, 2018). Entre essas etapas, a coagulação consiste na aplicação de reagentes químicos que promovem a aglomeração das impurezas em flocos, permitindo sua remoção ao longo do tratamento (Iwuozor, 2019; Koul et al., 2022).

Os coagulantes inorgânicos, especialmente o sulfato de alumínio, são amplamente utilizados no tratamento de água devido à sua eficiência na remoção de turbidez e matéria orgânica. Entretanto, sua utilização pode resultar na presença de alumínio residual na água tratada, cuja concentração é influenciada por fatores como o pH, a temperatura e a presença de matéria orgânica natural, sendo necessário seu controle devido aos potenciais efeitos à saúde humana (Krupińska, 2020).

Nesse contexto, coagulantes e adsorventes sustentáveis de origem renovável tem despertado interesse como alternativa aos materiais convencionais utilizados no tratamento de água. Entre essas alternativas, os materiais à base de taninos destacam-se por serem provenientes de fontes renováveis e podem ser extraídos utilizando apenas água, sem a necessidade de solventes orgânicos, apresentando um processo de obtenção mais sustentável (Leiviskä; Santos, 2023).

Quimicamente, os taninos são metabólitos secundários de natureza polifenólica, amplamente distribuídos em diferentes espécies vegetais. Entre as principais fontes de taninos condensados, destacam-se *Acacia mearnsii* De Wild. e o quebracho (*Schinopsis* sp.), que constituem as duas maiores fontes mundiais de extratos comerciais desses compostos (Pizzi et al., 2024). Em razão de suas propriedades, os taninos vêm sendo estudados para diferentes aplicações, incluindo o tratamento de água (da Silva Araujo et al., 2021; Ucella-Filho et al., 2022).

A eficiência dos taninos como coagulantes naturais está diretamente relacionada à dosagem aplicada. Concentrações insuficientes podem não promover a neutralização das cargas das partículas coloidais presentes na água, enquanto dosagens excessivas podem provocar a reestabilização dessas partículas, reduzindo a eficiência do processo de coagulação. Dessa

forma, a determinação da dosagem ótima constitui uma etapa fundamental para maximizar a remoção de turbidez, cor e matéria orgânica e minimizar custos operacionais (Leiviskä & Santos, 2023).

Além da concentração do coagulante, as características da água bruta podem influenciar a eficiência do processo de coagulação. A sazonalidade, associada às variações entre os períodos seco e chuvoso, pode alterar a qualidade da água dos mananciais, refletindo em mudanças nos parâmetros de turbidez e cor aparente. Essas variações podem afetar o desempenho das estações de tratamento de água, uma vez que as características da água bruta podem influenciar as condições de tratamento (Oliveira et al., 2021). Assim, a sazonalidade é um fator que deve ser considerado na avaliação da eficiência do processo de coagulação.

Nesse contexto, é importante compreender como a concentração do tanino e as variações sazonais da qualidade da água podem influenciar a eficiência da coagulação. A compreensão desses fatores pode contribuir para o uso mais eficiente de coagulantes naturais e para a adoção de alternativas mais sustentáveis no tratamento de água para abastecimento público. Assim, este trabalho teve como objetivo avaliar a influência da concentração do tanino de *A. mearnsii* e do período de coleta da água (pré e pós precipitação) sobre a eficiência do processo de coagulação, por meio da análise dos parâmetros de turbidez, cor aparente e pH.

2. Material e métodos

2.1. Coleta da água

A coleta de água foi realizada na lagoa localizada na Universidade Federal de Viçosa (UFV), no município de Viçosa, Minas Gerais, Brasil, em um ponto de amostragem previamente definido (20°46'14.30" S, 42°52'28.73" W). A amostragem foi realizada manualmente na margem da lagoa, utilizando um béquer previamente higienizado para a coleta da água, tomando-se os cuidados necessários para evitar a contaminação das amostras durante o procedimento. Posteriormente, as amostras foram acondicionadas em galões previamente higienizados e identificados para transporte e posterior análise.

Foram realizadas duas amostragens em condições hidrológicas distintas: uma no período pós-precipitação (um dia após a ocorrência de chuva) e outra no período pré-precipitação, permitindo a comparação entre diferentes condições ambientais e sua influência na qualidade da água após o tratamento.

2.2. Preparação da solução de tanino

Foi utilizada uma solução comercial de tanino líquido à base de *A. mearnsii*, fornecida por uma empresa comercial produtora de taninos, na concentração de 25%. Previamente aos ensaios de coagulação, essa solução foi diluída para 2,5% (25.000 mg L^{-1}), sendo utilizada como coagulante natural nos experimentos. A partir dessa solução, foram preparadas diferentes dosagens diretamente nos jarros contendo 2.000 mL de amostra de água. Para obtenção das concentrações finais de 0, 2, 4, 6, 8 e 10 mg L^{-1}, foram adicionados, respectivamente, 0; 1,6; 3,2; 4,8; 6,4 e 8,0 mL da solução de tanino.

2.3 Ensaio de coagulação em Jar Test

Os ensaios de coagulação e floculação foram realizados em um equipamento Jar Test (Modelo Nova Ética), com agitação simultânea, permitindo a avaliação de diferentes dosagens do coagulante sob as mesmas condições experimentais. Em cada jarro foram adicionados 2.000 mL de água bruta, aos quais foram aplicadas soluções de tanino nas concentrações de 0, 2, 4, 6, 8 e 10 mg L^{-1}.

Após a adição do coagulante, as amostras foram submetidas à etapa de mistura rápida, conduzida a 300 rpm, com o objetivo de promover a dispersão homogênea do coagulante e a desestabilização das partículas coloidais presentes na água. Em seguida, realizou-se a mistura lenta a 40 rpm durante 5 minutos, favorecendo a aproximação, a colisão e o crescimento dos flocos por meio do processo de floculação.

Na etapa de sedimentação, as amostras permaneceram em repouso por 20 minutos, permitindo a deposição dos flocos formados e a separação entre o material sedimentado e o sobrenadante. Ao final desse período, uma alíquota do sobrenadante foi coletada para a determinação dos parâmetros de qualidade da água e avaliação da eficiência do processo de coagulação.

2.4 Caracterização da água

As amostras de água foram caracterizadas quanto aos parâmetros de turbidez, cor aparente e potencial hidrogeniônico (pH), antes e após os ensaios de coagulação. As análises foram realizadas no Laboratório de Resíduos da Indústria Florestal na UFV, seguindo os procedimentos descritos no *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (American Public Health Association [APHA], American Water Works Association [AWWA], & Water Environment Federation [WEF], 2023).

2.4.1 Turbidez

A turbidez foi determinada pelo método nefelométrico, utilizando turbidímetro da marca Hach, devidamente calibrado. Os resultados foram expressos em Unidades Nefelométricas de Turbidez (UNT), conforme o método 2130 B do *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (APHA et al., 2023).

2.4.2. Cor aparente

A cor aparente foi determinada por meio de colorímetro da marca Hach previamente calibrado, sendo os resultados expressos em unidades de cor (uC), conforme o método 2120 B do *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (APHA et al., 2023).

2.4.3. pH

O potencial hidrogeniônico (pH) foi determinado utilizando pHmetro da marca Hach, previamente calibrado com soluções tampão, conforme o método 4500-H^+ B do *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (APHA et al., 2023).

2.5. Análise dos dados

Os resultados de turbidez e cor aparente foram obtidos a partir de análises realizadas em duplicata para cada concentração do coagulante e período de coleta. A eficiência do tratamento foi avaliada pelo percentual de remoção de turbidez e cor aparente. Os dados foram submetidos à análise de variância (ANOVA) e, quando observadas diferenças significativas, as médias foram comparadas pelo teste de Scott-Knott, ao nível de 5% de significância ($p \leq 0,05$). As análises estatísticas foram realizadas no software R. O pH foi acompanhado durante o tratamento, porém não foi submetido à análise estatística devido à ausência de repetições, sendo avaliado de forma descritiva.

3. Resultados e discussão

Os resultados obtidos nas duas coletas de água, realizadas nos períodos pré-chuva e pós-chuva, evidenciam que a eficiência do tanino de *A. mearnsii* foi influenciada tanto pela concentração aplicada quanto pelas características iniciais da água, conforme apresentado nas Tabelas 1 e 2. Os resultados obtidos realizada no período pré-chuva apresentado na Tabela 1, evidenciaram que a dosagem de 4 mg L^{-1} proporcionou a maior eficiência de remoção de cor aparente (45,2%) e turbidez (44,2%), indicando melhor desempenho do tanino nessa condição. Em concentrações superiores, observou-se redução da eficiência de remoção da cor e comportamento menos expressivo para a turbidez, sugerindo a ocorrência de sobredosagem do coagulante. Segundo Leiviskä e Santos (2023), concentrações excessivas de taninos podem promover a reestabilização das partículas coloidais, reduzindo a eficiência da coagulação.

Tabela 1 – Valores médios e desvios-padrão de cor aparente, turbidez e respectivos percentuais de remoção da água tratada com tanino de *A.mearnsii* no período pré-chuva

1ª campanha (pré-chuva)				
Dosagem (mg L⁻¹)	**Cor aparente (uC)**	**Remoção de cor (%)**	**Turbidez (UNT)**	**Remoção de turbidez (%)**
0	57,5 ± 2,1	_	7,7 ± 0,1	_
2	43 ± 2,8	25,22	6,4 ± 0,1	16,9
4	31,5 ± 0,7	45,22	4,3 ± 0,2	44,2
6	47 ± 1,4	18,26	6 ± 0	22,1
8	54 ± 0	6,09	7,3 ± 0,1	5,2
10	60,5 ± 2,1	-5,22	5,8 ± 0,1	24,7

Na coleta realizada no período pós-chuva (Tabela 2), verificou-se aumento progressivo da eficiência de remoção com a elevação da dosagem de tanino, alcançando remoções máximas de 63,7% para cor aparente e 73,5% para turbidez. Esse resultado indica que águas com maior carga de sólidos suspensos e matéria orgânica demandam concentrações mais elevadas de coagulante para promover a formação de flocos e a sedimentação das partículas.

Tabela 2 –Valores médios e desvios-padrão de cor aparente, turbidez e respectivos percentuais de remoção da água tratada com tanino de *A.mearnsii* no período pós-chuva

2ª campanha (pós-chuva)				
Dosagem (mg L⁻¹)	**Cor aparente (uC)**	**Remoção de cor (%)**	**Turbidez (UNT)**	**Remoção de turbidez (%)**
0	113 ± 2,8	_	20,4 ± 0,7	_
2	101,5 ± 2,1	10,2	12,4 ± 0,7	39,2
4	82 ± 1,4	27,4	11,4 ± 0,2	44,4
6	52 ± 1,4	54,0	5,7 ± 0,3	72,3
8	41 ± 0	63,7	5,9 ± 0,9	71,0
10	47 ± 0	58,4	5,4 ± 0	73,5

Ao comparar as duas condições de coleta, a água do período pós-chuva apresentou maiores valores iniciais de cor aparente (113,0 uC) e turbidez (20,4 UNT) em relação ao período pré-chuva (57,5 uC e 7,7 UNT, respectivamente), possivelmente em razão do aporte de materiais ao corpo hídrico após a precipitação. No pós-chuva, as maiores remoções ocorreram nas maiores dosagens de tanino, enquanto no pré-chuva a maior eficiência foi obtida com 4 mg L^{-1}. As diferenças observadas podem estar relacionadas às características iniciais da água e à resposta ao aumento da dosagem de coagulante, comportamento também observado por Oliveira et al. (2021) ao comparar períodos de estiagem e chuvoso.

A análise pelo teste de Scott-Knott (Figuras 1 e 2) confirmou diferença significativa entre as dosagens avaliadas para cor aparente e turbidez.

Figura 1 - Médias de cor aparente da água tratada com tanino de *A. mearnsii* nas diferentes dosagens, nos períodos pré e pós-chuva. Letras iguais indicam médias que não diferem pelo teste de Scott-Knott ($p \leq 0,05$), dentro de cada período.

Figura 2 - Médias de turbidez da água tratada com tanino de *A. mearnsii* nos períodos pré e pós-chuva, em diferentes dosagens. Letras iguais indicam médias que não diferem pelo teste de Scott-Knott ($p \leq 0,05$), dentro de cada período.

Para a cor aparente, no período pré-chuva, as dosagens de 0 e 10 mg L^{-1} não diferiram estatisticamente, demonstrando que a maior concentração de tanino não proporcionou melhoria significativa em relação à água sem tratamento. Para a turbidez, no período pós-chuva, as dosagens de 6, 8 e 10 mg L^{-1} pertencem ao mesmo grupo estatístico, indicando que concentrações superiores a 6 mg L^{-1} não promoveram ganhos significativos na remoção desse parâmetro. Esses resultados evidenciam que a aplicação de concentrações superiores pode representar maior consumo de coagulante sem benefícios proporcionais na eficiência do tratamento, tornando o processo menos vantajoso do ponto de vista operacional e econômico

O comportamento do pH da água tratada nas diferentes dosagens de tanino de *A. mearnsii*, durante os períodos pré e pós-chuva, é apresentado na Figura 3.

Figura 3 - Médias do pH da água tratada com tanino de *A. mearnsii* nas diferentes dosagens, nos períodos pré e pós-chuva.

Conforme apresentado na Figura 3, os valores de pH permaneceram relativamente estáveis em ambos os períodos, variando de 6,45 a 6,69 no pré-chuva e de 5,88 a 6,38 no pós-chuva. Observou-se apenas uma discreta redução entre a condição sem coagulante e a primeira dosagem aplicada (2 mg L^{-1}), possivelmente associada ao caráter levemente ácido do tanino. Nas concentrações subsequentes, entretanto, o pH manteve-se praticamente constante, indicando baixa influência do coagulante sobre essa variável. Essa pequena variação é favorável ao tratamento, pois evita alterações acentuadas no pH e a necessidade de correções posteriores, característica apontada como uma vantagem dos coagulantes à base de tanino por Leiviskä e Santos (2023) e corroborada por da Silva et al. (2026).

4. Conclusões

O tanino de *A. mearnsii* demonstrou potencial como coagulante natural para o tratamento de água, promovendo a remoção de cor aparente e turbidez com baixa interferência no pH. Os resultados evidenciaram que a eficiência do processo depende da dosagem aplicada e das características da água bruta, indicando a necessidade de ajustar a concentração do coagulante às condições da água a ser tratada. Dessa forma, o tanino apresenta potencial como alternativa sustentável aos coagulantes inorgânicos convencionais.

5. Agradecimentos

À Universidade Federal de Viçosa (UFV), ao Departamento de Engenharia Florestal (DEF), ao Laboratório de Resíduos da Indústria Florestal (LABRIF), à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG), à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio e pelas contribuições.

6. Referências bibliográficas

American Public Health Association, American Water Works Association, & Water Environment Federation. (2023). *Standard methods for the examination of water and wastewater* (24th ed.). APHA Press.

Colet, C., Pieper, M., Kaufmann, J. V., Schwambach, K., & Pletsch, M. (2021). Qualidade microbiológica e perfil de sensibilidade a antimicrobianos em águas de poços artesianos em um município do noroeste do Rio Grande do Sul. *Engenharia Sanitária e Ambiental, 26*(4), 683–690. https://doi.org/10.1590/S1413-415220200078

da Silva Araujo, E., Lorenço, M. S., Zidanes, U. L., Sousa, T. B., da Silva Mota, G., de Nazaré de Oliveira Reis, V., Gomes da Silva, M., & Mori, F. A. (2021). Quantification of the bark *Myrcia eximia* DC tannins from the Amazon rainforest and its application in the formulation of natural adhesives for wood. *Journal of Cleaner Production, 280*, 124324. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124324

da Silva, B. R. F., Ucella-Filho, J. G. M., Lourenço, Y. B. C., dos Anjos, B. F., da Silva, K. C. A., Gomes, J. P. S., Braga, R. M., de Azevedo, T. K. B., & Mori, F. A. (2026). Optimization of turbidity removal in water using chemically modified tannins from Brazilian species. *Water Environment Research, 98*(6), e70429. https://doi.org/10.1002/wer.70429

Gitis, V., & Hankins, N. (2018). Water treatment chemicals: Trends and challenges. *Journal of Water Process Engineering, 25*, 34–38. https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2018.06.003

Iwuozor, K. O. (2019). Prospects and challenges of using coagulation-flocculation method in the treatment of effluents. *Advanced Journal of Chemistry – Section A, 2*(2), 105–127. https://doi.org/10.29088/SAMI/AJCA.2019.2.105127

Koul, B., Bhat, N., Abubakar, M., Mishra, M., Arukha, A. P., & Yadav, D. (2022). Application of natural coagulants in water treatment: A sustainable alternative to chemicals. *Water, 14*(22), 3751. https://doi.org/10.3390/w14223751

Krupińska, I. (2020). Aluminium drinking water treatment residuals and their toxic impact on human health. *Molecules, 25*(3), 641. https://doi.org/10.3390/molecules25030641

Leiviskä, T., & Santos, S. C. R. (2023). Purifying water with plant-based sustainable solutions: Tannin coagulants and sorbents. *Groundwater for Sustainable Development, 23*, 101004. https://doi.org/10.1016/j.gsd.2023.101004

Oliveira, M. D., Bianchi, D. P. Z., Fonseca, J. F. R., Gorza Júnior, N. A., & Libânio, M. (2021). Avaliação de fatores intervenientes no desempenho de estações de tratamento de água. *Engenharia Sanitária e Ambiental, 26*(4), 613–625. https://doi.org/10.1590/S1413-415220180203

Pizzi, A., Laborie, M.-P., & Candan, Z. (2024). A review on sources, extractions and analysis methods of a sustainable biomaterial: Tannins. *Journal of Renewable Materials, 12*(3), 397–425. https://doi.org/10.32604/jrm.2023.046074

Ucella-Filho, J. G. M., da Silva Monteiro Freire, A., Carréra, J. C., Lucas, F. M. F., Zucolotto, S. M., Dias Júnior, A. F., & Mori, F. A. (2022). Tannin-rich bark extract of plants as a source of antimicrobial bioactive compounds: A bibliometric analysis. *South African Journal of Botany, 150*, 1038–1050. https://doi.org/10.1016/j.sajb.2022.09.018

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Usinagem e Tratamento Preservativo de lamelas na técnica de Arco Recombinado para Fins Estruturais

Leonardo Teixeira Bortoleto[1]; Thiago Ribeiro Paleari[1]; Jorge Daniel de Melo Moura[1]

[1] Universidade Estadual de Londrina

Resumo: Este trabalho avalia o processo de usinagem manual pelo método de arco recombinado e o tratamento preservativo químico do bambu *Dendrocalamus asper* para a produção de Bambu Laminado Colado (BLC). A metodologia compreendeu a coleta de colmos maduros, perfuração de diafragmas e imersão em boro a 2% por 15 dias. Após o corte longitudinal, as lamelas foram usinadas manualmente com esmerilhadeira para remoção de nós e regularizadas com lixamento. Avaliaram-se a retração radial e a módulo de elasticidade (MOE) individual das peças. O tratamento preservativo garantiu proteção biológica contra insetos xilófagos, prevenindo perdas de matéria-prima. Os ensaios físicos apontaram retração radial média favorável de 4,0%, confirmando estabilidade dimensional. Na classificação mecânica, obteve-se MOE médio de 5.854 MPa, com notável variabilidade natural. Conclui-se que a técnica tem potencial para a preservação das camadas periféricas mais resistentes do colmo. mas a sua viabilidade em larga escala depende do desenvolvimento de equipamentos automatizados que garantam o encaixe das lamelas.

Palavras-chave: *Dendrocalamus Asper*; Estabilidade dimensional; BLC

Machining and Preservative Treatment of Lamellae Using the Recombined Arc Method for Structural Applications

Abstract: This study addresses the production of bamboo lamellae from the species *Dendrocalamus* asper using the recombined arch technique for Glued Laminated Bamboo (GLB) applications. The main objective was to evaluate the manual machining processes and preservative chemical treatment of these curved section pieces. The methodology comprised the collection of mature culms, drilling of internal diaphragms, and immersion in a 2% boron solution for 15 days. After longitudinal splitting, the lamellae were manually machined with an angle grinder for node removal and regularized with sanding. Radial shrinkage and individual elastic stiffness (MOE) of the splits were evaluated. The preservative treatment guaranteed complete biological protection against wood-boring insects, preventing critical losses of raw material. Physical tests indicated a favorable average radial shrinkage of 4.0%, confirming excellent dimensional stability. In the mechanical grading, an average modulus of elasticity of 5,854 MPa was obtained, with marked natural variability. It is concluded that the recombined arch successfully preserves the outer, most resistant peripheral layers of the culm. However, manual grinding introduces superficial geometric irregularities that limit the precision of the fit between the curved lamellae. Transition to automated machining processes is recommended to enable the dimensional standardization of the lamellae.

Keywords: *Dendrocalamus asper; Dimensional stability; Glued laminated bamboo.*

1. Introdução

A crescente demanda global por produtos sustentáveis na construção civil, impulsionada pelo crescimento populacional (ONU, 2024), tem gerado escassez na oferta de madeira e consequente aumento de preços. Esse cenário estimula a busca por materiais alternativos e renováveis de ciclo rápido, destacando-se o bambu como uma solução promissora para o fornecimento de matéria-prima estrutural.

A espécie *Dendrocalamus asper* destaca-se pelo rápido crescimento e elevado diâmetro de colmo, atingindo maturidade e resistência máxima entre 5 e 7 anos (Mustafa et al., 2021). Contudo, seu uso direto na engenharia enfrenta obstáculos associados à heterogeneidade natural, variação de espessura de parede e vulnerabilidade biológica a insetos xilófagos (Boucher et al., 2025).

Para mitigar essa variabilidade anatômica e geométrica do colmo, o processamento na forma de lamelas curvas para uso em Bambu Laminado Colado (BLC) surge como uma alternativa eficiente para homogeneizar as propriedades do material. Pois a usinagem retangular convencional das ripas compromete o rendimento e remove a camada externa do colmo, região que concentra a maior densidade de feixes fibrovasculares e que, portanto, possui o melhor desempenho mecânico (Yuan et al., 2022).

Nesse contexto, destaca-se a técnica do "arco recombinado", proposta por Zhou et al. (2016), que consiste em manter a curvatura natural e a seção transversal curva das lâminas. Esse método otimiza o rendimento e a integridade estrutural ao preservar as fibras externas de alta resistência do colmo.

Além dos aos desafios geométricos, a durabilidade biológica do bambu exige atenção. Devido à alta presença de amido nos feixes vasculares, o material é susceptível ao ataque de insetos xilófagos (Liese, 1992), como o caruncho. Assim, a associação de tratamentos preservativos químicos profiláticos às lamelas é importante para garantir a integridade e a vida útil dos componentes estruturais (Azzini & Beraldo, 2001).

Diante do exposto, o presente trabalho tem como objetivo descrever e analisar o processo de usinagem manual de lamelas de bambu pelo método de arco recombinado, integrado ao tratamento químico preservativo por imersão. A pesquisa visa demonstrar procedimentos que maximizam o aproveitamento da curvatura natural do colmo e preservam suas camadas mais resistentes, avaliando as implicações da usinagem manual na integridade e durabilidade do BLC estrutural.

2. Material e métodos

O estudo utilizou colmos de bambu da espécie *Dendrocalamus asper*, coletados no Jardim Botânico de Londrina-PR. Foram colhidos colmos maduros com idade estimada entre 5 e 7 anos, período em que a espécie atinge sua maturidade fisiológica e resistência mecânica máxima. No total, foram colhidos aproximadamente 35 colmos inteiros (com alturas variando de 12 a 15 metros). Os cortes de base foram realizados com motosserra após os nós, a uma distância de 20 a 30 cm do solo, para evitar o acúmulo de água da chuva. Em seguida, os colmos foram seccionados em segmentos de aproximadamente 3 metros para viabilizar o transporte, totalizando 112 segmentos.

Desse lote, foram selecionados 48 segmentos que apresentavam diâmetros uniformes (circunferências entre 32 e 55 cm) e espessuras de parede de intermediárias a espessas (entre 10 e 20 mm), visando à minimização de desperdícios no processamento e maior igualdade das lamelas.

Devido à alta concentração de amido nos feixes vasculares, o que torna o bambu vulnerável à degradação por insetos xilófagos (como os carunchos), adotou-se um tratamento preservante químico profilático por imersão. Previamente ao banho químico, a superfície externa dos colmos foi higienizada com escova de aço, com atenção especial à região dos nós, e todos os diafragmas internos foram perfurados para assegurar a livre circulação e penetração da solução preservativa no interior das paredes dos colmos (Figura 1).



Figura 1 - Perfuração dos diafragmas antes do tratamento preservativo.

O material foi submerso durante 15 dias em um tanque contendo uma solução aquosa de octaborato de dissódio tetraidratado ($Na_2B_8O_{13}\cdot 4H_2O$), conhecido comercialmente como Timbor, na concentração de 2%. Foram utilizados pesos nas extremidades das peças para evitar a flutuação do bambu durante o tratamento. Posteriormente, o bambu foi submetido à secagem passiva, estabilizando-se até atingir o equilíbrio higroscópico com as condições de temperatura e umidade do ambiente.

Para o processo de fracionamento longitudinal, foram criados critérios para o aproveitamento dimensional: colmos com circunferência superior a 40 cm de diâmetro foram cortados em três segmentos (ângulos de 120 graus na seção transversal), enquanto colmos menores foram divididos apenas ao meio, evitando curvaturas acentuadas nas peças.

Os colmos foram estabilizados em um gabarito de madeira durante o corte para garantir o manuseio (Figura 2). Para evitar o desgaste pela presença de sílica no bambu, utilizou-se uma serra circular equipada com disco abrasivo dentado (SW1151805) adaptada em um gabarito de estabilização de madeira, gerando um total de 75 ripas.



Figura 2 - Gabarito utilizado para estabilização do colmo durante o corte longitudinal.

A usinagem baseou-se no método de arco recombinado, assim realizou-se a remoção manual dos diafragmas com martelo (Figura 3a), a remoção mecânica dos nós internos e regularização das superfícies das lamelas curvas com esmerilhadeira (Figura 3b) acoplada com disco abrasivo de desbaste grosso Modelo ECAE1013 (Figura 3c).



Figura 3 - Etapas da usinagem manual: (a) remoção dos diafragmas; (b) desgaste dos nós com esmerilhadeira; (c) disco abrasivo.

O preparo físico final consistiu no lixamento das superfícies internas e externas das ripas com lixa de granulometria média de 200 (Figura 4). O foco principal é remover a casca natural e impermeável do material, permitindo a abertura dos poros e a remoção de impurezas para garantir a aderência de adesivos.



Figura 4 - Lixamento das superfícies das lamelas.

Para a validação física e mecânica das ripas, realizaram-se ensaios de retração e flexão, adotou-se um sistema de codificação alfanumérico para controle e rastreabilidade de origem. A identificação inicial indica o dia da coleta de campo (1D ou 2D), seguido do número sequencial do colmo (ex: 6), a touceira de procedência (T) e a seção vertical de origem do segmento de 3 metros (A para base, B e C para intermediárias, e D para o topo). Por fim, o algarismo romano (I, II ou III) rastreia a ripa individual gerada após o corte longitudinal (ex: 2D 6TB - II).

A caracterização física da retração da espessura de parede foi avaliada por meio de 33 corpos de prova circulares (confeccionados de forma padronizada com serra copo de 30 mm) antes e após a secagem em estufa a (103 ± 2) °C, conforme as diretrizes da ABNT NBR 16828-2 (ver Tabela 1 na Seção 3.1). Já a classificação mecânica estrutural das ripas em arco foi realizada por meio de ensaio de flexão estática de três pontos em prensa universal EMIC (capacidade de 300 kN), o que viabilizou a determinação individual do Módulo de Elasticidade (MOE) do lote para futuramente a produção de vigas de BLC.

3. Resultados e discussão

3.1 Eficácia do tratamento preservativo: A etapa de tratamento químico preventivo demonstrou-se um fator importante para a viabilidade estrutural do bambu *Dendrocalamus asper*. Durante os experimentos preliminares (primeira coleta), lotes de colmos armazenados

para secagem sem o tratamento em imersão foram em sua totalidade perdidos devido ao ataque de carunchos (*Dinoderus minutus*).

A introdução da perfuração dos diafragmas internos assegurou a circulação e penetração da solução aquosa de Timbor a 2% em toda a espessura da parede do colmo (10 a 20 mm). Quimicamente, os sais de boro atuam como veneno estomacal por contato e ingestão, paralisando as funções enzimáticas digestivas do inseto, impedindo o metabolismo do amido. Os dados individuais de retração radial obtidos experimentalmente para as amostras foram tratados e estão sumarizados na Tabela 1.

Tabela 1 – Dados individuais do ensaio de retração radial da espessura da parede do colmo (segunda coleta)

Dia	Código	Pré (mm)	Pós (mm)	Ret (%)	Dia	Código	Pré (mm)	Pós (mm)	Ret (%)
1D	8TA	20,05	19,49	2,8%	2D	3TA	25,34	24,81	2,1%
1D	17TB	12,26	11,77	4,0%	2D	4TA	20,40	20,10	1,5%
1D	9TA	26,93	26,35	2,2%	2D	10TB	11,58	11,29	2,5%
1D	20TB	15,23	14,35	5,8%	2D	6TA	16,08	15,65	2,7%
1D	18TB	15,18	14,71	3,1%	2D	5TB	11,71	11,33	3,2%
1D	14TC	11,56	11,09	4,1%	2D	1TC	10,93	10,39	4,9%
1D	17TC	11,47	10,77	6,1%	2D	6TC	9,70	8,74	9,9%
1D	16TD	8,98	8,38	6,7%	2D	11TD	11,88	11,55	2,8%
1D	2TC	11,63	11,19	3,8%	2D	11TC	12,40	11,71	5,6%
1D	1TC	11,25	10,68	5,1%	2D	9TD	9,26	8,78	5,2%
1D	16TC	11,26	10,72	4,8%	2D	12TC	12,25	11,74	4,2%
1D	21TB	12,87	12,45	3,3%	2D	1TD	11,03	10,70	3,0%
MÉDIA				**4,0%**	**DESVIO PADRÃO**				**1,3%**
COV (%)					**32,5%**				

Nota: Pré = espessura pré-secagem; Pós = espessura pós-secagem; Ret. = retração radial (%). Adaptado de Bortoleto (2025).

A retração radial média obtida foi de 4,0%, com desvio padrão de 1,3% e COV de 32,5%. esse índice médio é considerado baixo e confirma a estabilidade dimensional do *Dendrocalamus asper*. Diferente da madeira tradicionais, que possuem anéis de crescimento e células de raio que (radial entre 2% e 6% e tangencial de 5% a 12%) (Burger & Richter, 1991;

Forest Products Laboratory [FPL], 2010), o bambu contrai-se de forma mais uniforme e isotrópica no plano transversal devido à sua estrutura de matriz com feixes vasculares.

3.2 Desempenho e classificação mecânica das ripas em arco: A usinagem baseada na técnica do arco recombinado manteve a curvatura natural e preservou a integridade física das camadas externas do colmo, região anatômica que apresenta a maior concentração de fibras e, consequentemente, melhor desempenho mecânico. O ensaio de flexão de três pontos gerou uma base de dados individuais de rigidez elástica para as 75 lamelas usinadas, apresentando-se estatisticamente tratada de forma compacta na Tabela 2 para viabilizar a análise científica.

Tabela 2 - Módulo de Elasticidade à Flexão (MOE) das ripas em arco recombinado (segunda coleta)

Código	MOE (MPa)	Código	MOE (MPa)	Código	MOE (MPa)	Código	MOE (MPa)
2D 6TB - II	17.094	1D 15TD - I	7.743	1D 25TB - II	7.422	2D 10TA - I	6.479
2D 6TC - I	15.030	2D 5TD - II	7.582	1D 5TC - II	7.032	2D 5TB - II	6.440
1D 22TB - I	14.417	1D 1TA - I	7.552	1D 15TB - II	7.008	2D 19TA-III	6.310
2D 6TA - I	13.509	1D 21TA - I	7.484	2D 2TA - I	6.919	2D 4TC - I	6.024
2D 5TD - I	11.172	2D 15TD-II	6.830	2D 11TC - I	6.765	2D 6TA - II	6.005
1D 8TC - II	10.770	2D 6TB - I	6.491	2D 6TA-III	4.195	2D 10TB - I	5.912
1D 24TB - I	10.134	1D 5TC - I	3.677	1D 21TA-II	3.269	2D 1TA - I	5.853
1D 23TA - I	9.576	1D 7TA-III	3.659	1D 4TA - I	3.096	2D 11TC-II	5.777
1D 24TB-II	9.132	2D 8TA - II	3.657	1D 10TA - I	2.946	1D 23TA-III	5.713
1D 14TC - I	8.679	2D 2TC - I	3.640	1D 4TC-III	2.907	2D 1TA-III	5.656
1D 23TA-II	8.376	1D 13TA-III	3.599	1D 15TC - I	2.856	2D 5TA-III	5.450
2D 8TA - I	8.165	2D 8TD - I	3.571	1D 9TC - I	2.819	2D 10TC-II	5.282
2D 6TA - I	8.142	1D 9TC - II	3.347	2D 5TC-III	2.667	1D 2TA-III	5.239
2D 9TA - I	8.096	2D 8TD - II	2.617	1D 10TA-II	2.592	2D 9TC-III	5.100
2D 5TA - I	7.818	2D 10TB-II	2.520	1D 14TA-III	2.330	1D 13TA-II	5.090
2D 1TA - II	4.558	2D 8TC - I	2.026	2D 9TA-III	1.889	1D 15TA-III	5.042
1D 2TD - II	4.374	2D 8TA-III	1.723	2D 8TC - II	1.507	2D 8TC - I	4.972
1D 9TD - I	4.324	1D 12TC-II	1.500	1D 10TA-II	3.881	2D 8TC - I	4.922

1D 25TA - I	4.809	2D 10TA-II	3.680	2D 10TA-III	1.112	2D 4TC - II	4.622
MÉDIA		**5.854**		**DP**	**3148**	**COV (%)**	**53,7%**

A análise das lamelas ensaiadas revelou um MOE médio de 5.854 MPa, valor considerado satisfatório e comparável ao de madeiras comerciais estruturais, como o Pinus. No entanto, o lote exibiu grande dispersão de rigidez, com valores variando de 1.112 MPa a 17.094 MPa e um elevado COV (53,78%). Esse comportamento se deve a gradação funcional natural do bambu, cujas propriedades físicas e concentração de feixes de fibras lignificadas decrescem da periferia externa para o interior, e da base para o topo do colmo.

3.3 Efeitos da usinagem: Embora o método de arco recombinado seja promissor para o rendimento do material, minimizando o descarte da zona rica em fibras, o processo de usinagem manual apresentou desafios. A utilização de esmerilhadeiras para a retirada dos nós e a regularização interna das lamelas inseriu imperfeições geométricas nas superfícies de contato. A consequência imediata dessas imperfeições superficiais é a baixa precisão no acoplamento geométrico e encaixe das peças curvas em face de contato transversal.

No contexto de uma futura aplicação industrial para a fabricação de elementos estruturais compostos de BLC, a existência de ondulações locais e desvios de espessura impede a justaposição uniforme e contínua entre as lamelas curvas sob a ação das forças de prensagem. Tal fator geraria uma linha de colagem heterogênea, com pontos de junta seca intercalados com zonas de espessura excessiva de adesivo.

Esses resultados comprovam que, estruturalmente, o método conceitual de arco recombinado oferece alta capacidade de deformação elástica e resistência. Contudo, a sua viabilidade em escala industrial e estrutural depende da transição do processo manual de desgaste para o desenvolvimento de equipamentos de usinagem automatizados e precisos.

4. Conclusões

A pesquisa demonstrou que o método de usinagem em arco recombinado, aliado ao tratamento preservativo químico, é uma alternativa promissora para fins estruturais. O tratamento profilático por imersão em solução de octaborato de dissódio tetra-hidratado (Timbor) mostrou-se viável garantindo a durabilidade do material frente ao ataque de agentes biológicos xilófagos sem comprometer sua estabilidade dimensional.

Estruturalmente, o método de fracionamento preservou a camada externa do colmo, região rica em feixes fibrovasculares, o que resultou em ripas com módulo de elasticidade compatível com valores reportados na literatura para madeiras de Pinus.

No entanto, o processo prático revelou que a usinagem manual com discos abrasivos insere imperfeições geométricas que dificultam o contato pleno entre as superfícies das lamelas. Essa limitação no nivelamento prejudica a distribuição uniforme das tensões e a ancoragem contínua de adesivos caso fosse realizada uma estrutura em BLC.

Portanto, conclui-se que o conceito de usinagem em arco recombinado apresenta potencial para otimizar o aproveitamento dos recursos florestais. Contudo, para que sua aplicação em componentes estruturais alcance maior eficiência, recomenda-se o desenvolvimento e a implementação de equipamentos automatizados de usinagem capazes de garantir não apenas a precisão geométrica e o adequado encaixe das lâminas de bambu, mas também sua correta organização e distribuição no elemento estrutural de acordo com as respectivas classificações mecânicas. Dessa forma, torna-se possível maximizar o desempenho estrutural dos componentes e promover um uso mais racional das propriedades mecânicas do material.

5. Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com o apoio do Programa Associado de Pós-graduação em Metodologia de Projeto de Arquitetura e Urbanismo (PPU - UEM/UEL), inclusive com suporte para a continuidade da pesquisa. Os autores agradecem à Universidade Estadual de Londrina (UEL) pela infraestrutura, em especial aos técnicos do Laboratório de Modelos 3D (Maquetaria) Carlos Alberto Duarte e do Laboratório de Saneamento Ivan Jorge Alves, bem como ao grupo de pesquisa LATA. Agradecimentos especiais são direcionados aos servidores da Divisão de Jardinagem e Paisagismo da UEL, pelo auxílio na coleta do material. Os autores agradecem à Fundação Araucária de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico do Estado do Paraná (FA) pelo suporte financeiro para o desenvolvimento desta pesquisa.

6. Referências bibliográficas

Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2022). *ABNT NBR 16828-2: Bambu—Determinação das propriedades físicas e mecânicas—Parte 2*. ABNT.

Azzini, A., & Beraldo, A. L. (2001). *Métodos práticos para utilização do bambu*. Universidade Estadual de Campinas.

Bortoleto, L. T. (2025). Desenvolvimento e avaliação do comportamento de vigas de bambu laminadas coladas submetidas à protensão longitudinal [Dissertação de mestrado, Universidade Estadual de Londrina]. Repositório Institucional da UEL. https://

Burger, L. M., & Richter, H. G. (1991). Anatomia da madeira: estruturação, propriedades e caracterização. Nobel.

Boucher, P., Fréchard, V., Ramirez-Cardona, D., & Ouellet-Plamondon, C. (2025). Overcoming challenges in bamboo connections: A review of mechanical properties and structural considerations. arXiv.

Forest Products Laboratory [FPL]. (2010). Wood handbook: Wood as an engineering material (General Technical Report FPL-GTR-190). U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory.

Liese, W. (1992). The structure of bamboo in relation to its properties and utilization. In G. Lessard & A. Chouinard (Eds.), *Bamboo and its use* (pp. 95–100). International Symposium on Industrial Use of Bamboo.

Mustafa, A. A., Derise, M. R., Yong, W. T. L., & Rodrigues, K. F. (2021). A concise review of *Dendrocalamus asper* and related bamboos: Germplasm conservation, propagation and molecular biology. *Plants*, *10*(9), 1897. https://doi.org/10.3390/plants10091897

United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division. (2024). *World Population Prospects 2024: Summary of Results*. United Nations.

Yuan, T., Wang, X., Lou, Z., Zhang, T., Han, Z., Hao, X., Li, Y. (2022). Comparison of the fabrication process and macro and micro properties of two types of crack-free, flatten bamboo board. *Construction and Building Materials*, 317, 125949. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125949

Zhou, J., Chen, L., Fu, W., Chen, Z., Zhao, Z., Cheng, W., & Zhang, Z. (2016). Preparation and performance evaluation of bamboo lumber prepared by assembly and glue-curing of naturally arc-shaped segments with finger joints. *BioResources*, 11(1), 267–280. https://doi.org/10.15376/biores.11.1.267-280

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Uso de aditivos na polpação kraft visando o uso de cavacos superdimensionados

Elyel Fraga de Freitas[1]; Layssa Costa da Silva[1]; Osvaldo Vieira[2]; Geraldo Ferreira David[1]; Larisse Aparecida Ribas Batalha[1]; Roberto Carlos Costa Lelis[1]; Fernando José Borges Gomes[1]

[1] Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro
[2] Química Nova Brasil

Resumo: A classificação dimensional dos cavacos influencia a eficiência da polpação kraft e a uniformidade da deslignificação. Este trabalho avaliou o efeito de cavacos superdimensionados (*oversize* e *overthick)* sobre a polpação Kraft e o uso de aditivo comercial na polpação destes. Os cavacos foram classificados conforme a norma SCAN-CM 40:94 e avaliados como 100% aceite, 90% aceite + 10% *oversize* e 90% aceite + 10% *overthick*, utilizando 18% de álcali ativo. Para a mistura com *overthick,* avaliou-se também 0,6% de aditivo comercial. A adição de *oversize* elevou o kappa de 17,5 para 19,1 e os rejeitos de 0,12 para 2,12%, reduzindo o rendimento depurado de 50,51 para 49,29%. Para *overthick*, foram obtidos kappa de 18,2, rejeitos de 1,36% e rendimento depurado de 49,85%. Considerando premissas de cozimentos como menores gerações de rejeitos, definiu-se o uso de *overthick* como o mais promissor para esse estudo. O aditivo reduziu o kappa para 17,7 e os rejeitos para 0,31%, recuperando o rendimento depurado para 50,46%. Os resultados demonstram que cavacos fora de especificação influenciam o desempenho da polpação, enquanto o aditivo apresenta potencial para melhorar o aproveitamento de cavacos *overthick.*

Palavras-chave: Tamanho dos cavacos; Número kappa; Eficiência do processo.

Use of additives in kraft pulping for the processing of oversized wood chips

Abstract: The dimensional classification of wood chips influences kraft pulping efficiency and delignification uniformity. This study evaluated the effect of oversized chips (*oversize* and *overthick*) on Kraft pulping and the use of a commercial additive in their pulping. The chips were classified according to the SCAN-CM 40:94 standard and evaluated as 100% accepts, 90% accepts + 10% *oversize*, and 90% accepts + 10% *overthick*, using 18% active alkali. For the mixture with *overthick*, 0.6% commercial additive was also evaluated. The addition of *oversize* increased the kappa number from 17.5 to 19.1 and rejects from 0.12 to 2.12%, reducing the screened yield from 50.51 to 49.29%. For *overthick*, a kappa number of 18.2, rejects of 1.36%,

and screened yield of 49.85% were obtained. Considering pulping premises such as lower reject generation, the use of *overthick* was defined as the most promising for this study. The additive reduced the kappa number to 17.7 and rejects to 0.31%, recovering the screened yield to 50.46%. The results demonstrate that out-of-specification chips influence pulping performance, while the additive shows potential to improve the utilization of *overthick* chips.

Keywords: Chip size; Kappa number; Process efficiency.

1. Introdução

A indústria de celulose tem apresentado crescimento contínuo nas últimas décadas, impulsionada pelo aumento da demanda mundial por papéis, embalagens e produtos de higiene, estimulando investimentos em expansão da capacidade produtiva e no desenvolvimento de processos mais eficientes e sustentáveis (Barrios et al., 2026). No Brasil, o setor destaca-se pela elevada produtividade florestal, competitividade industrial e capacidade de atender mercados cada vez mais exigentes quanto à qualidade dos produtos e à eficiência dos processos (Jesus et al., 2022).

Nesse cenário, o processo kraft consolidou-se como a principal tecnologia de polpação química, respondendo pela maior parte da produção mundial de celulose devido à sua elevada eficiência na deslignificação, recuperação de reagentes químicos e flexibilidade para processar diferentes espécies florestais (Godoy et al., 2024; Henriksson et al., 2024). Nesse processo, os cavacos de madeira são submetidos à ação do licor branco, composto principalmente por hidróxido de sódio (NaOH) e sulfeto de sódio (Na_2S), em meio fortemente alcalino (pH superior a 12), sob temperaturas entre 155 e 180 °C e pressão de vapor em torno de 800 kPa. Essas condições promovem a solubilização seletiva da lignina e a individualização das fibras celulósicas (Mboowa, 2024). O desempenho dessa etapa influencia diretamente o rendimento, a qualidade da polpa e a eficiência energética do processo.

A eficiência da deslignificação depende do controle rigoroso de parâmetros operacionais, como o fator H, que integra os efeitos do tempo e da temperatura de cozimento, a relação licor/madeira, a concentração de álcali residual e o tempo de residência da madeira no digestor. Além disso, a distribuição de temperatura ao longo do digestor, o nível de cavacos no vaso de impregnação, o teor de umidade da madeira e as condições térmicas do processo afetam

a uniformidade da impregnação e da remoção da lignina. O controle adequado dessas variáveis permite obter valores consistentes de número kappa, preservar a integridade dos carboidratos e aumentar a eficiência global da polpação (Delibasoglu et al., 2026).

Nesse sentido, a qualidade dos cavacos constitui um fator determinante para o desempenho da polpação kraft, sendo definida por características como distribuição dimensional (comprimento, largura e espessura), densidade básica, teor de umidade, teor de casca e composição da matéria-prima (Rahman et al., 2024; Poschner et al., 2024; Poschner, 2026). Entre essas propriedades, a distribuição dimensional assume particular importância por influenciar a uniformidade do cozimento e, consequentemente, a deslignificação, a geração de rejeitos e o rendimento da polpa. Embora os sistemas industriais de preparação da madeira busquem produzir cavacos com dimensões uniformes, a geração de frações fora de especificação, como cavacos *oversize*, que apresentam dimensões superiores às especificadas para o processo, e *overthick*, caracterizados por espessura excessiva em relação ao padrão estabelecido, é inerente ao processo de picagem e classificação. Dessa forma, compreender o comportamento dessas frações durante o cozimento e avaliar alternativas para seu aproveitamento são aspectos relevantes para aumentar a eficiência no uso da madeira e reduzir perdas no processo de produção de celulose.

Dessa forma, o objetivo deste trabalho foi avaliar a influência da incorporação de cavacos *oversize* e *overthick* no desempenho da polpação kraft, considerando seus efeitos sobre o número kappa, a geração de rejeitos e os rendimentos do processo. Adicionalmente, avaliou-se o uso de um aditivo comercial como estratégia para melhorar o desempenho da polpação de cavacos *overthick*, visando ampliar o aproveitamento de frações fora de especificação e a eficiência no uso da matéria-prima.

2. Material e métodos

2.1 Preparo e classificação dos cavacos

Os cavacos utilizados neste estudo, fornecidos por uma empresa do setor de celulose, foram submetidos à classificação dimensional em classificador de cavacos, conforme os procedimentos estabelecidos pela norma SCAN-CM 40:94. Após a classificação, foram separadas as frações de cavacos aceitos, *oversize* e *overthick*, utilizadas na composição das amostras submetidas à polpação kraft.

A fração *oversize* correspondeu aos cavacos retidos na peneira de 45 mm, enquanto os cavacos *overthick* foram classificados com base na espessura, sendo retidos na peneira de fendas de 8 mm. A fração de cavacos aceitos foi constituída pelo material classificado nas peneiras intermediárias de 13 e 7 mm.

Foram avaliadas quatro condições experimentais: a) 100% de cavacos aceitos; b) 90% de cavacos aceitos + 10% de *oversize*; c) 90% de cavacos aceitos + 10% de *overthick*; e d) 90% de cavacos aceitos + 10% de *overthick* com adição de 0,6% de aditivo comercial.

2.2 Polpação Kraft

Os cavacos foram submetidos à polpação Kraft utilizando-se 0,5 kg de cavacos por cozimento, relação licor/madeira de 4:1 (L/Kg) e sulfidez de 33%. A temperatura máxima de cozimento foi de 160 °C, com tempo de aquecimento de 120 minutos até a temperatura máxima, seguido de 30 minutos nessa condição. Para os ensaios deste estudo, foi utilizada carga de 18% de álcali ativo (AA), expressa como NaOH, mantendo-se constantes as demais condições operacionais, de modo a permitir a avaliação do efeito dos tamanhos dos cavacos sobre o desempenho da polpação. Para a condição contendo cavacos *overthick*, também foi avaliada a aplicação de 0,6% de aditivo comercial, mantendo-se as mesmas condições de polpação.

Após o cozimento, as polpas foram desfibradas, lavadas e depuradas. O desempenho dos cozimentos foi avaliado por meio do rendimento total, rendimento depurado e teor de rejeitos, determinados por gravimetria, e do número kappa da polpa, determinado conforme a norma TAPPI T 236 cm-85. O licor preto foi analisado quanto ao álcali efetivo residual (AER), de acordo com a norma TAPPI T 625 cm-85.

Os dados obtidos foram organizados em função das quatro condições experimentais avaliadas e analisados de forma comparativa, considerando os valores de rendimento total, rendimento depurado, teor de rejeitos, número kappa e álcali efetivo residual (AER). A comparação entre as condições permitiu avaliar o efeito da incorporação das frações *oversize* e *overthick* sobre o desempenho da polpação. Para os cavacos *overthick*, também foi realizada a comparação entre as condições com e sem a aplicação do aditivo comercial, visando avaliar seu efeito sobre as variáveis de desempenho do processo.

3. Resultados e discussão

3.1. Adição de cavacos *oversize* e *overthick*

Os resultados da polpação Kraft para os cavacos aceitos e para as misturas contendo cavacos *oversize* e *overthick* são apresentados na Tabela 1. Para a condição contendo *overthick*, também são apresentados os resultados obtidos com a aplicação do aditivo comercial. A condição de referência, constituída por 100% de cavacos aceitos, apresentou número kappa de 17,5 e baixo teor de rejeitos (0,12%). A presença de cavacos *oversize* e *overthick* resultou em maiores números kappa e teores de rejeitos, acompanhados de redução do rendimento depurado, evidenciando diferenças no desempenho do cozimento em função do tamanho dos cavacos.

Tabela 1. Resultados da polpação Kraft de cavacos aceitos e misturas contendo cavacos *oversize* e *overthick*, com e sem aditivo comercial.

Carga de aditivo (%)	Tratamento	AA (%)	Kappa	Rendimento (%)			Licor preto AER (g/L)
				Depurado	Rejeito	Total	
0	100% Padrão	18	17,5	50,51	0,12	50,63	6,1
0	90% Padrão + 10% Oversize	18	19,1	49,29	2,12	51,41	5,3
0	90% Padrão + 10% Overthick	18	18,2	49,85	1,36	51,21	5,2
0,6% de aditivo (comercial)	90% Padrão + 10% Overthick	18	17,7	50,46	0,31	50,77	5,4

A incorporação de 10% de cavacos *oversize* apresentou o maior impacto observacional sobre o desempenho da polpação, com aumento do número kappa de 17,5 para 19,1 e do teor de rejeitos de 0,12 para 2,12%, acompanhado pela redução do rendimento depurado de 50,51 para 49,29%. A adição de 10% de cavacos *overthick* resultou em variações de menor magnitude, obtendo-se número kappa de 18,2, teor de rejeitos de 1,36% e rendimento depurado de 49,85%. Apesar dos maiores rendimentos totais observados para as condições contendo *oversize* (51,41%) e *overthick* (51,21%), esse incremento esteve associado predominantemente ao aumento da fração de rejeitos.

Esse comportamento é consistente com os resultados reportados por Poschner et al. (2024), que observaram maiores números kappa, aumento nos teores de rejeitos e menores rendimentos depurados para frações *oversize* e *overthick*, atribuindo esse comportamento a

possíveis limitações na deslignificação das regiões internas dos cavacos de maiores dimensões durante o cozimento kraft.

A menor eficiência de cozimento dessas frações pode estar associada às limitações de transporte dos reagentes para o interior dos cavacos. Zanuttini et al. (2005) descrevem a impregnação alcalina como um processo de difusão reativa, no qual uma frente de reação avança da superfície para o interior da madeira. Com o aumento da distância percorrida, o avanço torna-se mais lento devido às restrições difusivas, tornando a espessura uma dimensão crítica para a uniformidade do cozimento.

Os valores de álcali efetivo residual (AER) também evidenciaram diferenças entre as condições. O AER diminuiu de 6,1 g/L para os cavacos aceitos para 5,3 e 5,2 g/L nas misturas contendo *oversize* e *overthick*, respectivamente. Apesar do maior consumo aparente de álcali, essas condições apresentaram números kappa superiores, indicando que o consumo adicional não se refletiu proporcionalmente em maior remoção de lignina.

Henriksson et al. (2024) destacam que, paralelamente à deslignificação, ocorrem reações de degradação dos carboidratos durante o cozimento kraft, principalmente hidrólise alcalina e reações de *peeling*. Nessas últimas, unidades de monossacarídeos são sucessivamente removidas a partir das extremidades redutoras das cadeias de polissacarídeos, promovendo a degradação progressiva dos carboidratos. Portanto, aumentar simplesmente a severidade do cozimento para compensar a menor deslignificação de cavacos espessos pode intensificar a degradação dos carboidratos e comprometer a seletividade do processo.

3.2. Aplicação de aditivo de cozimento

A aplicação de 0,6% de aditivo comercial de cozimento na mistura contendo 10% de cavacos *overthick* apresentou efeito positivo, reduzindo o número kappa de 18,2 para 17,7 e os rejeitos de 1,36 para 0,31%, o que corresponde a uma redução de aproximadamente 77%. Simultaneamente, o rendimento depurado aumentou de 49,85 para 50,46%, aproximando-se do valor obtido para 100% de cavacos aceitos (50,51%). O AER aumentou ligeiramente de 5,2 para 5,4 g/L (Tabela 1). Assim, a redução do kappa e dos rejeitos ocorreu sem perda de rendimento depurado e sem evidência de maior consumo de álcali, indicando melhor desempenho global do cozimento na presença do aditivo.

A expressiva redução dos rejeitos é compatível com a hipótese de maior uniformidade no processamento dos cavacos *overthick*, considerando a importância da distribuição dos reagentes para a eficiência do cozimento descrita por Zanuttini et al. (2005). Entretanto, como a

impregnação não foi avaliada diretamente, como hipótese, o efeito observado pode estar associado à melhoria da distribuição dos reagentes no interior dos cavacos. Do ponto de vista tecnológico, essa estratégia pode ser interessante por melhorar o aproveitamento de cavacos *overthick* sem necessariamente aumentar a severidade do cozimento.

4. Conclusões

A presença de cavacos *oversize* e *overthick* influenciou o desempenho da polpação Kraft, aumentando a formação de rejeitos para 2,12% e 1,36%, respectivamente, em comparação a 0,12% para os cavacos aceitos. A aplicação de 0,6% de aditivo comercial aos cavacos *overthick* reduziu o teor de rejeitos de 1,36% para 0,31%, correspondendo a uma redução relativa de aproximadamente 77% e elevou o rendimento depurado de 49,85 para 50,46%, aproximando o desempenho daquele obtido com cavacos aceitos. Os resultados reforçam a importância do controle dimensional e indicam o potencial do aditivo para melhorar o aproveitamento de cavacos *overthick*.

5. Agradecimentos

Os autores agradecem à Fundação Carlos Chagas Filho de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro (FAPERJ) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e à Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (UFRRJ).

Referências bibliográficas

Barrios, N., Gonzalez, M. E., Zabib, N., Marquez, R., & Pal, L. (2026). Achieving net-zero carbon in the pulp and paper industry: Tackling scope 1, 2, and 3 emission hotspots. Resources, Conservation & Recycling Advances, 29, 200318. https://doi.org/10.1016/j.rcradv.2026.200318

Delibasoglu, I., Chakraborty, S., Heintz, F., Wernersson Brodin, F., & Darnell, A. (2026). Advancing delignification in the pulp and paper industry: Multivariate time series forecasting, explainability, and simulation analysis. Journal of Intelligent Manufacturing. https://doi.org/10.1007/s10845-026-02836-0

Henriksson, G., Germgård, U., & Lindström, M. E. (2024). A review on chemical mechanisms of kraft pulping. Nordic Pulp & Paper Research Journal, 39(3), 297–311. https://doi.org/10.1515/npprj-2023-0015

Jesus, A. F. S., Mendoza, Z. M. dos S. H., Elias, M. P. dos S., Santos, D. M. dos, Borges, P. H. de M., & Morais, P. H. de M. (2022). Aspectos gerais sobre a indústria brasileira de polpa celulósica e papel. Brazilian Journal of Development, 8(6), 45984–45999. https://doi.org/10.34117/bjdv8n6-220

Mboowa, D. (2024). A review of the traditional pulping methods and the recent improvements in the pulping processes. Biomass Conversion and Biorefinery, 14, 1–12. https://doi.org/10.1007/s13399-020-01243-6

Poschner, R. (2026). Optimizing pulping processes: Addressing industrial challenges through process variability, chip quality and energy efficiency [Doctoral dissertation, Graz University of Technology].

Poschner, R., Czibula, C., Bakhshi, A., Harter, T., Eckhart, R., & Hirn, U. (2024). Fractionation of wood due to industrial chipping: Effects and potential for Kraft pulping of European spruce. Cellulose, 31, 3129–3142. https://doi.org/10.1007/s10570-024-05804-0

Rahman, A., Marufuzzaman, M., Street, J., Wooten, J., Gude, V. G., Buchanan, R., & Wang, H. (2024). A comprehensive review on wood chip moisture content assessment and prediction. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Article 113843. https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113843

Zanuttini, M., Citroni, M., Marzocchi, V., & Inalbon, C. (2005). Alkali impregnation of hardwood chips. TAPPI Journal, 4(2), 28–30.

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Uso de Compostos Fenólicos Encapsulados no Desenvolvimento de Biofilmes

Theo Souza Silva Moura Valente[1], Carlos Antonio Alves dos Santos[1], Patrick Gomes da Silva Coelho[1], Fernando José Borges Gomes[1], Roberto Carlos Costa Lelis[1], Ericka Figueiredo Alves Redmond[2]

[1] Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, Brasil.
[2] State University of New York College of Environmental Science and Forestry. Syracuse, Nova Iorque.

Resumo: A preocupação ambiental associada à persistência de plásticos sintéticos tem impulsionado a busca por biopolímeros e compostos funcionais de fontes renováveis para aplicações em embalagens. Taninos e lignina kraft destacam-se entre os compostos fenólicos vegetais devido às suas propriedades antioxidantes, antimicrobianas e de absorção da radiação ultravioleta. Entretanto, sua incorporação em matrizes poliméricas pode apresentar limitações relacionadas à baixa solubilidade, dispersibilidade e formação de agregados. O encapsulamento tem sido investigado como alternativa para aumentar a estabilidade dos compostos bioativos e melhorar sua distribuição na matriz polimérica. Assim, o presente trabalho tem como objetivo revisar a literatura sobre o uso de compostos fenólicos encapsulados, com ênfase em taninos e lignina kraft de eucalipto, no desenvolvimento de biofilmes biodegradáveis, destacando as formas de encapsulamento e influência nas propriedades dos materiais obtidos.

Palavras-chave: Antimicrobianas; Lignina kraft; Taninos.

Use of Encapsulated Phenolic Compounds in Biofilm Development

Abstract: Environmental concerns associated with the persistence of synthetic plastics have driven the search for biopolymers and functional compounds from renewable sources for packaging applications. Tannins and kraft lignin stand out among plant-based phenolic compounds due to their antioxidant, antimicrobial, and ultraviolet radiation absorption properties. However, their incorporation into polymeric matrices can present limitations related to low solubility, dispersibility, and aggregate formation. Encapsulation has been investigated as an alternative to increase the stability of bioactive compounds and improve their distribution in the polymeric matrix. Thus, this work aims to review the literature on the use of encapsulated phenolic compounds, with emphasis on eucalyptus tannins and kraft lignin, in the development of biodegradable biofilms, highlighting the encapsulation methods and their influence on the properties of the materials obtained.

Keywords: Antimicrobials; Kraft lignin; Tannins.

1. Introdução

As embalagens convencionais derivadas do petróleo apresentam baixa biodegradabilidade e persistência ambiental, contribuindo para a poluição e a formação de microplásticos (Amin et al., 2021; Westlake et al., 2023). Por isso, biopolímeros renováveis e

biodegradáveis são estudados para a produção de biofilmes destinados a embalagens (Amin et al., 2021; Westlake et al., 2023).

Os taninos são compostos fenólicos vegetais classificados em hidrolisáveis e condensados. Os condensados são formados por flavonoides polimerizados, enquanto os hidrolisáveis apresentam ácidos fenólicos esterificados a açúcares (Napolitano et al., 2022; Seidi et al., 2025).

A lignina é um polímero natural abundante e subproduto da indústria de papel e celulose, especialmente dos processos kraft e sulfito, sendo investigada como matéria-prima renovável para materiais sustentáveis (Basbasan et al., 2022; Ortega et al., 2024; Pinto et al., 2022). Sua estrutura fenólica proporciona propriedades antioxidantes, absorção UV e atividade antimicrobiana, mas sua baixa solubilidade, aglomeração e incompatibilidade limitam sua aplicação (Basbasan et al., 2022; Gai et al., 2024; Priyadarshi et al., 2024).

Taninos e lignina compartilham origem renovável e grupos fenólicos, mas suas estruturas influenciam a dispersão e o desempenho nos biofilmes (Seidi et al., 2025; Wang et al., 2022). O encapsulamento pode superar essas limitações, protegendo compostos bioativos, melhorando sua dispersibilidade e controlando sua liberação (Basbasan et al., 2022; Ballesteros et al., 2017; Priyadarshi et al., 2024; Xie et al., 2024).

Os taninos apresentam maior reatividade, enquanto a lignina se destaca pela estabilidade estrutural e absorção UV. Ambos podem afetar a compatibilidade, transparência, flexibilidade e resistência dos biofilmes (Priyadarshi et al., 2024; Seidi et al., 2025). A combinação com biopolímeros, plastificantes e aditivos permite otimizar propriedades mecânicas, ópticas, antioxidantes, antimicrobianas e de barreira (Agrippina et al., 2024; Moeini et al., 2021; Moeini et al., 2022).

593. Biofilmes

Biofilmes são materiais poliméricos finos e contínuos, formados pela deposição ou secagem de soluções filmogênicas. Podem atuar como barreiras físicas ou invólucros independentes e são geralmente produzidos com biopolímeros renováveis, como polissacarídeos, proteínas e lipídios. Sua formação resulta da organização das cadeias durante a evaporação do solvente, em uma rede influenciada pela composição, pelas interações intermoleculares e pelo processamento (Abdullah et al., 2022; Dirpan et al., 2023; Westlake et al., 2023

).

Em embalagens, destacam-se resistência mecânica, estabilidade térmica, permeabilidade ao vapor de água e oxigênio, transparência e proteção UV, propriedades relacionadas à proteção do produto durante armazenamento e transporte (Westlake et al., 2023; Wang et al., 2022). Compostos bioativos possibilitam embalagens ativas com atividades antioxidantes, antimicrobianas ou liberação controlada; taninos e lignina destacam-se por seus grupos fenólicos (Ordoñez et al., 2022; Seidi et al., 2025).

A resistência mecânica, a sensibilidade à umidade e as propriedades de barreira ainda limitam os biofilmes biodegradáveis; a combinação de polímeros, plastificantes, reforços e bioativos permite aprimorar seu desempenho (Westlake et al., 2023; Wang et al., 2022; Amin et al., 2021; Moeini et al., 2022).

2.1 Biopolímeros para produção de biofilmes

A produção de biofilmes requer uma matriz polimérica contínua e componentes que ajustem resistência, flexibilidade, permeabilidade e estabilidade (Amin et al., 2021; Moeini et al., 2022).

Polissacarídeos como ágar, carboximetilcelulose e amido destacam-se pela biodegradabilidade, disponibilidade e capacidade de formar redes coesas associadas a compostos bioativos (Dirpan et al., 2023).

O amido apresenta baixo custo e forma estruturas contínuas após a gelatinização, mas sua afinidade por água e baixa flexibilidade exigem plastificantes ou componentes hidrofóbicos (Matheus et al., 2023). O glicerol aumenta a flexibilidade, mas em altas concentrações pode elevar a absorção de água e reduzir a resistência mecânica. Óleos e ceras reduzem a permeabilidade ao vapor de água por sua natureza hidrofóbica (Moeini et al., 2022). A dispersão em matrizes hidrofílicas é dificultada pela incompatibilidade entre fases aquosas e oleosas; Tween 80 e lecitina auxiliam na estabilização e distribuição dos compostos hidrofóbicos (Moeini et al., 2022).

A combinação de polímeros, plastificantes, lipídios e emulsificantes ajusta as propriedades dos biofilmes e viabiliza a incorporação de taninos e lignina em embalagens ativas (Amin et al., 2021; Westlake et al., 2023).

2.2 Biofilmes incorporados com lignina

A lignina contribui para a rigidez, resistência mecânica e proteção dos tecidos. É uma fração importante da biomassa lignocelulósica e subproduto dos processos kraft e sulfito; sua

origem renovável favorece materiais sustentáveis, enquanto sua estrutura fenólica proporciona propriedades antioxidantes e absorção UV (Seidi et al., 2025; Ortega et al., 2024; Pinto et al., 2022; Basbasan et al., 2022; Wang et al., 2022; Priyadarshi et al., 2024).

A lignina modifica os biofilmes por meio de interações com as matrizes poliméricas. Em amido, celulose e quitosana, pode atuar como reforço, aumentando rigidez e estabilidade, além de contribuir para atividade antioxidante, proteção UV e propriedades de barreira (Gai et al., 2024; Wang et al., 2022; Priyadarshi et al., 2024).

A estrutura aromática hidrofóbica da lignina pode reduzir a permeabilidade ao oxigênio, mas sua baixa solubilidade, heterogeneidade e dificuldade de dispersão podem comprometer a homogeneidade e as propriedades mecânicas dos filmes (Wang et al., 2022; Basbasan et al., 2022; Gai et al., 2024). A Tabela 1 reúne estudos sobre seus efeitos nos biofilmes (Czajkoski et al., 2020; Hoffmann & Siguel, 2018; Meireles et al., 2022).

Tabela 1 – Vantagens e limitações da incorporação de lignina em biofilmes, com base em estudos recentes da literatura

Referência	Vantagens	Limitações
Hoffmann & Siguel (2018)	A lignina proporciona impermeabilidade e resistência estrutural ao biomaterial. Combinada com ágar e nanocelulose, resultou em um aumento de 67% no módulo de elasticidade em formulações específicas.	A adição de nanocelulose e lignina pode aumentar a rigidez de tal forma que reduz drasticamente a capacidade de deformação (alongamento) do filme, tornando-o menos maleável.
Czajkoski et al., (2020)	Atua como um excelente emulsificante natural para óleos essenciais, formando interfaces densas e elásticas. Em filmes de pectina, melhorou a resistência mecânica, aumentou a atividade antioxidante e reduziu a permeabilidade ao vapor de	O lignossulfonato apresenta caráter hidrofílico elevado e a adição de emulsões pode alterar significativamente a microestrutura do filme, criando espaços vazios (voids) onde as gotas de óleo estavam dispersas.

	água e a transmitância UV.	
Meireles et al., (2022)	Em acetato de celulose, a lignina kraft atuou como agente de reforço, plastificante e barreira UV. Produziu biofilmes mais hidrofóbicos, com menor permeabilidade ao vapor d'água e superfície lisa e homogênea.	Reduz a transparência, conferindo uma cor amarelada ou opaca aos filmes. Em concentrações elevadas (1,2%), pode levar ao surgimento de microporos na superfície, o que pode fragilizar o material.

2.3 Biofilmes incorporados com tanino

Os taninos são compostos fenólicos vegetais classificados em hidrolisáveis e condensados. Os condensados são formados por flavonoides polimerizados, enquanto os hidrolisáveis apresentam ácidos fenólicos esterificados a açúcares (Napolitano et al., 2022; Seidi et al., 2025).

Seus grupos hidroxila conferem atividades antioxidante e antimicrobiana, favorecendo o uso em embalagens ativas. Também interagem com matrizes poliméricas por ligações de hidrogênio, interações hidrofóbicas e reticulação (Ordoñez et al., 2022; Kumar et al., 2022; Song et al., 2022). Essas interações alteram resistência, flexibilidade e permeabilidade. Em filmes de alginato, os taninos atuam como reforço e aumentam as atividades antioxidante e antimicrobiana; em filmes proteicos, modificam resistência e estabilidade (Song et al., 2022; Kumar et al., 2022).

Os taninos absorvem radiação UV, mas concentrações elevadas podem alterar a coloração, transparência e flexibilidade. A Tabela 2 reúne estudos sobre seus efeitos nos biofilmes (Li et al., 2019; Ferri et al., 2023; Xu et al., 2024).

Tabela 2 – Vantagens e limitações da incorporação de taninos em biofilmes, com base em estudos recentes da literatura

Referência	Vantagens	Limitações
Li et al., (2019)	Baixas concentrações (5%) conferem multifuncionalidade; aumentam a estabilidade térmica e a resistência	A elevada solubilidade em água favorece a lixiviação do tanino; podem ocorrer problemas de adesão do filme

	mecânica (até 160 MPa); melhoram a transparência óptica.	à membrana durante a secagem.
Ferri et al., (2023)	Permite embalagens inteligentes (muda de cor ao detectar amônia de alimentos estragados); melhora a barreira contra O2 e CO2; estável até 200°C.	Redução drástica da transparência em altas doses (10 phr); aumenta a rigidez, mas diminui significativamente o alongamento na ruptura.
Xu et al. (2024)	Proporciona excelente barreira à radiação UV; aumenta a resistência à tração; reduz a permeabilidade ao vapor de água e ao oxigênio; prolonga a conservação de frutas frescas.	Os grupos hidroxila do tanino mantêm o caráter hidrofílico do material, exigindo aditivos hidrofóbicos (como ceras); promove aumento da rugosidade superficial.

2.4 Encapsulamento de compostos fenólicos

O encapsulamento protege compostos fenólicos contra oxidação, calor, luz e umidade, aumentando sua estabilidade e permitindo liberação controlada em embalagens ativas (Moeini et al., 2021; Ordoñez et al., 2022; Reis et al., 2023).

Maltodextrina, goma arábica, proteínas e polissacarídeos naturais formam partículas estáveis; a combinação de maltodextrina e goma arábica favorece a encapsulação em água, enquanto a liofilização é adequada a compostos termossensíveis (Ballesteros et al., 2017; Xie et al., 2024).

Compostos encapsulados distribuem-se melhor na matriz, reduzindo agregação e incompatibilidade. A liberação controlada prolonga as atividades antioxidante e antimicrobiana (Moeini et al., 2022; Ordoñez et al., 2022; Reis et al., 2023; Xie et al., 2024).

Na lignina, o encapsulamento melhora a dispersão e reduz agregados; nos taninos, reduz a lixiviação e preserva as atividades antioxidante e antimicrobiana (Agrippina et al., 2024; Basbasan et al., 2022; Priyadarshi et al., 2024; Seidi et al., 2025).

3. Conclusões

Taninos e lignina kraft de eucalipto podem substituir parcialmente polímeros fósseis por suas propriedades antioxidantes, antimicrobianas e de proteção UV. O encapsulamento por liofilização pode reduzir problemas de solubilidade, dispersão e compatibilidade, favorecendo embalagens ativas e sustentáveis.

4. Agradecimentos

Agradeço à Fundação Carlos Chagas Filho de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro (FAPERJ), ao INCT InovaLigno, à CAPES, ao PIBIT, à UFRRJ e ao Laboratório de Biorrefinaria Lignocelulósica pelo apoio, infraestrutura e suporte técnico.

5. Referências bibliográficas

Abdullah, A., Cai, J., Hafeez, M. A., et al. (2022). Biopolymer-based functional films for packaging applications: A review. Frontiers in Nutrition, 9, 1000116.

Agrippina, F. D., Ismayati, M., Hidayati, S., & Pratama, B. P. (2024). Utilization of tannins with various polymers for green-based active packaging: A review. Jurnal Sylva Lestari, 12(3), 648–683.

Amin, U., Khan, M. U., Majeed, Y., et al. (2021). Potentials of polysaccharides, lipids and proteins in biodegradable food packaging applications. International Journal of Biological Macromolecules, 183, 2184–2198. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2021.05.067

Ballesteros, L. F., Ramirez, M. J., Orrego, C. E., Teixeira, J. A., & Mussatto, S. I. (2017). Encapsulation of antioxidant phenolic compounds extracted from spent coffee grounds by freeze-drying and spray-drying using different coating materials. Food Chemistry, 237, 623–631. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.05.142

Basbasan, A. J., Carrillo, C. A., Mao, Y., & Bilgen, S. (2022). Emerging challenges on viability and commercialization of lignin in biobased polymers for food packaging: A review.

Czajkoski, A., Gomes, A., Kaufmann, K. C., Liszbinski, R. B., Jesus, M. B., & Cunha, R. L. (2020). Lignin derivatives stabilizing oil-in-water emulsions: Technological aspects, interfacial rheology and cytotoxicity. Industrial Crops and Products, 154, 112762.

Dirpan, A., Ainani, A. F., & Djalal, M. (2023). A review on biopolymer-based biodegradable film for food packaging: Trends over the last decade and future research. Polymers, 15, 2781. https://doi.org/10.3390/polym15132781

Ferri, M., Papchenko, K., Degli Esposti, M., et al. (2023). Fully biobased polyhydroxyalkanoate/tannin films as multifunctional materials for smart food packaging applications. ACS Applied Materials & Interfaces, 15, 28594–28605. https://doi.org/10.1021/acsami.3c04162

Gai, X., et al. (2024). High-barrier, photothermal conversion, and antibacterial composite enabled by kraft lignin-coated cellulose paper for plastic replacement. ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 12(51), 18350–18361.

Hoffmann, F. Z., & Siguel, F. (2018). Produção de filmes biodegradáveis à base de lignina, ágar e nanocelulose (Trabalho de conclusão de curso). Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Kumar, L., Ramakanth, D., Akhila, K., & Gaikwad, K. K. (2022). Edible films and coatings for food packaging applications: A review. Environmental Chemistry Letters, 20, 875–900. https://doi.org/10.1007/s10311-021-01339-z

Li, P., Sirviö, J. A., Haapala, A., Khakalo, A., & Liimatainen, H. (2019). Anti-oxidative and UV-absorbing biohybrid film of cellulose nanofibrils and tannin extract. Food Hydrocolloids, 92, 208–217. https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2019.02.002

Matheus, J. R. V., Dalsasso, R. R., Rebelatto, E. A., Andrade, K. S., Andrade, L. M., Andrade, C. J., Monteiro, A. R., & Fai, A. E. C. (2023). Biopolymers as green-based food packaging materials: A focus on modified and unmodified starch-based films. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 22, 1148–1183. https://doi.org/10.1111/1541-4337.13096

Meireles, T. Z. (2022). Avaliar frações de lignina kraft em biofilmes de acetato de celulose (Dissertação de mestrado). Universidade Federal de Viçosa.

Moeini, A., Germann, N., Malinconico, M., & Santagata, G. (2021). Formulation of secondary compounds as additives of biopolymer-based food packaging: A review. Trends in Food Science & Technology, 114, 342–354. https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.05.026

Moeini, A., Pedram, P., Fattahi, E., Cerruti, P., & Santagata, G. (2022). Edible polymers and secondary bioactive compounds for food packaging applications: Antimicrobial, mechanical, and gas barrier properties. Polymers, 14, 2395. https://doi.org/10.3390/polym14122395

Napolitano, A., Castaldo, S., & Scalbert, A. (2022). Condensed tannins, a viable solution to meet the need for sustainable and effective multifunctionality in food packaging:

Structure, sources, and properties. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 70, 751–758. https://doi.org/10.1021/acs.jafc.1c06733

Ordoñez, R., Atarés, L., & Chiralt, A. (2022). Biodegradable active materials containing phenolic acids for food packaging applications. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 21, 3910–3930. https://doi.org/10.1111/1541-4337.13008

Ortega, R., Forfora, N., Urdaneta, I., Azuaje, I., Vivas, K. A., Vera, R., Franco, J., Frazier, R., Abbati, C., Saloni, D., Jameel, H., Venditti, R., & Gonzalez, R. (2024). Life cycle assessment of Brazilian bleached eucalyptus kraft pulp: Integrating bleaching processes and biogenic carbon impacts. Cleaner Environmental Systems, 15, 100234.

Pinto, P. I., Magina, S., Budjav, E., Pinto, P. C., Liebner, F., & Evtuguin, D. (2022). Cationization of eucalyptus Kraft LignoBoost lignin: Preparation, properties, and potential applications. Industrial & Engineering Chemistry Research, 61(10), 3503–3515. https://doi.org/10.1021/acs.iecr.1c04763

Priyadarshi, R., Roy, S., Ghosh, T., & Rhim, J. W. (2024). Lignin as a sustainable and functional material for active food packaging applications: A review. Journal of Cleaner Production, 434, 143151. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.143151

Reis, C. A., Gomes, A., & do Amaral Sobral, P. J. (2023). Films based on biopolymers incorporated with active compounds encapsulated in emulsions: Properties and potential applications—A review. Foods, 12(19), 3602. https://doi.org/10.3390/foods12193602

Seidi, F., Liu, Y., Huang, Y., Xiao, H., & Crespy, D. (2025). Chemistry of lignin and condensed tannins as aromatic biopolymers. Chemical Society Reviews, 54, 3140–3232. https://doi.org/10.1039/D4CS00955K

Song, X., Zhang, Y., Li, Y., et al. (2022). Bioactive edible sodium alginate films incorporated with tannic acid as antimicrobial and antioxidative food packaging. Foods, 11, 3044. https://doi.org/10.3390/foods11193044

Wang, X., Xie, Y., Shi, Y., & Gu, X. (2022). A review on lignin antioxidants: Their sources, isolations, antioxidant activities and various applications. International Journal of Biological Macromolecules, 210, 734–755. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2022.04.139

Westlake, J. R., Tran, M. W., Jiang, Y., et al. (2023). Biodegradable biopolymers for active packaging: Demand, development and directions. Sustainable Food Technology, 1, 50–72. https://doi.org/10.1039/D2FB00058H

Xie, Q., Liu, G., & Zhang, Y. (2024). Edible films/coatings containing bioactive ingredients with micro/nano encapsulation: A comprehensive review of their fabrications, formulas, multifunctionality and applications in food packaging. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 64(16), 5341–5378. https://doi.org/10.1080/10408398.2023.2172900

Xu, X., Deng, S., Essawy, H., Lee, S. H., Lum, W. C., Zhou, X., Du, G., & Zhang, J. (2024). Chitosan-casein blended with condensed tannin and carnauba wax for the fabrication of antibacterial and antioxidant food packing films. International Journal of Biological Macromolecules, 277, 133784. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.133784

Valorização de cascas residuais de cambará (*Qualea paraensis* Ducke) para obtenção de filmes nanoestruturados

Resumo: Entre as fontes de biomassa disponíveis, os resíduos florestais são matérias-primas promissoras para a produção de materiais de maior valor agregado. Este estudo teve como objetivo avaliar filmes de nanofibrilas lignocelulósicas (NFLC) obtidas das cascas residuais de cambará (*Qualea paraensis* Ducke), quanto suas propriedades de barreira ao vapor de água e resistência à graxa. As cascas foram coletadas em indústria madeireira de Rolim de Moura – RO para a produção de NFLC. Suspensões de NFLC de cambará e de nanofibrilas de eucalipto (NFC) foram utilizadas para produção de filmes e avaliados quanto à permeabilidade ao vapor de água e resistência à graxa. Os filmes de ambas as origens apresentaram baixa barreira ao vapor de água e elevada resistência à graxa, comportamento este, associado à estrutura da rede nanofibrilar e as propriedades químicas da matéria-prima. Ambos os filmes apresentam potencial para diferentes aplicações, e recomenda-se a realização de novos estudos com outras espécies florestais.

Palavras-chave: Madeiras tropicais; Resíduos lignocelulósicos; Embalagens.

Valorization of cambará (*Qualea paraensis* Ducke) waste bark for obtaining nanostructured films

Abstract: Among the available biomass sources, forest waste is a promising raw material for producing higher value-added materials. This study aimed to evaluate nanolignocellulosic fibril (NFLC) films obtained from waste cambará (*Qualea paraensis* Ducke) bark, focusing on their water vapor barrier properties and grease resistance. The bark was collected from a sawmill in Rolim de Moura, RO, for NFLC production. Suspensions of cambará NFLC and eucalyptus nanofibrils (NFC) were used to produce the films, which were evaluated for water vapor permeability and grease resistance. Films from both sources showed low water vapor barrier capacity and high grease resistance, a behavior associated with the nanofibrillar network structure and the chemical properties of the raw material. Both films exhibit potential for different applications, and further studies involving other forest species are recommended.

Keywords: Tropical wood; Lignocellulosic wastes; Packaging.

1. Introdução

A crescente demanda por embalagens sustentáveis impulsiona o desenvolvimento de materiais renováveis capazes de substituir, total ou parcialmente, polímeros derivados do petróleo (Kapoor et al., 2025). Esse cenário é respaldado por iniciativas e acordos internacionais que versam a respeito da redução da poluição causada por plásticos e pela promoção da economia circular, a exemplo da Resolução UNEA 5/14 e do Regulamento Europeu de Embalagens e Resíduos de Embalagens (PPWR - *Packaging and Packaging Waste Regulation*) 2025/40. No cenário brasileiro, a Política Nacional de Resíduos Sólidos (Lei nº

12.305/2010) também incentiva a valorização de resíduos e o desenvolvimento de materiais mais sustentáveis.

Entre as fontes de biomassa disponíveis, os resíduos florestais são matérias-primas potenciais de obtenção de produtos de maior valor agregado (Silva et al., 2023; Braghiroli e Passarini, 2020). As cascas, por exemplo, que correspondem a um volume expressivo dos resíduos gerados pela indústria madeireira (Fernández et al., 2025), são geralmente destinadas à queima ou descartadas de forma inadequada. A casca é um material lignocelulósico cuja composição química difere da madeira, apresentando, em geral, maiores teores de extrativos (~16,5%) e lignina (~34,9%) e menor teor de holocelulose (~46,9%) (Carmo et al., 2016; Mota et al., 2021). Como meio de valorização desses resíduos, as cascas podem ser utilizadas como matéria-prima para obtenção de nanofibrilas lignocelulósicas (NFLC) e produção de filmes para embalagens e revestimentos. A obtenção de filmes representa uma alternativa para transformar um resíduo da indústria madeireira amazônica em um material funcional de maior valor agregado, contribuindo para o aproveitamento da biomassa e para os princípios da economia circular (Mascarenhas et al., 2022b; Silva et al., 2023).

Dentre a diversidade de espécies florestais madeireiras encontradas na Amazônia, o cambará (*Qualea paraensis* Ducke) encontra-se entre as 10 espécies mais exploradas pela indústria madeireira no estado de Rondônia (Pinto et al., 2023), consequentemente, promove a geração de grandes volumes de resíduos. Dessa forma, parte-se da hipótese de que as NFLCs provenientes das cascas de cambará apresentam potencial para a produção de filmes com propriedades de barreira comparáveis às de filmes produzidos exclusivamente com nanofibrilas de celulose. Nesse contexto, este trabalho teve como objetivo avaliar os filmes de nanofibrilas lignocelulósicas (NFLC) obtidas a partir das cascas residuais de cambará (*Qualea paraensis*) quanto às suas propriedades de barreira ao vapor de água e resistência à graxa.

2. Material e métodos

a. Coleta e pré-processamento das cascas de cambará

Para realização do estudo, foi realizada a coleta de cascas de árvores de cambará em indústrias madeireiras localizadas no município de Rolim de Moura – Rondônia. Após a coleta, as cascas foram higienizadas e submetidas a secagem em estufa de circulação forçada de ar, a uma temperatura de 65ºC por aproximadamente 72h. Depois de secas, as cascas foram transformadas em pequenos filetes e trituradas em moinho de facas tipo Willey. O material

moído foi peneirado em malha de 40 e 60 *mesh*, conforme a NBR 14660 (ABNT, 2003) para aplicação do pré-tratamento químico. O material peneirado (retido em malha de 40 *mesh*) foi submetido ao cozimento em banho-maria com solução de hidróxido de sódio (NaOH) a 5% (m/m) a uma temperatura de ~80ºC por 2h. Após esse período, as fibras lignocelulósicas (material resultante) foram lavadas com água corrente até atingirem pH próximo de 7, com o auxílio de pHmetro de bancada digital.

b. Obtenção das Nanofibrilas de lignocelulose (NFLC) e produção de filmes

As fibras lignocelulósicas foram dispersas em água deionizada na proporção de 1 g para 50 mL de água, para fibrilação em ultra refinador Super Mass Colloider Masuko Sangyo MKCA6-2. Para obtenção das nanofibrilas lignocelululósicas (NFLC) das cascas de cambará foram realizadas 20 passagens consecutivas de acordo com metodologia descrita por Mascarenhas et al. (2022a). As suspensões de eucalipto foram obtidas a partir de placas de polpa celulósica comercial, com dispersão em água deionizada, a uma concentração de 2,5% (m/m). Para obtenção das Nanofibrilas de celulose (NFC), as suspensões de polpa de eucalipto foram submetidas a 6 passagens consecutivas no ultra refinador.

Para produção dos filmes, empregou-se o método *casting*. As suspensões de NFLC de cascas de cambará e NFC de eucalipto foram diluídas em água deionizada em concentração de 1% (m/m). Com o objetivo de aumentar a capacidade filmogênica das suspensões de NFLC das cascas de cambará, adicionou-se 20% de NFC de eucalipto à suspensão. Como amostra controle, foram produzidos filmes constituídos exclusivamente por NFC de eucalipto. As soluções foram submetidas a agitação mecânica por 10 minutos, sendo posteriormente distribuídos 60 g de cada em placas de Petri acrílicas com 15 cm de diâmetro. A secagem dos filmes ocorreu em sala climatizada com temperatura controlada a 25ºC por cerca de 48h.

c. **Permeabilidade a vapor de água e resistência a graxa**

Para avaliação da capacidade de barreira ao vapor de água dos filmes, foram previamente preparados os kits de ensaio utilizando frascos de vidro de 10 mL e tampas plásticas. As tampas foram perfuradas com abertura circular de 7,4 mm de diâmetro para permitir a exposição dos filmes. Em cada frasco adicionou-se sílica gel até aproximadamente 65% de sua capacidade volumétrica e submetidos à secagem em estufa a 105 °C por cerca de 4 horas, visando a remoção da umidade do material. Como o ensaio requer condições controladas de temperatura e umidade relativa, os frascos foram acondicionados em um

dessecador contendo uma solução salina preparada com 2 L de água e 800 g de cloreto de sódio (NaCl), utilizada para manter a umidade relativa constante no interior do sistema.

Os corpos de prova dos filmes foram confeccionados com 15 mm de diâmetro e sua espessura mensurada com o auxílio de um micrômetro. Para a montagem dos kits, cada corpo de prova foi posicionado na parte interna da tampa e vedado com pequenos anéis de borracha, e posteriormente acoplado ao frasco contendo sílica gel. Cada tratamento foi composto por quatro repetições, cujas unidades experimentais foram previamente identificadas e pesadas. O ensaio consistiu na determinação da variação de massa contida nos frascos, obtida por meio de pesagens realizadas sempre no mesmo horário durante oito dias consecutivos (ASTM, 2020). Com base nesses dados, foi calculada a taxa de permeabilidade ao vapor de água (TPVA) utilizando a Equação 1. A partir dos valores de TPVA e da espessura dos filmes, calculou-se a permeabilidade ao vapor de água (PVA), conforme a Equação 2.

$$TPVA\left(g/m^2\,dia\right)=\frac{c}{t\times A} \qquad (1)$$

$$PVA\left(gmm/kPa^{-1}\,diam^2\right)=\frac{\left(TPVA\times e\right)}{\left(p\times UR_f-UR_d\right)} \qquad (2)$$

Em que: *c* é a massa da cápsula com a amostra (g); *t* é o tempo (dias); *A* é a área exposta da amostra (m²); *e* é a espessura da amostra (µm); *p* é a pressão de vapor de água (kPa) e URf - URd é a diferença entre a umidade externa e interna da cápsula a 23,63 °C.

Para realização do ensaio de resistência à graxa (TAPPI, 2022), foram inicialmente preparadas 12 soluções (kit óleo) com diferentes concentrações de óleo rícino (extrato de mamona), tolueno (C_7H_8) e heptano (C_7H_{16}) (Tabela 1). O óleo rícino foi pesado em balança semi-analítica, enquanto os volumes de heptano e tolueno foram medidos com pipeta graduada. Os componentes de cada solução foram adicionados a um béquer e submetido à agitação até a homogeneização completa. Posteriormente, as soluções foram transferidas para frascos de vidro âmbar provido de conta-gotas e devidamente identificados. As formulações foram numeradas de 1 a 12, em que o aumento da numeração corresponde ao aumento da agressividade da mistura em relação à penetração de graxas e óleos (maior capacidade de molhar e penetrar no material). Assim, considerou-se que o filme apresentou resistência a determinado kit, quando reteve completamente a solução, impedindo sua transferência para o papel Kraft.

Tabela 12 - Composição das soluções de cada kit utilizado no ensaio de barreira a óleo

Kit	Óleo (g)	Tolueno (ml)	Heptano (ml)
1	24,77	0	0
2	22,29	1,28	1,28
3	19,82	2,56	2,56
4	17,33	3,84	3,84
5	14,86	5,12	5,12
6	12,39	6,4	6,4
7	9,91	7,68	7,68
8	7,43	8,96	8,96
9	4,95	10,24	10,24
10	2,48	11,52	11,52
11	0	12,8	12,8
12	0	11,52	14,08

O ensaio de resistência à graxa foi conduzido com 4 repetições por tratamento, utilizando corpos de prova com dimensões de 3 × 3 cm. Para a realização do teste, os corpos de prova foram posicionados sobre folhas de papel Kraft em que foi depositado uma gota de cada kit. Após 30 segundos de contato, o excesso da solução foi removido com algodão. Em seguida, foi avaliada a capacidade de barreira dos filmes, ou seja, foi verificado se o material foi capaz de reter totalmente os líquidos, impedindo a transferência para o papel.

O material obtido a partir da fibrilação mecânica das fibras de casca de cambará foram considerados em nanoescala, pois mais de 65% das estruturas apresentaram diâmetro abaixo de 100 nm (ISO, 2017). Em relação ao material obtido a partir da polpa de Eucalipto, Mascarenhas et al. (2022a) mediram e classificaram como nanomaterial, pois mais de 70% das estruturas possuíam diâmetro abaixo de 100 nm. As fibras foram caracterizadas por meio da microscopia eletrônica de varredura de ultra-alta resolução e as medições dos diâmetros foram obtidas por meio do software ImageJ.

3. Resultados e discussão

A permeabilidade ao vapor de água dos filmes a base de NFLC de cascas de cambará foi aproximadamente duas vezes maior do que os filmes de eucalipto (Figura 1). A maior permeabilidade do cambará pode ser em decorrência da microestrutura dos filmes em função da formação da rede nanofibrilar, promovendo ao filme maior porosidade ou menor densidade (Mascarenhas et al., 2024).

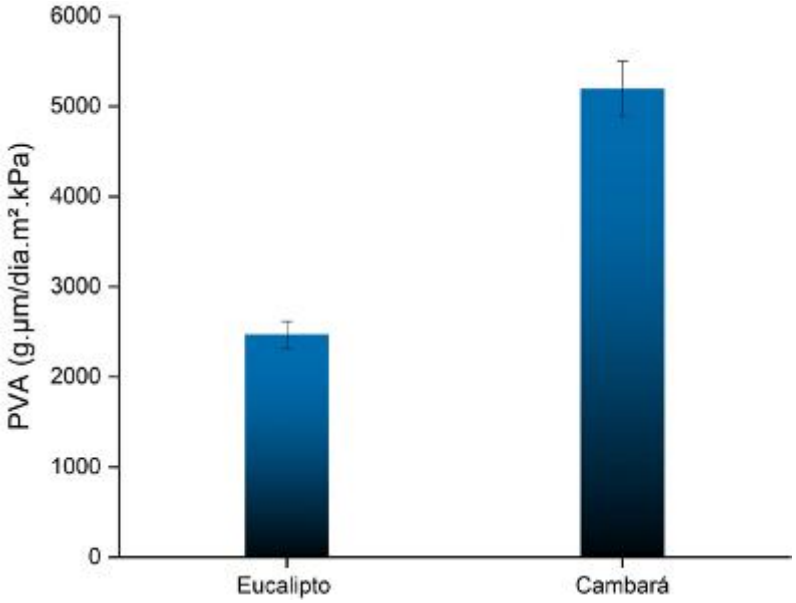


Figura 1 - Permeabilidade ao vapor de água dos filmes de NFC de eucalipto e filmes de NFLC produzidos a base de casca de cambará.

Segundo a classificação feita por Wang et al. (2018), os filmes de eucalipto, por apresentarem PVA dentro do intervalo de 1000 a 3000 g·µm/m^2·dia·kPa, podem ser classificados como baixa capacidade de barreira, assemelhando-se filmes compostos por poliamida ou ácido polilático. Já os filmes de cambará (>3000 g·µm/m^2·dia·kPa) podem ser classificados como muito baixa a sua capacidade de barreira, assemelhando-se a filmes a base de elastômero de silicone.

Embora os filmes de ambas as espécies não apresentem elevada barreira ao vapor de água, sua utilização continua sendo viável em aplicações específicas, nas quais, essa propriedade não é o principal objetivo. A permeabilidade ao vapor de água pode ser desejável em embalagens que permita a redução do acúmulo de água no interior, como as dedicadas a alimentos frescos (Nasra et al., 2025; Xu et al, 2024). Além disso, filmes permeáveis podem ser utilizados com filtro de barreira de partícula que permite a passagem de líquidos, ou revestimento de papeis porosos com capacidade de absorção de tintas (Xu et al., 2024; Mascarenhas et al., 2024).

Outra propriedade relevante para a indústria de embalagens é a capacidade dos filmes em atuar como barreira à graxa e aos óleos. Os filmes de NFC de eucalipto e os filmes a base de NFLC de cambará foram resistentes às soluções mais agressivas (kit 12), indicando que os filmes apresentam alta capacidade de barreira (Figura 2).

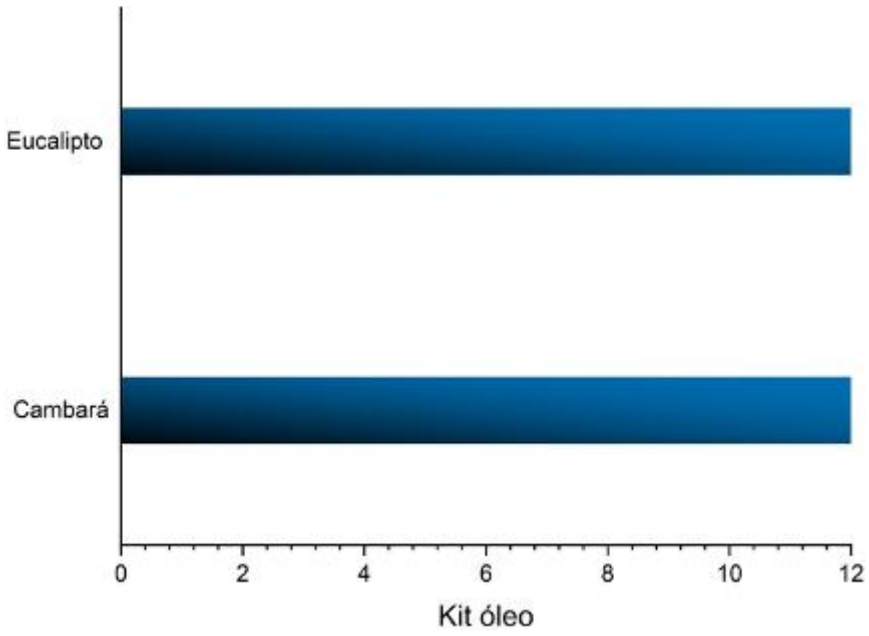


Figura 2 - Capacidade de barreira a óleo dos filmes de NFC de eucalipto e filmes de NFLC produzidos a base de casca de cambará.

O desempenho semelhante dos filmes com matérias-primas diferentes, pode ser atribuído à combinação entre o arranjo estrutural e composição química. A elevada densificação da rede nanofibrilar forma uma barreira física que dificulta a difusão de óleos através do filme (Hossain et al., 2022). Assim, os filmes de NFC de eucalipto, apresentaram alta barreira a óleos. Por outro lado, nos filmes de NFLC de cambará, a presença de lignina residual, pode ter contribuído para esse desempenho, uma vez que esse componente apresenta comportamento mais hidrofóbico que a celulose (Tayeb et al., 2020; Wang et al., 2019), reduzindo a afinidade do material por substâncias liquidas.

Filmes com alta capacidade de barreira à gordura são desejáveis para a indústria de embalagens alimentícias ou revestimento, inclusive embalagens de *fastfood* que tendem a reter mais gordura nos alimentos. Os materiais apresentam boa capacidade para receber impressões e tintas, reduzindo a necessidade de adesivos ou lacres, podendo ser feita a impressão diretamente sobre o filme ou o papel revestido (Silva et al., 2023). Além do potencial de aplicação na indústria de embalagens, o desenvolvimento desses materiais contribui para a economia circular, pois promove o aproveitamento de resíduos lignocelulósicos como matéria-prima para produtos de maior valor agregado.

4. Conclusões

Os filmes produzidos a partir de NFLC de cascas de cambará apresentam características com potencial para diferentes aplicações. Embora ambos os filmes apresentem baixa capacidade de barreira ao vapor de água, exibiram alta resistência a graxa, característica desejada para embalagens alimentícias e revestimentos. Recomenda-se a realização de estudos adicionais para avaliar outras propriedades desses materiais e a utilização de resíduos provenientes de outras espécies florestais.

5. Agradecimentos

À Fundação de Amparo à Pesquisas de Rondônia (FAPERO), à Universidade Federal de Lavras, ao CNPq por meio do INCT – Madeiras da Amazônia III e à CAPES pelo financiamento da pesquisa, à Universidade Federal de Lavras, à Embrapa instrumentação.

6. Referências bibliográficas

Associação brasileira de normas técnicas – ABNT. (2003). NBR 14660: Madeira Amostragem e preparação para análise. Rio de Janeiro: ABNT.

American Society for Testing and Materials - ASTM E104-20ª. (2020). Standard practice for maintaining constant relative humidity by means of aqueous solutions: West Conshohocken, PA, EUA, 2020.

Brasil. (2025). Decreto nº 12.688, de 21 de outubro de 2025, Regulamenta o art. 32, § 1º, e o art. 33, § 1º, da Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010, e institui o sistema de logística reversa de embalagens de plástico. https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2023-2026/2025/decreto/d12688.htm.

Braghiroli, F. L., & Passarini, L. (2020). Valorization of biomass residues from forest operations and wood manufacturing presents a wide range of sustainable and innovative possibilities. Current Forestry Reports, 6(2), 172-183. https://doi.org/10.1007/s40725-020-00112-9

Carmo JF, Miranda I, Quilhó T, Sousa VB, Carmo FH, Latorraca JV, Pereira, H (2016). Chemical and structural characterization of the bark of Albizia niopoides trees from the Amazon. Wood Science and Technology, 50(4), 677-692. https://doi.org/10.1007/s00226-016-0807-3

Fernández, M. P., Alzamora, R. M., Chateau, F., Elissetche, J. P., & Pérez, E. (2025). Discarded Small-Logs Recovery from Natural Forests: Improving the Value Chain. Forests, 16(9), 1456. https://www.mdpi.com/1999-4907/16/9/1456#

Hossain, R., Tajvidi, M., Bousfield, D., & Gardner, D. J. (2022). Recyclable grease-proof cellulose nanocomposites with enhanced water resistance for food serving applications. Cellulose, 29(10), 5623-5643. https://doi.org/10.1007/s10570-022-04608-4

International Organization for Standardization - ISO. (2017). ISO/TS 20477:2017 – Nanotechnologies: Standard terms and their definition for cellulose nanomaterial. https://cdn.standards.iteh.ai/samples/68153/673ae06f301c449895ca798ccef80d10/ISO-TS-20477-2017.pdf

Kapoor, D. D., Madaan, P., Kumar, J., Tiwari, S. K., Gupta, K. K., & Gupta, R. K. (2025). Transition towards renewable and biodegradable polymers: a comprehensive review. Journal of polymer research, 32(10), 345. https://doi.org/10.1007/s10965-025-04524-8

Mascarenhas, A. R. P., Scatolino, M. V., Dias, M. C., Martins, M. A., Mendonça, M. C., de Melo, R. R., ... & Tonoli, G. H. D. (2022a). Production of cellulose micro/nanofibrils with sodium silicate: impact on energy consumption, microstructure, crystallinity and stability of suspensions: Impact of Na2SiO3 on the properties of cellulose micro/nanofibrils. Nordic Pulp & Paper Research Journal, 37(4), 686-701. https://doi.org/10.1515/npprj-2022-0052

Mascarenhas, A. R. P., Setter, C., Scatolino, M. V., Lago, R. C. D., Batista, F. G., Medeiros, D. T. D., ... & Tonoli, G. H. D. (2024). Valorization of Coffea arabica Wood Waste to Obtain Suspensions of Lignocellulose Microfibrils and Lignocellulose Nanofibrils (LCMF/LCNF) and Production of Eco-Friendly Films for Packaging. Forests, 15(10), 1834. https://doi.org/10.3390/f15101834

Mascarenhas, A. R. P., Scatolino, M. V., Santos, A. D. A. D., Norcino, L. B., Duarte, P. J., Melo, R. R. D., ... & Tonoli, G. H. D. (2022b). Hydroxypropyl methylcellulose films reinforced with cellulose micro/nanofibrils: study of physical, optical, surface, barrier and mechanical properties: Valorization cellulosic materials for films production. Nordic Pulp & Paper Research Journal, 37(2), 366-384. https://doi.org/10.1515/npprj-2022-0006

Mota GS, Araujo ES, Lorenço M, de Abreu JLL, de O. Mori CL, Ferreira CA, Ferreira, GC (2021). Bark of Astronium lecointei Ducke trees from the Amazon: chemical and structural characterization. European Journal of Wood and Wood Products, 79(5), 1087-1096. https://doi.org/10.1007/s00107-021-01670-w

Nações Unidas. (2022). End plastic pollution: towards an international legally binding instrument: resolution. United Nations Environment Assembly of the United Nations Environment Programme, fifth session. https://digitallibrary.un.org/record/3999257

Nasra, A. E. S., Hasanien, Y. A., & El Mogy, S. A. (2025). The potential of nanocellulose composites for sustainable food packaging applications. Polymer Composites, 46(6), 5081-5127. https://doi.org/10.1002/pc.29321

Pinto R. C., Lentini M. W., Andrade M. B. T., Nunes F., Santos H., Costa J. N. (2023). Evolução da indústria de base florestal de Rondônia e oportunidades para o planejamento setorial e para a conservação das florestas de produção. IMAFLORA. Boletim Timberflow – junho 2023.

Silva, D. W., Batista, F. G., Scatolino, M. V., Mascarenhas, A. R. P., De Medeiros, D. T., Tonoli, G. H. D., ... & Alves Junior, F. T. (2023). Developing a biodegradable film for packaging with lignocellulosic materials from the Amazonian biodiversity. Polymers, 15(17), 3646. https://doi.org/10.3390/polym15173646

Technical Association of the Pulp and Paper Industry - TAPPI. (2022). TAPPI T 559 cm-22: Grease resistance test for paper and paperboard. TAPPI Press.

Tayeb, A. H., Tajvidi, M., & Bousfield, D. (2020). based oil barrier packaging using lignin-containing cellulose nanofibrils. Molecules, 25(6), 1344. https://doi.org/10.3390/molecules25061344

União Europeia. (2024). Regulamento (UE) 2025/40 do Parlamento Europeu e do Conselho de 19 de dezembro de 2024 relativo a embalagens e resíduos de embalagens. https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PT/TXT/PDF/?uri=OJ:L_202500040.

Xu, Y., Wu, Z., Li, A., Chen, N., Rao, J., & Zeng, Q. (2024). Nanocellulose composite films in food packaging materials: a review. Polymers, 16(3), 423. https://doi.org/10.3390/polym16030423

Wang, J., Gardner, D. J., Stark, N. M., Bousfield, D. W., Tajvidi, M., & Cai, Z. (2018). Moisture and oxygen barrier properties of cellulose nanomaterial-based films. ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 6(1), 49-70. https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.7b03523

Wang, W., Guo, T., Sun, K., Jin, Y., Gu, F., & Xiao, H. (2019). Lignin redistribution for enhancing barrier properties of cellulose-based materials. Polymers, 11(12), 1929. https://doi.org/10.3390/polym11121929

VALORIZAÇÃO DE LIGNINA KRAFT MODIFICADA NA PRODUÇÃO DE ADESIVOS LIGNINA-FENOL-FORMALDEÍDO

Gabrielle Fialho Abranches1; Êmilly Wakim de Almeida1; Iara Fontes Demuner1; Angelica De Cassia Oliveira Carneiro1; Thiago Oliveira Kessler1; Raquel Julia Cipriano dos Santos1;

[1] Universidade Federal De Viçosa, Mg – Brasil.

Resumo: A substituição do fenol por lignina em adesivos para painéis de madeira reconstituída constitui uma alternativa sustentável aos insumos petroquímicos. Este estudo avaliou o efeito do tratamento térmico da lignina kraft de eucalipto nas propriedades de adesivos lignina-fenol-formaldeído, sintetizados nas proporções de 25%, 50% e 75% de substituição do fenol. A lignina foi tratada termicamente em mufla, a 300 °C por 6 minutos. A lignina modificada apresentou 96,21% de lignina total e 2,32% de cinzas, indicando elevado grau de pureza. A viscosidade dos adesivos aumentou proporcionalmente com a substituição de lignina, atingindo 50, 260 e 325 cP para 25%, 50% e 75%, respectivamente. O pH permaneceu alcalino (10,65 a 11,14), enquanto o teor de sólidos diminuiu até 44,31% com o aumento da proporção de lignina. O tempo de gelatinização foi menor nas formulações de 50% e 75% em relação ao adesivo padrão, indicando cura mais rápida. Nos ensaios de cisalhamento, os adesivos com lignina tratada termicamente apresentaram desempenho superior ou equivalente ao do adesivo fenol-formaldeído em todas as proporções avaliadas. Conclui-se que o tratamento térmico aumenta a reatividade da lignina kraft, viabilizando seu uso como substituto parcial do fenol em adesivos com boa trabalhabilidade e desempenho técnico satisfatório.

Palavras-chave: Lignina kraft; Adesivo fenólico; Tratamento térmico; Painéis de madeira reconstituída.

VALORIZATION OF MODIFIED KRAFT LIGNIN IN THE PRODUCTION OF LIGNIN-PHENOL-FORMALDEHYDE ADHESIVES

Abstract: Replacing phenol with lignin in adhesives for reconstituted wood panels is a sustainable alternative to petrochemical inputs. This study evaluated the effect of thermal treatment of eucalyptus kraft lignin on the properties of lignin-phenol-formaldehyde adhesives, synthesized at phenol substitution ratios of 25%, 50%, and 75%. The lignin was thermally treated in a muffle furnace at 300 °C for 6 minutes. The modified lignin presented 96.21% total lignin and 2.32% ash content, indicating a high degree of purity. Adhesive viscosity increased proportionally with lignin substitution, reaching 50, 260, and 325 cP for 25%, 50%, and 75%, respectively. The pH remained alkaline (10.65 to 11.14), while solids content decreased to as low as 44.31% with increasing lignin proportion. Gelatinization time was shorter in the 50% and 75% formulations compared to the standard adhesive, indicating faster curing. In shear strength tests, adhesives with thermally treated lignin showed performance equal to or superior to that of the phenol-formaldehyde adhesive across all evaluated ratios. It is concluded that thermal treatment increases the reactivity of kraft lignin, making it viable as a partial phenol substitute in adhesives with good workability and satisfactory technical performance.

Keywords: Kraft lignin; Phenolic adhesive; Thermal treatment; Reconstituted wood panels.

1. Introdução

O crescente consumo de petróleo e seus derivados nas últimas décadas tem intensificado crises energéticas e ambientais em escala global, impulsionando a busca por alternativas sustentáveis em diversos setores industriais (SINGH et al., 2025). Nesse cenário, a substituição de insumos petroquímicos por matérias-primas de fontes renováveis tem ganhado destaque, alinhada aos princípios da bioeconomia e da economia circular (YANG et al., 2024). Um dos campos mais promissores para essa transição é a indústria de painéis de madeira, cuja produção é altamente dependente de adesivos sintéticos, como as resinas de fenol-formaldeído (FF) que são oriundas de fontes fósseis (OKTAY et al., 2024).

Na indústria de painéis de madeira, a escolha do adesivo é um fator determinante para o desempenho do produto final. Para atender às exigências técnicas e operacionais, os adesivos devem apresentar propriedades específicas, como elevada resistência mecânica, estabilidade térmica, resistência à umidade, tempo de cura compatível com o processo industrial, boa compatibilidade com os substratos utilizados e baixa emissão de compostos voláteis (CALVEZ et al., 2024). Nesse contexto, um adesivo adequado para aplicações industriais deve apresentar boa aderência, elevada coesão interna e resistência à delaminação, mesmo sob condições ambientais adversas. Além disso, características como reatividade controlada, viscosidade adequada e facilidade de aplicação são fundamentais para garantir o bom desempenho em escala industrial (PIZZI, 1994).

Durante o cozimento da madeira com licor alcalino (licor branco), a lignina é dissolvida e liberada junto às hemiceluloses, permanecendo concentrada no licor negro, efluente rico em lignina, matéria orgânica e compostos inorgânicos gerado ao final do processo. Tradicionalmente, esse licor é queimado em caldeiras de recuperação para geração de energia e reaproveitamento dos reagentes químicos. No entanto, visando a valorização de coprodutos dentro do conceito de biorrefinaria, a extração da lignina presente no licor negro tem se destacado como uma estratégia promissora para diversificar sua aplicação industrial. Contudo, visando a geração de produtos de alto valor agregado e o melhor aproveitamento de coprodutos, a extração da lignina contida neste licor tem se destacado como uma estratégia fundamental dentro do conceito de biorrefinarias.

A lignina assim extraída apresenta baixa reatividade intrínseca, atribuída sobretudo aos fenômenos de condensação estrutural decorrentes das condições severas de temperatura e

alcalinidade do processo de polpação kraft. Como consequência, observa-se redução na disponibilidade de grupos funcionais reativos, particularmente as hidroxilas fenólicas, responsáveis por grande parte da reatividade da lignina frente a agentes eletrofílicos como o formaldeído (MANSOURI; SALMI, 2020). Essa limitação compromete o desempenho da lignina kraft em sistemas poliméricos, restringindo sua capacidade de reticulação. Diante disso, torna-se necessária a aplicação de modificações térmicas ou químicas como etapa preliminar para o incremento de sua reatividade e viabilização de seu uso como substituta parcial do fenol na síntese de adesivos fenólicos.

A eficiência da síntese de adesivos lignina-fenol-formaldeído depende da capacidade de interação química entre os reagentes, sendo a reatividade da lignina um fator determinante para a formação da rede polimérica. Com o objetivo de aumentar a reatividade da lignina em relação ao formaldeído, diferentes técnicas de ativação têm sido propostas, entre as quais se destaca a fenolação. Esse processo consiste em uma alternativa simples, rápida e de baixo custo, capaz de incorporar grupos fenólicos adicionais à estrutura da lignina, aumentando o número de sítios reativos disponíveis e favorecendo sua participação na reação de policondensação com o formaldeído (MANSOURI; SALMI, 2020; ZHANG et al., 2013).

Diante desse contexto, este estudo teve como objetivo avaliar o efeito da modificação térmica da lignina kraft sobre suas propriedades químicas e sua aplicação na síntese de adesivos lignina-fenol-formaldeído, buscando ampliar o potencial de aproveitamento desse material como matéria-prima renovável para a produção de adesivos de forma mais sustentável.

2. Material e métodos

2.1. Tratamento térmico da lignina

Foi utilizado uma lignina kraft de eucalipto, a qual foi submetida a um aquecimento controlado a 300 °C por 6 minutos em um container metálico inserido em forno elétrico tipo mufla, seguindo a metodologia descrita por Magalhães *et al.* (2019).

2.2. Fenolação da lignina

O processo de fenolação foi realizado conforme o procedimento sugerido por Khan *et al.* (2004). A lignina e o fenol foram misturados em béquer, em diferentes proporções (Tabela 1), e essa mistura foi levada a banho-maria por uma hora, a temperatura de 40 °C, em constante agitação, até a obtenção de uma massa homogênea, denominada lignina fenolada.

Tabela 1: Proporções lignina-fenol-formaldeído sintetizados.

Adesivo	L:F (%)
1	25:75
2	50:50
3	75:25

Onde L:F: proporção, em porcentagem, de lignina e fenol utilizados na fenolação.

2.3. Síntese do adesivo fenol-formaldeído (testemunha)

A síntese do adesivo Fenol-formaldeído foi realizada conforme apresentado na Figura 1.

Figura 1: Síntese Fenol- formaldeído



Fonte: Próprio autor.

2.4. Síntese dos adesivos lignina-fenol-formaldeído

Primeiramente foi realizado a fenolação, com o objetivo de aumentar a reatividade das ligninas nas sínteses dos adesivos, onde foi colocado em um beker a lignina e o fenol nas proporções avaliadas. As misturas foram mantidas a banho-maria a 40°C por 1 hora, para obtenção de uma massa homogênea. Após a fenolação foi finalizada as sínteses dos adesivos lignina-fenol-formaldeído, seguindo a síntese utilizada na formulação do adesivo fenol-formaldeído, adicionando-se 20g de metanol com o intuito de retardar as reações de hidroximetilação durante a síntese para o ajuste da viscosidade final.

2.5. Caracterização dos adesivos

Foram mensurados, a viscosidade, potencial hidrogeniônico (pH), teor de sólidos e tempo de gelatinização dos cinco adesivos produzidos.

2.6. Viscosidade

A viscosidade, foi determinada de acordo com a norma ASTM D1084-97 (método B), utilizando um viscosímetro Brookfield-LV, em amostras de aproximadamente 100 mL (ASTM, 1998).

2.7. pH

O pH foi mensurado em pHmetro da marca Digimed, modelo DM-2P, à temperatura de 25 °C, em amostras de aproximadamente 100 mL (BIANCHE, 2014).

2.8. Teor de sólidos

O teor de sólidos dos adesivos foi calculado de acordo com a norma ASTM-D1518-60 (ASTM, 1994), evaporando-se a água das amostras, contendo 1 g de adesivo, que foram levados à estufa à 103 + 2 °C, até atingirem massa constante.

2.9. Tempo de gelatinização

O tempo de gelatinização foi obtido com amostras de 1 g, colocadas em tubos de ensaio de 15 cm de altura e 2 cm de diâmetro, em cujo interior foi mergulhado um bastão de vidro. O conjunto tubo-bastão foi aquecido em banho de glicerina a 180 °C, cronometrando-se o tempo gasto até a polimerização do adesivo (ALMEIDA, 2009).

2.10. Resistência ao cisalhamento na linha de cola e falha na madeira

Para determinar a resistência da linha de cola à ao cisalhamento seco e a porcentagem de falha na madeira, foram produzidas juntas coladas constituídas de duas lâminas de *Pinus* sp. Para a confecção das juntas coladas utilizaram-se duas lâminas sobrepostas, sobre as quais se aplicou 200 g/m² de adesivo, em face dupla, de forma manual, com o auxílio de pincéis e espátulas. As juntas foram pré-prensadas em temperatura ambiente por 4 minutos, e então prensadas em prensa hidráulica INCO tipo PHC, à 180 °C e 12 kgf/cm2 de pressão, durante 8 minutos. Após, foi armazenada em câmara climática, com temperatura e umidade relativa controladas, até o momento do ensaio.

Os corpos de prova foram submetidos à tensão de ruptura ao cisalhamento na linha de cola em uma máquina pneumática de ensaio de cisalhamento na colagem, marca Contenco-Pavitest 1.01-0, modelo I 4230. Após o ensaio de ruptura dos corpos de prova, determinou-se percentual de falha na madeira, de acordo com critérios estabelecidos pela ASTM D-3110 (ASTM, 1994).

3. Resultados e discussão

Na Tabela 3 estão apresentados os resultados das propriedades da lignina Kraft modificada termicamente.

Tabela 3: Propriedades da lignina utilizada para síntese dos adesivos

Propriedades	Média
UEH(%)	7,97
Lignina total (%)	96,21
Carboidratos (%)	2,15
C / H / N / S / O (%)	54,6 / 4,69 / 0,15 / 1,8/ 38,78
Teor de cinzas (%)	2,32

O material analisado apresentou teor médio de umidade de 7,97%, valor considerado adequado para garantir estabilidade durante o armazenamento e facilitar sua manipulação nas etapas de modificação química e síntese do adesivo. Teores de umidade muito baixos tendem a deixar a lignina Kraft excessivamente pulverulenta, dificultando seu manuseio, enquanto teores muito elevados tornam o material pegajoso e de difícil dosagem; valores intermediários, como o obtido neste estudo, favorecem tanto a estabilidade quanto a manipulação do material, esse comportamento também discutido por Santos (2016) ao caracterizar lignina Kraft destinada à síntese de adesivos lignina-fenol-formaldeído.

O conteúdo de lignina total foi de 96,21%, evidenciando a alta eficiência dos processos de extração, fator essencial para o desempenho da lignina como agente fenólico reativo. Os teores de carboidratos (2,15%) e cinzas (2,32%) foram baixos, o que indica baixa contaminação por resíduos polissacarídicos e minerais, minimizando interferências na reatividade da lignina e reduzindo a formação de subprodutos indesejáveis durante a reação com o formaldeído. Esse resultado está em linha com o observado por Santos (2016), que também verificou baixos teores de carboidratos e cinzas em lignina Kraft destinada à síntese de adesivos lignina-fenol-

formaldeído, associados a alto percentual de lignina total, condição apontada pela autora como favorável à substituição do fenol na formulação do adesivo.

A análise elementar revelou percentuais de 54,6% de carbono, 4,69% de hidrogênio, 0,15% de nitrogênio, 1,8% de enxofre e 38,78% de oxigênio. O elevado teor de carbono é coerente com a alta pureza e o elevado percentual de lignina total da amostra, uma vez que as ligninas são macromoléculas complexas formadas por unidades aromáticas de alta estabilidade e maior concentração de carbono em relação a outros componentes da biomassa (YANG et al., 2007; HAYKIRIACMA et al., 2010, apud PEREIRA et al., 2013). O baixíssimo teor de nitrogênio (0,15%) indica reduzida presença de resíduos proteicos remanescentes do processo de extração, reforçando a elevada pureza do material.

A presença de enxofre (1,8%) está associada ao processo Kraft utilizado na extração, mais especificamente aos sulfatos que se ligam à estrutura da lignina em razão de sua propriedade de sulfonação, podendo influenciar propriedades específicas como o odor e a reatividade. Comparativamente, Santos (2016), analisando lignina Kraft com finalidade semelhante, obteve teor de enxofre de 2,4%, valor próximo ao aqui verificado e dentro da faixa típica reportada na literatura para lignina Kraft (1,5% a 3%). O baixo teor de cinzas obtido (2,32%) também é indicativo de bons níveis de lavagem da polpa e de recuperação dos licores de cozimento durante o processo de extração, refletindo a eficiência do método empregado.

3.2. Caracterização do adesivo

Tabela 4. Valores médios das propriedades dos adesivos lignina-fenol-formaldeído: Lignina kraft tratada em forno tipo mufla

Tabela 4. Valores médios das propriedades dos adesivos lignina-fenol-formaldeído.

Formulação adesiva	Propriedades - Adesivo produzido com a lignina B			
	Viscosidade (cP)	pH	Teor de Sólidos (%)	Tempo de gelatinização (m)
LTFF 25%	50	11,14	46,62	1:30
LTFF 50%	260	11,05	44,91	1:04
LTFF 75%	325	10,65	44,31	1:05
FF	475	11,07	51,99	1:20

A adição de lignina kraft modificada em forno mufla proporcionou um aumento progressivo de viscosidade com a substituição (50, 260 e 325 cP para 25%, 50% e 75%, respectivamente). Santos (2016) relatou tendência semelhante ao estudar ligninas fenoladas, associando o fenômeno a dois fatores concomitantes: a maior carga de sólidos introduzida no sistema e o surgimento de novas ligações cruzadas entre as moléculas de lignina e fenol ao longo da reação. Na mesma direção, Pizzi e Mittal (2003) destacam que reações de condensação mais prolongadas favorecem a formação de cadeias poliméricas mais longas, elevando a massa molar média do adesivo; como a lignina é intrinsecamente mais volumosa e possui maior número de sítios reativos que o fenol, sua presença tende a acentuar esse efeito conforme sua proporção na formulação aumenta.

Os valores mantiveram-se em uma faixa de boa trabalhabilidade e abaixo da viscosidade da resina FF, o que tem implicação prática direta: segundo Oliveira et al. (2007 apud SANTOS, 2016), a viscosidade governa o modo como o adesivo se espalha e penetra na estrutura da madeira. Um adesivo pouco viscoso tende a escoar em excesso para o interior do substrato, empobrecendo a linha de cola; já um adesivo excessivamente viscoso dificulta sua distribuição uniforme, resultando em uma camada de cola mais espessa e irregular.

O pH permaneceu alcalino, embora tenha ocorrido uma leve queda na formulação de 75% (10,65), ainda dentro do ideal para a reação.

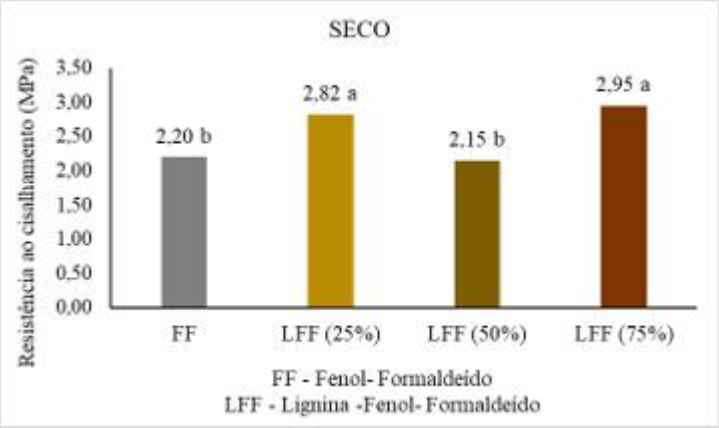
O teor de sólidos também seguiu a tendência de queda com o aumento da lignina. Dias (2014 apud SANTOS, 2016) oferece uma explicação para esse comportamento: à medida que lignina e formaldeído reagem entre si, água é gerada como subproduto da condensação, o que naturalmente dilui a fração sólida remanescente no adesivo. Some-se a isso a reatividade limitada da lignina em relação ao fenol, parte do formaldeído adicionado ao sistema acaba não reagindo e se perde por evaporação junto dessa água formada, o que amplifica a redução no teor de sólidos nas formulações com maior participação de lignina.

O tempo de gelatinização teve um aumento inicial com 25% de lignina (1:30), seguido de redução nos níveis de 50% (1:04) e 75% (1:05), tornando a cura mais rápida que a do adesivo de referência. Tanto Santos (2016) quanto Dias (2014) atribuem esse encurtamento a um maior grau de reticulação induzido pela lignina na estrutura do adesivo. Este resultado evidencia a natureza complexa da reatividade da lignina, que pode tanto retardar quanto acelerar o processo de cura, dependendo do grau de substituição.

3.3. Cisalhamento

Na Figura 2 são apresentados os valores médios de resistência ao cisalhamento das juntas coladas, avaliadas em condições seca.

Figura 2: Valores médios de resistência ao cisalhamento das juntas coladas



Os resultados de resistência ao cisalhamento mostraram que o efeito da substituição parcial do fenol por lignina depende da proporção de lignina utilizada. A lignina kraft tratada em forno tipo mufla destacou-se positivamente, com valores superiores ou equivalentes ao adesivo de referência em diferentes níveis de substituição. Esse comportamento pode estar associado ao maior teor de grupos fenólicos livres e melhor compatibilidade estrutural, características que aumentam sua reatividade frente ao formaldeído e permitem substituições elevadas e a manutenção da resistência ao cisalhamento a seco (GOUVEIA et al., 2018; MAGALHÃES et al., 2019).

4. Conclusões

A modificação térmica da lignina kraft mostrou-se uma estratégia promissora para sua aplicação como substituta parcial do fenol na síntese de adesivos fenólicos. A lignina tratada em forno tipo mufla apresentou bom desempenho, possibilitando a obtenção de adesivos com viscosidade adequada ao processamento e resistência ao cisalhamento equivalente ou superior à do adesivo fenólico de referência, mesmo com até 75% de substituição do fenol. Esses resultados evidenciam o potencial da lignina modificada como matéria-prima renovável para o desenvolvimento de adesivos mais sustentáveis, sem comprometer o desempenho tecnológico.

5. Agradecimentos

Os autores agradecem ao Laboratório de Painéis e Energia da Madeira (LAPEM), ao Laboratório de Celulose e Papel (LCP), ao Departamento de Engenharia Florestal (DEF) e à Universidade Federal de Viçosa (UFV) pelo suporte técnico, infraestrutura e apoio institucional disponibilizados para a execução desta pesquisa. Agradecem, ainda, ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio financeiro concedido ao desenvolvimento deste trabalho.

6. Referências bibliográficas

Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 14929**: Madeira – Determinação do teor de umidade. Rio de Janeiro, 2003.

ALMEIDA, C. A. *Produção e avaliação de adesivos à base de taninos de casca de barbatimão (Stryphnodendron adstringens) para produção de compensados.* 2009. Tese (Doutorado em Ciência e Tecnologia da Madeira) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2009.

ANDRADE, M. V. A. S. *et al.* Lignin-based materials for soil applications: a review. **Journal of Environmental Quality**, v. 50, n. 5, p. 993-1012, 2021.

ASTM. American Society for Testing and Materials. **ASTM D1084-97**: Standard Test Methods for Viscosity of Adhesives. West Conshohocken, PA, 1998.

ASTM. American Society for Testing and Materials. **ASTM D1518-60**: Standard Test Method for Thermal Transmittance of Textile Materials. West Conshohocken, PA, 1994.

ASTM. American Society for Testing and Materials. **ASTM D3110-94**: Standard Specification for Adhesives Used in Nonstructural Glued Lumber Products. West Conshohocken, PA, 1994.

BIANCHE, J. J. *Adesivos de Lignina-Fenol-Formaldeído para produção de painéis de partículas.* 2014. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia da Madeira) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2014.

DIAS, L. M. S. *Síntese e caracterização de adesivos de lignina Kraft de eucalipto.* 2014. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2014.

EPA. United States Environmental Protection Agency. **Volatile Organic Compounds' Impact on Indoor Air Quality.** Washington, DC: EPA, 2023. Disponível em: https://www.epa.gov/indoor-air-quality-iaq/volatile-organic-compounds-impact-indoor-air-quality. Acesso em: 08 jul. 2025.

GOUVÊA, Adriana de Fátima Gomes *et al.* Lignina do licor negro Kraft de eucalipto: usos, extração e caracterização. *In:* GOUVÊA, Adriana de Fátima Gomes; CARVALHO, Ana Márcia Macedo Ladeira de; CARNEIRO, Angélica de Cássia Oliveira. **Extração da lignina Kraft de eucalipto e uso para energia.** Curitiba: Appris, 2018. p. 15-43.

GOUVEIA, A. F. G.; GUTIÉRREZ, A.; SANTOS, J. C. dos; MARTIN-SAMPEDRO, R.; LABIDI, J.; COLODETTE, J. L. Characterization of kraft lignin and its use in the preparation of phenolic adhesives. **BioResources**, v. 13, n. 3, p. 6041-6056, 2018. Disponível em: https://doi.org/10.15376/biores.13.3.6041-6056. Acesso em: 11 jul. 2025.

KHAN, M. A. *et al.* A study on the phenolation of lignin for the preparation of lignin-based phenol formaldehyde resin. **Journal of Adhesion Science and Technology**, v. 18, n. 15-16, p. 1845-1856, 2004.

LI, R. *et al.* Lignin-based adhesives for wood composites: a review. **Green Chemistry**, v. 24, n. 3, p. 1003-1030, 2022.

MAGALHÃES, M. A. *et al.* Adição de lignina Kraft à resina fenólica para a fabricação de compensados. **Ciência da Madeira (Brazilian Journal of Wood Science)**, v. 10, n. 2, p. 142-149, 2019. DOI: 10.12953/2177-6830/rcm.v10n2p142-149.

MANSOURI, N. E. E.; SALMI, J. Phenolation of kraft lignin for use in phenolic resins. **Holzforschung**, v. 74, n. 2, p. 159-168, 2020.

OLIVEIRA, J. T. S.; FIEDLER, N. C.; NOGUEIRA, M. (Org.). **Tecnologias aplicadas ao setor madeireiro II.** Vitória: Gráfica Aquarius, 2007. p. 99-128.

PEREIRA, B. L. C. *et al.* Influence of chemical composition of Eucalyptus wood on gravimetric yield and charcoal properties. **BioResources**, v. 8, n. 3, p. 4574-4592, 2013.

PIZZI, A.; MITTAL, K. L. **Handbook of adhesives technology.** 2. ed. New York: Marcel Dekker, 2003.

SANTOS, F. A. *Desenvolvimento e caracterização de adesivos fenol-formaldeído modificados com lignina para produção de painéis de madeira.* 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2016.

SANTOS, Larissa Carvalho. *Síntese e caracterização de adesivos lignina-fenol-formaldeído para madeira e derivados.* 2016. 43 f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2016.

TAPPI. Technical Association of the Pulp and Paper Industry. **T 211 om-93**: Ash in wood, pulp, paper and paperboard: combustion at 525°C. Atlanta, 1993.

WALLIS, A. F. A. *et al.* Determination of the carbohydrate composition of wood and pulp samples by gas chromatography. **Journal of Wood Chemistry and Technology**, v. 16, n. 1, p. 59-71, 1996.

ZHANG, W. *et al.* A review on bio-based adhesives for wood composites. **Industrial Crops and Products**, v. 145, p. 112125, 2020.

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Variação na Produção de Compostos Fenólicos entre Cajueiro Selvagem e Cajueiro-Anão Precoce (*Anacardium occidentale* L.)

Paula Evanyn Pessoa do Nascimento[1]; Tatiane Kelly Barbosa de Azevedo[1]; Kayo Lucas Batista de Paiva[1]; Denys Santos de Souza[1]; Jordanna Karolina Aires da Rocha[1]; Elaine Cristina Alves da Silva[1]; Wilkally Crislian Laynne de Moura[1]; Fernando Hermínio Ferreira Milheiro Nunes[2]

[1] Escola Agrícola de Jundiaí. Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN).
[2] Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro (UTAD).

Resumo: O cajueiro (*Anacardium occidentale* L.) apresenta compostos fenólicos de interesse biológico e tecnológico. O presente trabalho teve como objetivo a avaliação dos teores de fenólicos totais na casca do caule de cajueiro selvagem e cajueiro-anão precoce utilizando acetona, água e metanol como solventes extratores. Os compostos fenólicos totais foram determinados pelo método Prussian Blue Test, e os resultados foram submetidos à análise de variância e teste de Tukey ($p \leq 0,05$). O cajueiro selvagem apresentou teores superiores aos do cajueiro-anão precoce em todos os solventes. A água e o metanol apresentaram eficiência equivalente e superior à acetona para o cajueiro selvagem. Dessa forma, conclui-se que os teores variam conforme o material vegetal e o solvente, se destacando a água como alternativa ao metanol na extração de fenólicos, devido ao seu desempenho equivalente, a sua menor toxicidade, menor custo, maior sustentabilidade e potencial para aplicações ambientais, industriais, farmacêuticas, biotecnológicas e tecnológicas.

Palavras-chave: Extração vegetal; Solventes extratores; Metabólitos secundários.

Variation in Phenolic Compound Production between Wild Cashew and Dwarf Cashew (*Anacardium occidentale* L.)

Abstract: Cashew (*Anacardium occidentale* L.) contains phenolic compounds of biological and technological interest. This study aimed to evaluate the total phenolic contents in the stem bark of wild and dwarf cashew using acetone, water, and methanol as extraction solvents. Total phenolic compounds were determined by the Prussian Blue Test, and the results were subjected to analysis of variance and Tukey's test ($p \leq 0.05$). Wild cashew showed higher total phenolic contents than dwarf cashew for all solvents evaluated. Water and methanol showed equivalent extraction efficiency and were both superior to acetone for wild cashew. It was concluded that total phenolic contents vary according to the plant material and extraction solvent, highlighting water as an alternative to methanol for phenolic extraction due to its equivalent performance, lower toxicity, lower cost, greater sustainability, and potential for environmental, industrial, pharmaceutical, biotechnological, and technological applications.

Keywords: Plant extraction; Extraction solvents; Secondary metabolites.

1. Introdução

O cajueiro (*Anacardium occidentale* L.) é uma espécie de elevada importância econômica e biológica, explorada pela produção da castanha e do pseudofruto, bem como pelo potencial de aproveitamento de diferentes frações vegetais para fins alimentares, farmacológicos e industriais (Chen et al., 2023; Salehi et al., 2019). Essa relevância decorre, em parte, da diversidade de metabólitos secundários presentes na espécie, entre os quais se destacam os compostos fenólicos, em razão de sua ampla distribuição nos órgãos vegetais, de suas propriedades biológicas e de seu potencial de aplicação tecnológica (Salehi et al., 2019; Nurzyńska-Wierdak et al., 2023).

A composição fenólica do cajueiro varia de acordo com o órgão vegetal analisado. O pseudofruto apresenta polifenóis, flavonoides e taninos, enquanto o tegumento da castanha constitui uma fonte de compostos tânicos com potencial de aproveitamento tecnológico (Chen et al., 2023; Gutiérrez-Paz et al., 2024; Sruthi et al., 2022). O líquido da casca da castanha caracteriza-se pela presença de fenóis lipídicos de cadeia longa, com destaque para ácido anacárdico, cardanol e cardol, enquanto folhas, raízes e casca do caule também apresentam diferentes classes de compostos fenólicos (Trevisan et al., 2006; Okoronkwo et al., 2024; Ribeiro et al., 2021).

A produção e o acúmulo de compostos fenólicos podem variar qualitativa e quantitativamente entre genótipos, cultivares, órgãos vegetais e estádios de desenvolvimento (Nurzyńska-Wierdak et al., 2023). Em *A. occidentale*, diferenças na produção de compostos fenólicos também têm sido relatadas entre materiais selvagens e domesticados (Souza et al., 2024). Populações selvagens avaliadas no Nordeste brasileiro apresentaram teores de fenólicos totais e flavonoides superiores aos valores relatados para cajueiros domesticados, além de variações entre populações e órgãos vegetais, indicando diferenças na produção desses metabólitos na espécie (Ribeiro et al., 2021).

Processos de domesticação e melhoramento vegetal podem alterar o metabolismo secundário das plantas, modificando a produção e o acúmulo de compostos fenólicos (Ku et al., 2020; Meyer et al., 2015; Yang et al., 2022). Essas alterações têm sido evidenciadas por diferenças nos perfis fenólicos entre materiais silvestres e domesticados de diferentes espécies cultivadas (Meyer et al., 2015; Zambiasi et al., 2025).

Além da relevância química e biológica, os compostos fenólicos presentes na casca do cajueiro apresentam interesse para aplicações ambientais. Estudos anteriores avaliaram o emprego de taninos obtidos de diferentes materiais de *A. occidentale* em processos de tratamento de água e efluentes. Taninos provenientes do cajueiro-anão precoce, após

cationização, apresentaram capacidade de redução da turbidez, embora com eficiência limitada nas condições avaliadas, enquanto taninos extraídos da casca do cajueiro selvagem com sulfito de sódio e posteriormente modificados apresentaram resultados promissores como coagulantes de origem vegetal (Souza et al., 2024; Nascimento et al., 2026).

Esses resultados evidenciam que diferenças entre materiais vegetais e condições de extração podem ser relevantes para o aproveitamento tecnológico dos compostos fenólicos da espécie. Nesse contexto, a avaliação comparativa de materiais de cajueiro submetidos às mesmas condições experimentais e a diferentes solventes extratores pode contribuir para a compreensão da variabilidade química de *A. occidentale*.

Apesar dos avanços na caracterização química e no aproveitamento tecnológico dos compostos fenólicos de *A. occidentale*, ainda são limitados os estudos que comparam diretamente materiais selvagens e melhorados quanto aos teores de compostos fenólicos totais obtidos sob condições experimentais equivalentes. Essa lacuna reforça a importância de estudos comparativos que considerem conjuntamente o material vegetal e o sistema extrator, visando ampliar o conhecimento sobre os fatores associados à obtenção de compostos fenólicos de interesse tecnológico.

Dessa forma, o presente estudo teve como objetivo avaliar os teores de compostos fenólicos totais na casca do caule de cajueiro selvagem e cajueiro-anão precoce, utilizando diferentes solventes extratores.

2. Material e métodos

Coleta de cascas

As cascas foram coletadas de cinco indivíduos de cajueiro-anão precoce e cinco indivíduos de cajueiro selvagem, todos aparentemente saudáveis e estabelecidos na Escola Agrícola de Jundiaí (EAJ), localizada no município de Macaíba, Rio Grande do Norte. Os indivíduos de cajueiro-anão precoce encontravam-se estabelecidos em área de plantio, enquanto os indivíduos de cajueiro selvagem ocorriam espontaneamente na área da instituição.

As amostras de casca foram retiradas do tronco, fragmentadas e submetidas à secagem ao ar. Posteriormente, o material foi moído em moinho tipo Wiley e classificado granulometricamente por meio de peneiras de 16 mesh (1,00 mm) e 60 mesh (0,25 mm), sendo utilizada nas análises a fração com granulometria compreendida entre 0,25 e 1,00 mm. O material obtido foi homogeneizado e teve seu teor de umidade determinado para a correção dos resultados em base seca.

Determinação dos compostos fenólicos totais

Para a obtenção dos extratos enriquecidos em compostos fenólicos, as cascas dos indivíduos foram previamente moídas, sendo pesados 0,500 g de cada amostra. As extrações foram realizadas utilizando 50,0 mL de três solventes distintos (metanol, água e acetona), em procedimentos independentes, durante 1 hora à temperatura ambiente, sob agitação orbital a 300 rpm. Ao término da extração, os extratos foram filtrados em papel de filtro para remoção do material particulado.

Os compostos fenólicos totais foram mensurados pelo método Prussian Blue Test desenvolvido por Price e Butler (1977). Para as análises foram utilizados 5 mL de hexahidrato de cloreto de ferro (III) 0.1 M (FeCl3.6H2O) em HCl 0.1 M, onde foram adicionados a 50 µl de extrato, seguido imediatamente pela adição de 5 mL de hexacianoferrato de potássio (III) (K3Fe(CN)6) 0.008 M. As absorvâncias foram lidas após 10 min em células de 1 cm de comprimento de onda a 720 nm em espectrofotômetro (Thermo Scientific Genysis 50) que foi zerado com água. Foi elaborada uma curva de calibração do ácido gálico e analisadas seguindo as condições utilizadas nos extratos e os resultados foram expressos em equivalentes de ácido gálico. Todas as análises foram realizadas em triplicata.

Os resultados foram submetidos à análise de variância (ANOVA) em delineamento fatorial 2 × 3 (duas espécies × três solventes). Quando constatadas diferenças significativas, as médias foram comparadas pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

3. Resultados e discussão

Os teores de compostos fenólicos totais foram influenciados pela interação entre o material vegetal e o solvente extrator (Error: Reference source not found). A comparação das médias pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$) demonstrou que, em todos os solventes avaliados, o cajueiro selvagem apresentou teores significativamente superiores aos observados para o cajueiro-anão precoce.

Tabela 12 - Teores médios de compostos fenólicos totais (mg EAG g^{-1} de casca seca) obtidos da casca do cajueiro-anão precoce e do cajueiro selvagem em função do solvente extrator

Espécie	Metanol	Água	Acetona
Cajueiro selvagem	152,44 aA	144,33 aA	83,05 aB
Cajueiro anão	87,10 bA	67,36 bB	51,10 bC

Médias seguidas pela mesma letra minúscula na coluna e pela mesma letra maiúscula na linha não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade ($p \leq 0,05$)

Para o cajueiro selvagem, os maiores teores de compostos fenólicos totais foram obtidos com metanol (152,44 mg EAG g^{-1} de casca seca) e água (144,33 mg EAG g^{-1} de casca seca), os quais não diferiram estatisticamente entre si, sendo ambos superiores ao valor obtido com acetona (83,05 mg EAG g^{-1} de casca seca). Em contrapartida, para o cajueiro-anão precoce, todos os solventes diferiram significativamente entre si, sendo observado o maior teor com metanol (87,10 mg EAG g^{-1} de casca seca), seguido pela água (67,36 mg EAG g^{-1} de casca seca) e pela acetona (51,10 mg EAG g^{-1} de casca seca).

Os maiores teores observados no cajueiro selvagem são compatíveis com a variabilidade química relatada entre populações e materiais de *Anacardium occidentale*. Ribeiro et al. (2021), utilizando extratos hidroetanólicos obtidos com etanol e água na proporção 3:1 (v/v), observaram diferenças nos teores de compostos fenólicos entre populações selvagens e relataram valores superiores aos descritos para materiais domesticados. Outros estudos também demonstraram variação na composição fenólica entre materiais da espécie (Encarnação et al., 2014; Encarnação et al., 2016). Entretanto, as diferenças observadas no presente estudo não podem ser atribuídas exclusivamente à domesticação, seleção ou melhoramento vegetal, uma vez que fatores ambientais, fisiológicos e ontogenéticos também podem influenciar a produção e o acúmulo de metabólitos secundários (Chotphruethipong et al., 2017).

A eficiência dos solventes variou entre os materiais avaliados. No cajueiro selvagem, metanol e água apresentaram eficiência estatisticamente equivalente, enquanto ambos foram superiores à acetona. Já no cajueiro-anão precoce, observou-se diferença significativa entre todos os solventes, seguindo a ordem metanol > água > acetona. Esses resultados demonstram que a eficiência da extração depende da interação entre as propriedades físico-químicas do solvente e as características da matriz vegetal. Estudos realizados com a casca do caule de *A. occidentale* também relataram variações nos teores de compostos fenólicos em função do solvente empregado, frequentemente observando elevados rendimentos em extratos metanólicos (Togola et al., 2020; Khayruzamri et al., 2023). Entretanto, no presente estudo, verificou-se que, para o cajueiro selvagem, a extração aquosa apresentou eficiência estatisticamente equivalente à obtida com metanol, evidenciando que a resposta depende das características da matéria-prima e das condições experimentais. A elevada eficiência observada para o metanol pode estar relacionada à sua polaridade e à capacidade de solubilizar diferentes classes de compostos fenólicos, além da influência das condições experimentais empregadas (Chotphruethipong et al., 2017; Kurniasari et al., 2024). No entanto, os resultados obtidos demonstram que, para o cajueiro selvagem, essas características não resultaram em desempenho

estatisticamente superior ao da água. Adicionalmente, a caracterização química por HPLC-MS/MS de extratos metanólicos da casca de *A. occidentale* demonstrou a presença de diferentes compostos fenólicos, incluindo ácido gálico, catequina e epicatequina (Nascimento et al., 2026), evidenciando a diversidade de constituintes fenólicos extraíveis dessa matriz vegetal.

Embora o metanol tenha apresentado a maior média de compostos fenólicos totais, não houve diferença estatística em relação à água para o cajueiro selvagem. O metanol é um solvente orgânico tóxico, inflamável e de maior impacto ambiental, exigindo cuidados no manuseio, armazenamento e descarte. Em contrapartida, a água é um solvente atóxico, de baixo custo, não inflamável e ambientalmente sustentável. Assim, considerando a eficiência equivalente entre ambos para o cajueiro selvagem, a extração aquosa mostra-se uma alternativa tecnicamente viável, mais segura e ambientalmente adequada para a obtenção de compostos fenólicos. Além disso, seu uso pode reduzir custos operacionais e favorecer a aplicação dos extratos no tratamento de água e efluentes, onde resíduos de solventes orgânicos são indesejáveis. Estudos com diferentes matrizes de cajueiro também demonstram o potencial de sistemas aquosos para a extração de compostos fenólicos, cuja eficiência depende das condições do processo (Phan et al., 2024; Bompalli et al., 2022).

A acetona proporcionou os menores teores de compostos fenólicos totais nos dois materiais avaliados, sendo significativamente inferior aos demais solventes para o cajueiro-anão precoce e inferior à água e ao metanol para o cajueiro selvagem. Entretanto, esse resultado deve ser interpretado dentro das condições experimentais adotadas, não sendo possível generalizar que a acetona seja, de forma universal, menos eficiente para a extração de compostos fenólicos. A eficiência da extração depende da interação entre o solvente, a composição química da matriz vegetal e as condições operacionais empregadas (Chotphruethipong et al., 2017; Kurniasari et al., 2024).

Os valores obtidos encontram-se dentro da ampla variabilidade relatada para a casca do caule de *A. occidentale*. Togola et al. (2020) observaram teores de 77,70 e 129,72 mg EAG g^{-1} em extratos aquoso e metanólico, respectivamente, enquanto outros estudos também demonstraram variações nos teores de compostos fenólicos em função do material vegetal e das condições de extração (Encarnação et al., 2014; Encarnação et al., 2016; Ribeiro et al., 2021). Entretanto, essas comparações devem ser realizadas com cautela, pois os estudos diferem quanto à origem do material, aos procedimentos de extração, aos solventes e aos métodos analíticos empregados.

Sob a perspectiva de aplicação tecnológica, as diferenças observadas entre os materiais avaliados são relevantes para o aproveitamento dos compostos fenólicos da espécie. Estudos anteriores avaliaram taninos provenientes do cajueiro-anão precoce e do cajueiro selvagem em processos de tratamento de água e efluentes, com desempenhos distintos em função dos materiais e das condições experimentais empregadas (Souza et al., 2024; Nascimento et al., 2026). No presente estudo, o cajueiro selvagem apresentou teores significativamente superiores aos do cajueiro-anão precoce em todos os solventes avaliados. Além disso, a equivalência estatística entre água e metanol para esse material demonstra que a escolha do solvente deve considerar não apenas o rendimento de extração, mas também aspectos relacionados à sustentabilidade, à segurança operacional e ao custo do processo.

Entretanto, o teor de compostos fenólicos totais não corresponde diretamente ao teor de taninos condensados nem permite inferir o desempenho dos extratos em processos de coagulação e floculação. Nesse sentido, comparações entre o cajueiro selvagem e o cajueiro-anão precoce, conduzidas sob condições padronizadas de extração, caracterização dos extratos tânicos e avaliação de desempenho no tratamento de água e efluentes, podem contribuir para estabelecer relações entre a variabilidade química dos materiais, a obtenção dos compostos de interesse e sua eficiência tecnológica.

4. Conclusões

O cajueiro selvagem apresentou teores significativamente superiores de compostos fenólicos totais em relação ao cajueiro-anão precoce em todos os solventes avaliados. Para o cajueiro selvagem, as extrações com metanol e água apresentaram eficiência estatisticamente equivalente, sendo ambas superiores à acetona. Para o cajueiro-anão precoce, o metanol proporcionou o maior teor de compostos fenólicos totais, seguido da água e da acetona. Os resultados evidenciam o potencial da água como solvente extrator para o cajueiro selvagem, uma vez que apresentou desempenho equivalente ao metanol, constituindo uma alternativa de menor toxicidade, menor custo e maior sustentabilidade para a obtenção de compostos fenólicos dessa matéria-prima.

5. Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

6. Referências bibliográficas

Bompalli, L. K., Lokeswari, N., Rami, S., & Reddy, D. (2022). Separation and optimization of phenolic component from *Anacardium occidentale* testa by solvent extraction method. *World Journal of Pharmaceutical Research, 4*, 870–874.

Chen, Y., Li, N., Guo, X., Huang, H., García-Oliveira, P., Sun, J.-Y., Zhang, J.-D., Prieto, M., Guo, Z.-Q., & Liu, C. (2023). The nutritional and bio-active constituents, functional activities, and industrial applications of cashew (*Anacardium occidentale*): A review. *Food Frontiers, 5*(1), 106–127. https://doi.org/10.1002/fft2.250

Chotphruethipong, L., Benjakul, S., & Kijroongrojana, K. (2017). Optimization of extraction of antioxidative phenolic compounds from cashew (*Anacardium occidentale* L.) leaves using response surface methodology. *Journal of Food Biochemistry, 41*(4), e12379. https://doi.org/10.1111/jfbc.12379

Encarnação, S., Malmir, M., Sousa, D., Silva, I. D., Mello-Sampayo, C. D., Serrano, R., Lima, B., & Silva, O. (2014). Phenol content, antioxidant and α- and β-glucosidase inhibitory activities of an *Anacardium occidentale* stem bark traditional herbal preparation. *Planta Medica, 80*(16), P1N9. https://doi.org/10.1055/s-0034-1394919

Encarnação, S., De Mello-Sampayo, C., Graça, N. A. G., Catarino, L., Da Silva, I. D., Lima, B., & Silva, O. (2016). Total phenolic content, antioxidant activity and pre-clinical safety evaluation of an *Anacardium occidentale* stem bark Portuguese hypoglycemic traditional herbal preparation. *Industrial Crops and Products, 82*, 171–178. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2015.11.001

Encarnação, S., Serrano, R., Almeida, C., & Silva, O. (2022). Micromorphology and chemical studies on *Anacardium occidentale* L. stem bark as an herbal medicine. *Plants, 12*(1), 7. https://doi.org/10.3390/plants12010007

Gutiérrez-Paz, C., Rodríguez-Moreno, M., Hernández-Gómez, M., & Fernández-Trujillo, J. (2024). The cashew pseudofruit (*Anacardium occidentale*): Composition, processing effects on bioactive compounds and potential benefits for human health. *Foods, 13*(15), 2357. https://doi.org/10.3390/foods13152357

Khayruzamri, M. A., Samsudin, W. N. A. W. M., & Hashim, S. E. (2023). Phytochemicals and antioxidant activity of *Anacardium occidentale* L. *Journal of Science and Mathematics Letters, 11*(1), 75–84. https://doi.org/10.37134/jsml.vol11.1.8.2023

Ku, Y.-S., Contador, C., Ng, M.-S., Yu, J., Chung, G., & Lam, H.-M. (2020). The effects of domestication on secondary metabolite composition in legumes. *Frontiers in Genetics, 11*, 581357. https://doi.org/10.3389/fgene.2020.581357

Kurniasari, R., Suzery, M., & Cahyono, B. (2024). Analysis of total phenolics, flavonoids, and antioxidant activity of cashew leaf extract (*Anacardium occidentale* L.) with varying ethanol concentrations. *Jurnal Riset Kimia, 15*(2). https://doi.org/10.25077/jrk.v15i2.735

Meyer, R. S., Whitaker, B. D., Little, D. P., Wu, S.-B., Kennelly, E. J., Long, C.-L., & Litt, A. (2015). Parallel reductions in phenolic constituents resulting from the domestication of eggplant. *Phytochemistry, 115*, 194–206. https://doi.org/10.1016/j.phytochem.2015.02.006

Nascimento, P. E. P., Azevedo, T. K. B., Paiva, K. L. B., Souza, D. S., Nunes, F. H. F. M., Costa, E. L. M., Silva, E. C. A., Pimenta, A. S., Miranda, N. O., & Meza Filho, J. G. U. (2026). Improving the extraction of *Anacardium occidentale* bark tannins by alkaline and sulphitation processes and their efficiency in coagulation: Chemical characterization by HPLC. *Ambiente & Água - An Interdisciplinary Journal of Applied Science, 21*, e3145. https://doi.org/10.4136/ambi-agua.3145.

Nurzyńska-Wierdak, R. (2023). Phenolic compounds from new natural sources—Plant genotype and ontogenetic variation. *Molecules, 28*(4), 1731. https://doi.org/10.3390/molecules28041731

Okoronkwo, N., Igwe, J. C., Nwosu, N. B., Chukwu, P. O., Chukwukere, U. I., & Ihedigbo, P. C. (2024). Exploring allelochemical compositions in the roots of two varieties of *Anacardium occidentale* (cashew). *Biology, Medicine, & Natural Product Chemistry, 13*(1), 297–303. https://doi.org/10.14421/biomedich.2024.131.297-303

Phan, H. T., Dao, U. H., & Nguyen, T. T. T. (2024). Ethanol-modified supercritical CO_2 extraction of cashew (*Anacardium occidentale*) nut testa. *Journal of Food and Nutrition Research*. https://doi.org/10.64122/rspj1354

Price, M. L., & Butler, L. G. (1977). Rapid visual estimation and spectrophotometric determination of tannin content of sorghum grain. *Journal of Agricultural and Food Chemistry, 25*(6), 1268–1273. https://doi.org/10.1021/jf60214a034

Ribeiro, N. C., De Lima Neto, F. E. M., De Araújo Nobre, A. R., Silva, D., Mayo, S., & Andrade, I. (2021). Potential antioxidant and antibacterial bioactivity of leaf and stem bark extracts in wild cashew (*Anacardium occidentale* L.) populations from coastal Piauí, northeastern Brazil. *Feddes Repertorium, 132*(2), 141–157. https://doi.org/10.1002/fedr.202000021

Salehi, B., Gültekin-Özgüven, M., Kirkin, J., Özçelik, B., Morais-Braga, M. F. B., Carneiro, J. N. P., Bezerra, C. F., Da Silva, T. G., Coutinho, H. D. M., Amina, B., Armstrong, L., Selamoglu, Z., Sevindik, M., Yousaf, Z., Sharifi-Rad, J., Muddathir, A. M., Devkota, H. P., Martorell, M., Martins, N., & Cho, W. C. (2019). *Anacardium* plants: Chemical, nutritional composition and biotechnological applications. *Biomolecules*, *9*(9), 465. https://doi.org/10.3390/biom9090465

Souza, D. S. de, Nascimento, P. E. P. do, Paiva, K. L. B. de, Silva, P. L. de A., Azevedo, H. B. B. de, & Azevedo, T. K. B. de. (2024). Eficiência dos taninos de cajueiro anão precoce no tratamento de efluentes. *Agropecuária Científica no Semiárido*, *20*(1), 15–19. https://doi.org/10.30969/acsa.v20i1.1405

Sruthi, P., Roopavathi, C., & Naidu, M. M. (2022). Profiling of phenolics in cashew nut (*Anacardium occidentale* L.) testa and evaluation of their antioxidant and antimicrobial properties. *Food Bioscience*, *50*, 102246. https://doi.org/10.1016/j.fbio.2022.102246

Togola, I., Kaya, Y., Diarra, N., Konaré, M., Dénou, A., & Sanogo, R. (2020). Comparative study of the phytochemistry and antioxidant activity of *Anacardium occidentale* (L.) leaf and stem bark extracts. *Journal of Diseases and Medicinal Plants*, *6*(3), 70–75. https://doi.org/10.11648/j.jdmp.20200603.13

Trevisan, M. T. S., Pfundstein, B., Haubner, R., Würtele, G., Spiegelhalder, B., Bartsch, H., & Owen, R. W. (2006). Characterization of alkyl phenols in cashew (*Anacardium occidentale*) products and assay of their antioxidant capacity. *Food and Chemical Toxicology*, *44*(2), 188–197. https://doi.org/10.1016/j.fct.2005.06.012

Yang, J., Liang, B., Zhang, Y., Liu, Y., Wang, S., Yang, Q., Geng, X., Liu, S., Wu, Y., Zhu, Y., & Lin, T. (2022). Genome-wide association study of eigenvectors provides genetic insights into selective breeding for tomato metabolites. *BMC Biology*, *20*, 143. https://doi.org/10.1186/s12915-022-01327-x

Zambiasi, G., Degasperi, M., Khomenko, I., Biasioli, F., Masuero, D., Vrhovšek, U., Busatto, N., Guerra, W., Troggio, M., Costa, F., & Farneti, B. (2025). Secondary metabolite profiling deciphers the phenolic and volatile organic compound diversity within an interspecific *Malus* collection. *Horticultural Plant Journal*. https://doi.org/10.1016/j.hpj.2025.10.007

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Abordagem metodológica para inspeção técnica em edificação de madeira: caso CEMAC/UFLA

Renilson Luiz Teixeira[1]; Keliane de Jesus Reis[2]; Ingrid Magaly Alberca Marcelo[2]; José Tarcísio Lima[2]; Francisco Carlos Gomes[3]; José Reinaldo Moreira da Silva[2]

[1] IFES/campus Colatina e Departamento de Ciências Florestais – ESAL/UFLA
[2] Departamento de Ciências Florestais – ESAL/UFLA
[3] Departamento de Engenharia Agrícola – EENG/UFLA

Resumo: Encontra-se abordada a relevância da inspeção predial em edificações de madeira, para a avaliação do desempenho e da segurança estrutural, com o objetivo de aplicar metodologia de inspeção técnica de caráter preliminar, rápido e de baixo custo. A pesquisa, de caráter qualitativo e exploratório, fundamentou-se em diretrizes regulatórias nacionais, com foco na inspeção sensorial e no mapeamento qualitativo das manifestações patológicas. O estudo foi realizado no Centro de Excelência em Matas Ciliares (CEMAC/DCF/ESAL/UFLA), por vistorias in loco e registros fotográficos, identificando as anomalias estruturais. Os resultados indicaram fissuras por retração nos pilares e falhas no engaste dos apoios, com peças de madeira preenchida com concreto e fixada diretamente sobre o solo, sem impermeabilização, sem ataques biológicos ativos no momento das vistorias. Destaca-se a necessidade de intervenções corretivas nas bases dos pilares com pedestais isolados e selamento de fendas com selante flexível, servindo como base diagnóstica para futuros ensaios instrumentados.

Palavras-chave: Engenharia diagnóstica; Patologia das estruturas; Vida útil

Methodological approach for technical inspection in timber buildings: CEMAC/UFLA case

Abstract: The relevance of building inspection in timber structures for performance and safety assessment is addressed, aiming to apply a preliminary, rapid, and low-cost technical inspection methodology. This qualitative and exploratory research was based on national regulatory guidelines, focusing on sensory inspection and qualitative mapping of pathological manifestations. The study was conducted at the Centro de Excelência em Matas Ciliares (CEMAC/DCF/ESAL/UFLA) through *in situ* visits and photographic records, identifying structural anomalies. Results indicated shrinkage cracks in the columns and failures in the embedding supports, with timber pieces filled with concrete and fixed directly to the soil without waterproofing, and no active biological attacks during inspections. Corrective interventions in the pillar bases using isolated pedestals and crack sealing with flexible sealant are emphasized, serving as a diagnostic baseline for future instrumented testing.

Keywords: Modular systems; Timber structures; Temporary structures.

1. Introdução

A utilização da madeira como material estrutural consolidou-se como solução sustentável e de alta eficiência mecânica (Tenório et al., 2024). No entanto, por se tratar de material de natureza orgânica e higroscópica, suas propriedades são afetadas pelas condições ambientais de exposição, o que exige monitoramento constante pela engenharia diagnóstica (Chen et al., 2025), e amparo na NBR 16747 (ABNT, 2020), que estabelece diretrizes para avaliar de forma sistêmica o estado de conservação dos sistemas construtivos.

Entre os pontos mais sensíveis das estruturas de madeira, a umidade atua como principal catalisador de patologias, favorecendo o ataque de agentes xilófagos e a perda de resistência mecânica pela degradação da parede celular (Meyer, 2016; Chen et al., 2025), enquanto deslocamentos excessivos e o afrouxamento de conectores metálicos nas ligações comprometem a estabilidade global do sistema (Gutiérrez et al., 2024; Abdoli et al., 2024). Essas manifestações, frequentemente associadas à negligência com a manutenção periódica (NBR 7190-1, ABNT 2022), reforçam a inspeção como ferramenta indispensável para a gestão da vida útil predial e a detecção precoce de mecanismos de degradação.

Nesse contexto, as inspeções visual e sensorial são defendidas como etapa primordial do diagnóstico inicial (Riggio et al., 2014), permitindo quantificar defeitos como nós e fissuras e estimar a integridade dos elementos em serviço (NBR 7190-2, ABNT 2022). O objetivo foi aplicar uma abordagem de inspeção predial de caráter preliminar, rápida e de baixo custo, priorizando a identificação e o mapeamento qualitativo de manifestações patológicas in loco, alinhada às normas nacionais vigentes, fornecendo uma base física de triagem para futuros ensaios não destrutivos instrumentados.

2. Material e métodos

Este estudo caracterizou-se como pesquisa aplicada, de natureza qualitativa e abordagem exploratório-descritiva, com ênfase na identificação e classificação de manifestações patológicas em uma edificação de madeira. A investigação foi conduzida no Centro de Excelência em Matas Ciliares (CEMAC), vinculado ao Departamento de Ciências Florestais da Universidade Federal de Lavras (UFLA), Lavras/MG. Esta escolha foi pela relevância acadêmica da edificação e por suas características estruturais em madeira roliça, que demandam atenção específica quanto à durabilidade, manutenção e desempenho ao longo do tempo. Foram considerados os sistemas estruturais principais (pilares e vigas), a cobertura tipo tesouras e treliças com telhas cerâmicas, os elementos de vedação em alvenaria argamassada com pintura látex, as interfaces entre fundações e pilares e os sistemas de ligação e fixação, todos expostos a condições ambientais naturais de umidade, temperatura e incidência biológica.

O procedimento metodológico foi estruturado com base nas diretrizes da NBR 16747 (ABNT, 2020), adaptando-se às particularidades das estruturas de madeira conforme a literatura técnica e científica recente, e desenvolvido em quatro etapas principais:

2.1 Levantamento de dados e anamnese

Inicialmente, realizou-se o levantamento de informações disponíveis sobre a edificação, incluindo i) os dados construtivos e idade aproximada, ii) o histórico de uso e intervenções, iii) as condições ambientais de exposição e iv) a existência de manutenção preventiva ou corretiva. Essa etapa permitiu compreender o contexto de uso da edificação, subsidiando a interpretação das manifestações patológicas observadas.

2.2 Inspeção sensorial, in loco

A inspeção propriamente dita foi conduzida por meio de avaliação sensorial, conforme preconizado pela NBR 16747 (ABNT, 2020), contemplando observações visuais e táteis, sem a utilização de ensaios invasivos. Foram analisados os aspectos referentes a i) presença de fissuras, fendilhamentos e, ou deformações, ii) indícios de umidade (manchas, escurecimento, empenamentos), iii) ataques biológicos (fungos e insetos xilófagos), iv) condições das ligações estruturais, v) desalinhamentos e deslocamentos aparentes e vi) estado de conservação geral dos elementos.

O registro das informações foi realizado por meio de documentação fotográfica sistematizada, croquis e anotações em campo.

2.3 Identificação e classificação das manifestações patológicas

Durante as vistorias, foram observadas cuidadosamente a presença de patologias em todas as peças de madeira da construção. A natureza e possível origem das anomalias identificadas foram classificadas, considerando i) os agentes físicos (umidade, variações dimensionais), ii) os agentes biológicos (fungos, insetos), iii) as ações mecânicas (sobrecargas, deformações) e iv) as falhas construtivas ou de manutenção.

2.4 Análise diagnóstica

A partir das evidências levantadas, foi realizada a análise das possíveis causas das manifestações patológicas, considerando i) as condições de exposição ambiental, ii) as deficiências de projeto ou execução, iii) a ausência ou inadequação de manutenção e iv) as características intrínsecas do material madeira. Essa etapa propôs estabelecer a relação entre sintoma e causa, fundamental para a proposição de medidas corretivas eficazes.

3. Resultados e discussão

a. Levantamento de dados e anamnese

O Centro de Excelência em Matas Ciliares (CEMAC/DCF/ESAL/UFLA) foi construído no ano de 2000 e apresenta sistema construtivo misto, organizado em dois blocos distintos (Figura 1).



Figura 1 – Vista principal do Centro de Excelência em Matas Ciliares (CEMAC).
Fonte: Autores (2026)

O bloco principal (Figura 2) é composto pelo subsolo, em concreto armado, que é responsável pela fundação e suporte estrutural. Já o pavimento térreo foi construído em estrutura de madeira roliça, formado por pilares e vigas que sustentam a cobertura. Ela foi construída de forma inclinada e é constituída por tesouras e treliças de madeira, com terças e caibros roliços e ripas que suportam telhas cerâmicas. As vedações verticais são executadas em alvenaria argamassada, com acabamento em pintura látex.



Figura 2 – Vista frontal do bloco principal do CEMAC.
Fonte: Autores (2026)

O segundo bloco do CEMAC (Figura 3) é inteiramente estruturado em madeira, incluindo pilares, vigas, escadas, passarelas e torre elevada, caracterizando um sistema leve e elevado do solo. Os apoios dos pilares foram formados a partir de peças de madeira, envolvidas por concreto, que foram fixados no solo. As ligações estruturais são realizadas por conectores mecânicos, como parafusos, pinos e chapas metálicas, que permitem a transferência de esforços e a estabilidade global da edificação. A edificação vem sendo utilizada, desde a sua inauguração, para finalidades acadêmicas.



Figura 3 – Vista do segundo bloco do CEMAC.
Fonte: Autores (2026)

No que se refere às intervenções, não foram identificados registros formais de modificações estruturais ou funcionais, significativas. Contudo, observou a realização de serviços de manutenção rotineira, de limpeza e de conservação dos ambientes, executados por empresa terceirizada. Tais ações contribuem para a preservação das condições gerais de salubridade e uso da edificação, embora não substitua a necessidade de manutenção preventiva e corretiva de caráter técnico.

Nas torres observaram-se evidências de modificações estruturais, especialmente nas ligações entre as vigas e os pilares (Figura 4). Verificou-se a introdução de suportes metálicos em decorrência prévia de deslocamentos estruturais.



Figura 4 – Introdução dos suportes metálicos nas ligações entre vigas e pilares.
Fonte: Autores (2026)

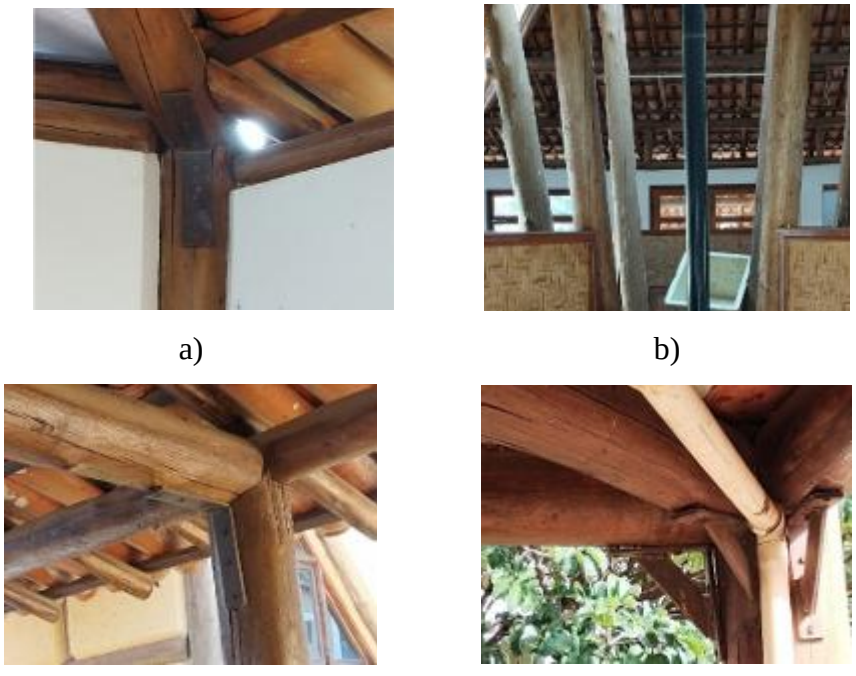
A edificação encontra-se em ambiente externo, sujeita à ação direta de intempéries, como chuva, radiação solar e variações térmicas. A presença de vegetação no entorno favorece o aumento da umidade relativa (microclima), aumentando o risco de degradação da madeira. Elementos do segundo bloco estão mais expostos, intensificando a suscetibilidade a agentes biológicos e variações dimensionais. As interfaces entre madeira e concreto e os conectores metálicos configuram pontos críticos, devido ao potencial de acúmulo de umidade e ocorrência de corrosão. De modo geral, caracteriza-se como ambiente de exposição moderada a severa.

b. Inspeção sensorial, in loco

A análise dos registros fotográficos, aliada às anotações de campo e croquis elaborados durante a inspeção, permitiu a identificação de diversas manifestações patológicas e condições de não conformidade nos elementos construtivos da edificação. A abordagem sensorial, conforme preconizada pela NBR 16747 (ABNT, 2020), mostrou-se adequada para a avaliação preliminar do estado de conservação, possibilitando a caracterização dos principais mecanismos de degradação atuantes.

c. Identificação e classificação das manifestações patológicas

No que se refere à presença de fissuras, fendilhamentos e deformações, foram observadas ocorrências pontuais, com variações quanto extensão e abertura, em elementos estruturais e componentes secundários de ambos os blocos. Em estruturas de madeira, tais manifestações estão frequentemente associadas às contrações por variações higroscópicas, podendo também indicar estados de solicitação excessiva, fluência do material ou condições inadequadas de apoio e vinculação (Figura 5).



a) b)

c) d)

Figura 5 – Fissuras e fendilhamentos em elementos estruturais. a) Ligação vigas com pilar no primeiro bloco; b) Pilares de sustentação da cobertura no primeiro bloco; c) Ligação vigas com pilar do segundo bloco e d) Ligações no segundo bloco.
Fonte: Autores (2026)

Não foram identificados indícios aparentes de maiores umidades, como manchas, escurecimento superficial ou sinais de deterioração em estágios avançados. Entretanto, nas

fundações do segundo bloco (Figura 6), o apoio dos pilares de madeira preenchida com concreto e fixada diretamente sobre o solo, sem sistemas de impermeabilização ou barreiras de proteção entre o elemento estrutural e o terreno. A contração da madeira após a secagem do concreto criou uma fenda, destacado na Figura 6, que facilita a entrada de água da chuva, formando ambiente propício ao desenvolvimento de agentes xilófagos e de vegetações trazidas pelo vento ou por pássaros.



Figura 6 – Imagens de apoio dos pilares diretamente no solo, com concretagem circundante, com formação de fendas para entrada da água.
Fonte: Autores (2026)

No que se refere aos ataques biológicos, não foram verificados indícios compatíveis com a ação de agentes xilófagos. Não se observaram alterações de coloração características, perda de massa, presença de galerias ou resíduos associados a esse tipo de deterioração. A ausência dessas manifestações sugere condições desfavoráveis ao desenvolvimento de agentes xilófagos ou que existe bom estado de conservação quanto à integridade biológica da madeira. Ainda assim, ressalta-se que a ocorrência de ataques biológicos está diretamente relacionada às condições de umidade e temperatura, devendo tais fatores ser monitorados, uma vez que podem, ao longo do tempo, favorecer o surgimento e a evolução dos mecanismos para a biodegradação.

As ligações estruturais das torres foram objeto de análise detalhada. Foram identificadas ocorrências de rachaduras, desalinhamentos e deslocamentos de elementos, que são indícios de possível perda de eficiência na transferência de esforços (Figura 7).



Figura 7 – Condições das ligações estruturais com indícios de folgas ou deslocamentos.
Fonte: Autores (2026)

Em estruturas de madeira, as ligações desempenham papel fundamental na redistribuição das ações solicitantes, de modo que descontinuidades ou degradação nestes pontos podem comprometer a estabilidade, a rigidez e a segurança da estrutura como um todo. De modo geral, o estado de conservação dos elementos apresentou condições satisfatórias, embora algumas partes apresentassem sinais de degradação inicial, possivelmente refletindo diferenças nas condições de exposição prolongada ao sol (face Norte) e às chuvas, na ausência de manutenções programadas e no longo tempo de utilização.

d. Análise diagnóstica

A análise diagnóstica possibilitou a correlação entre as manifestações patológicas identificadas e seus prováveis mecanismos causais, destacando-se, entre os principais fatores condicionantes, a exposição à umidade, a ausência ou insuficiência de manutenção preventiva, eventuais inconformidades de projeto e, ou execução, bem como a influência de condições ambientais adversas ao longo do ciclo de vida da edificação.

Embora a metodologia adotada não tenha contemplado ensaios instrumentados, a inspeção sensorial e fotográfica forneceu subsídios consistentes para a decisão preliminar. Para mapear anomalias internas invisíveis, recomenda-se que futuras fases deste estudo amplo apliquem Ensaios Não Destrutivos (END), como resistografia para detectar cavidades internas e variações de densidade, ou ultrassom para caracterizar a integridade estrutural e guiar manutenções preventivas (Riggio et al., 2014).

Destaca-se, de forma mais crítica, a condição observada nas torres do segundo bloco, tanto no âmbito da infraestrutura, nas regiões de apoio dos pilares e suas bases, em contato com o solo e na superestrutura, com ênfase nas ligações entre pilares e vigas. Nessas regiões, foram

identificadas inconformidades que indicam a necessidade de intervenções técnicas específicas, visando a recomposição das condições adequadas de apoio, a melhoria das interfaces estruturais e a restauração da eficiência na transferência dos esforços existentes.

No que se refere às fissuras, recomenda-se o selamento destas descontinuidades empregando resina epóxi flexível, adequada às variações higroscópicas da madeira para bloquear umidade e agentes xilófagos. Para isolar os pilares roliços do contato com o solo, a solução consiste em elevar os apoios sobre pedestais de concreto com pinos metálicos e pingadeiras, evitando a ascensão capilar de água. Tais intervenções preservam a durabilidade dos elementos e garantem a segurança estrutural da edificação ao longo do tempo.

4. Considerações finais

A inspeção técnica realizada na edificação do CEMAC/DCF/ESAL/UFLA permitiu o cumprimento integral para identificar e classificar as manifestações patológicas, reafirmando que o monitoramento constante pela engenharia diagnóstica é essencial para materiais de natureza orgânica.

Embora o estado geral de conservação seja satisfatório existem vulnerabilidades críticas nas torres, do segundo bloco. A ausência de isolamento nos apoios dos pilares compromete a durabilidade e a segurança estrutural.

A metodologia de inspeção sensorial, fundamentada na NBR 16747 (ABNT, 2020), mostrou-se consistente para uma triagem diagnóstica inicial e de baixo custo, funcionando como ponto de partida indispensável para o mapeamento qualitativo preliminar das anomalias estruturais. As falhas nas ligações e o apoio direto sobre o solo potencializam riscos de biodegradação e perda de eficiência na transferência de esforços, exigindo intervenções conforme os critérios da NBR 7190-1 (ABNT, 2022), servindo como justificativa técnica para futuros ensaios não destrutivos. A implementação de medidas corretivas, como apoios em pedestais de concreto com pingadeira e selamento com resinas epóxi flexíveis, para bloquear a umidade e a ação de agentes xilófagos, é indispensável para garantir a longevidade estrutural. Este estudo ratifica que inspeções periódicas simplificadas e manutenções preventivas programadas constituem a base para a gestão da vida útil e a preservação das estruturas em madeira.

5. Agradecimentos

Agradecemos à UFLA, pela estrutura necessária para a realização deste trabalho e ao IFES pelo incentivo constante as nossas pesquisas. Agradecemos também a CAPES, ao CNPq e a FAPEMIG cujos recursos foram fundamentais para a realização, bem como participação no VII CBCTEM.

6. Referências bibliográficas

Abdoli, F., Rashidi, M., Wang, J., Siddique, R., y Nasir, V. (2024). Structural health monitoring of timber bridges – A review. *Results in Engineering*, *24*, Artículo 103084. https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.103084.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2020). *Inspeção predial — Diretrizes, conceitos, terminologia e procedimento* (NBR 16747). ABNT.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2022a). *Projeto de estruturas de madeira. Parte 1: Critérios de dimensionamento* (NBR 7190-1). ABNT.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2022b). *Estruturas de madeira. Parte 2: Métodos de ensaio para classificação visual e mecânica de peças estruturais de madeira* (NBR 7190-2). ABNT.

Chen, L., Kong, Q., Xiong, X., Xiong, H. (2025). Research and application of non-destructive testing technology for timber structures: A review. *Structures*, *80*, Artículo 109790. https://doi.org/10.1016/j.istruc.2025.109790.

Gutiérrez, N., Negrão, J., Dias, A., y Guindos, P. (2024). Bibliometric review of prefabricated and modular timber construction from 1990 to 2023: Evolution, trends, and current challenges. *Sustainability*, *16*(5), Artículo 2134. https://doi.org/10.3390/su16052134.

Meyer, L. (2016). *Above ground field test methods for predicting the durability of timber products* [Tese de Doutorado, University Hamburg]. Faculty of Mathematics and Natural Sciences.

Riggio, M., Anthony, R. W., Augelli, F., Kasal, B., Lechner, T., Muller, W., y Tannert, T. (2014). In situ assessment of structural timber using non-destructive techniques. *Materials and Structures, 47*, 749–766. DOI 10.1617/s11527-013-0093-6.

Tenório, M., Ferreira, R., Belafonte, V., Sousa, F., Meireis, C., Fontes, M., Vale, I., Gomes, A., Alves, R., Silva, S. M., Leitão, D., Fontes, A., Maia, C., Camões, A., y Branco, J. M. (2024). Contemporary Strategies for the Structural Design of Multi-Story Modular Timber Buildings: A Comprehensive Review. Applied Sciences, 14(8), Artículo 3194. https://doi.org/10.3390/app14083194.

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Análise comparativa de métodos de determinação de umidade em madeiras de *Pinus* sp. e *Eucalyptus* sp.

Anna Clara Oliveira Rupf[1]; Felipe Gabriel Santos Araújo[1]; José Roberto Victor de Oliveira[1]; Kamilly da Silva Pereira[1]; Rayara Davel Siqueira[1]; Victor Hugo da Silva Ferreira[1]; Djeison Cesar Batista[1]

[1]Universidade Federal do Espírito Santo, Departamento de Ciências Florestais e da Madeira, Jerônimo Monteiro, Brasil.

Resumo:
A determinação da umidade é fundamental durante a industrialização da madeira, bem como para a sua correta utilização e o seu desempenho em serviço. Apesar de ser o procedimento de referência, o método gravimétrico é destrutivo e é o mais demorado, o que justifica o uso de medidores elétricos portáteis para a determinação imediata da umidade. O objetivo deste trabalho foi verificar a confiabilidade da determinação da umidade da madeira de *Pinus* sp. e *Eucalyptus* sp. utilizando dois medidores elétricos, um resistivo e outro capacitivo. A umidade da madeira serrada de ambas as espécies foi medida com um aparelho capacitivo e outro resistivo (em quatro escalas) e, por fim, pelo método gravimétrico (referência). As médias de umidade obtidas pelos medidores elétricos foram comparadas à do método gravimétrico, utilizando-se o teste t de *Student* (nível de significância de 5%) para amostras pareadas. Foi possível obter medidas de umidade confiáveis com medidores elétricos de umidade. Para o medidor resistivo, as melhores escalas de medição foram 3 e 2, respectivamente, para as madeiras de *Pinus* sp. e *Eucalyptus* sp. Para o medidor capacitivo, reforça-se que a confiabilidade da medição depende da seleção adequada da densidade no aparelho antes do uso. Para estudos futuros, sugere-se testar tábuas com uma amplitude de umidade maior (8 a 25%, por exemplo) para verificar se a confiabilidade dos medidores se mantém nessas condições.

Palavras-chave: Método gravimétrico; medidores elétricos portáteis; medidor capacitivo; medidor resistivo.

Comparative analysis of moisture content determination methods for *Pinus* sp. and *Eucalyptus* sp. wood

Abstract: Determining moisture content is crucial during wood processing and for its proper utilization. Although the oven-drying method is the standard reference procedure, it is destructive and time-consuming, justifying the use of hand-held meters for immediate moisture content determination. The objective of this study was to assess the reliability of moisture content determination in *Pinus* sp. and *Eucalyptus* sp. wood using resistive and capacitive moisture meters. The moisture content of sawn timber from both species was measured using a capacitive meter, a resistive meter (across four scales), and finally, the oven-drying method (reference). Mean moisture values obtained by the moisture meters were compared to those from the oven-drying method using a paired-sample Student's t-test (5% significance level). It was possible to obtain reliable moisture content measurements with hand-held moisture meters. For the resistive meter, the optimal measurement scales were 3 and 2 for *Pinus* sp. and *Eucalyptus* sp. wood, respectively. Regarding the capacitive meter, it is emphasized that

measurement reliability depends on the apparent density setting prior to use. For future studies, it is suggested that boards with a wider moisture range (e.g., 8% to 25%) be tested to verify whether the meters maintain their reliability under these conditions.

Keywords: Oven-drying method; hand-held moisture meters; capacitive meter; resistive meter.

1. Introdução

A madeira serrada de *Pinus* sp. ainda representa o maior volume produzido no Brasil (8 milhões de m³ anuais), sendo utilizada, entre outros, na produção de portas e molduras para exportação. O restante da produção de madeira serrada (1,2 milhões de m³ anuais) é composto basicamente por espécies tropicais amazônicas (Associação Brasileira da Indústria de Madeira Processada Mecanicamente, 2026). Entretanto, em alguns estados com pequenas áreas de florestas de *Pinus* spp. e distantes da Amazônia Legal, como o Espírito Santo, predomina a produção de madeira serrada de *Eucalyptus* spp., usada principalmente para embalagens. Destaca-se que não há estatísticas consolidadas sobre a produção de madeira serrada de *Eucalyptus* spp. no Brasil.

Contudo, independentemente da espécie madeireira, a determinação da umidade é um dos parâmetros mais importantes na industrialização da madeira ao longo da cadeia produtiva do processamento mecânico. Conforme a literatura (Batista; Mendonça; Regazzi, 2019; James, 1988), o método gravimétrico é a referência para a determinação da umidade da madeira, o qual se baseia na diferença de massa antes (úmida ou inicial) e após (anidra) a secagem em estufa a 103 ± 2 °C até atingir massa constante.

Além de ser um parâmetro fundamental para sua caracterização, o teor de umidade influencia diretamente o processamento e o desempenho da madeira. De modo geral, o aumento da umidade reduz a força de corte durante a usinagem, enquanto teores abaixo do ponto de saturação das fibras elevam a rigidez e a resistência mecânica do material (Pinheiro, 2014). Além disso, variações no teor de umidade podem provocar alterações dimensionais capazes de comprometer a qualidade da linha de cola, especialmente em madeiras de maior densidade, bem como favorecer defeitos durante a secagem, como rachaduras e empenamentos, além de comprometer a aderência e a cura de produtos de acabamento (Trianoski, 2015).

Diante dessa importância, embora o método gravimétrico seja reconhecido por sua confiabilidade, ele tem desvantagens relevantes, como o tempo de execução prolongado e a necessidade de destruição parcial da amostra, o que o torna pouco prático para medições rápidas

em campo ou em linhas de produção. Assim, métodos alternativos de determinação da umidade têm sido amplamente empregados, dentre os quais se destacam os medidores elétricos portáteis, baseados nos princípios resistivo e capacitivo, que proporcionam leituras imediatas e de baixo custo operacional, ainda que com menor exatidão (Donato et al., 2014).

Segundo Rodrigues (1999), os medidores resistivos operam de forma semelhante a um ohmímetro, medindo a resistência elétrica entre dois eletrodos metálicos inseridos na madeira. Como a resistência elétrica da madeira varia com a presença de água, o resultado obtido é convertido em umidade, de acordo com calibrações pré-estabelecidas para diferentes espécies e faixas de temperatura.

Os medidores capacitivos, conforme descrito por Dias et al. (2018), baseiam-se na variação da capacitância elétrica induzida por um campo eletromagnético entre placas condutoras, cuja resposta é influenciada pela umidade e pela densidade do material. Da mesma forma que os medidores resistivos, esses aparelhos têm sido amplamente utilizados na indústria por possibilitarem medições não destrutivas, rápidas e de fácil aplicação, permitindo o acompanhamento contínuo da umidade e o controle de qualidade de lotes de madeira.

O seguinte problema de pesquisa foi levantado para este trabalho: é possível obter resultados confiáveis de umidade da madeira de espécies comerciais com medidores elétricos portáteis? O objetivo deste trabalho foi verificar a confiabilidade da determinação da umidade da madeira de *Pinus* sp. e *Eucalyptus* sp. utilizando dois medidores elétricos: um resistivo e outro capacitivo.

2. Material e métodos

Foram utilizadas duas tábuas tangenciais para cada espécie, com dimensões de 20 x 150 x 1.000 mm. A densidade aparente média das tábuas foi de 485 kg/m³ e 815 kg/m³, respectivamente, para *Pinus* sp. e *Eucalyptus* sp., obtida por medição direta das dimensões (paquímetro digital, 0,01 mm) e da massa (balança digital, 0,01 g). Inicialmente, foram demarcados 20 pontos de medição de umidade, excluindo-se os locais com defeitos e os próximos aos topos (100 mm de distância).

Optou-se por maximizar o número de pontos de medição em cada tábua (n = 20), em vez de aumentar o número de tábuas, devido à elevada heterogeneidade natural da madeira, mesmo dentro de uma única peça, e ao uso do teste *t* de Student para amostras pareadas, no qual cada medição obtida pelos medidores elétricos foi comparada diretamente ao valor determinado pelo método gravimétrico no mesmo ponto da tábua. Dessa forma, a comparação entre os métodos

foi realizada nas mesmas condições experimentais, minimizando a influência da variabilidade intrínseca da madeira na avaliação do desempenho dos medidores elétricos.

A determinação da umidade com os medidores elétricos foi realizada de acordo com as orientações dos manuais dos fabricantes (Digisystem, 2019; Gann, 2007). Para a determinação da umidade pelo método resistivo, utilizou-se o medidor GANN Hydromette HT65 (Gerlingen, Alemanha, Figura 1A), com eletrodos de 16 mm de comprimento (10 mm de penetração útil), fixados na porção média (largura e comprimento) dos pontos de medição das tábuas. A medição da umidade foi realizada utilizando-se as quatro posições da chave seletora de espécies do aparelho, mantendo-se a chave seletora de temperatura na posição de 20 °C.

Para a determinação da umidade pelo método capacitivo, utilizou-se o medidor Digisystem DUC 2020 (Curitiba, Brasil, Figura 1B), ajustando-se o aparelho conforme a densidade aparente média da madeira. A área do sensor de contato do aparelho é de 50 x 70 mm (largura x comprimento). Para a medição da umidade, a porção média do sensor foi posicionada sobre os furos dos eletrodos deixados pelo medidor resistivo.

Em seguida, as tábuas foram serradas transversalmente com uma serra circular, conforme os pontos de medição demarcados, obtendo-se 20 amostras de 80 mm de comprimento por tábua. Ou seja, as amostras ficaram 10 mm mais longas que o sensor do medidor capacitivo e com as marcas de penetração dos eletrodos posicionadas na porção mediana.



Figura 1 – Medidor capacitivo Digisystem DUC 2020 e medidor resistivo GANN Hydromette HT65 (régua de 300 mm como escala)

A umidade foi determinada pelo método gravimétrico, conforme o método B da norma D4442-20 (American Society for Testing and Materials, 2025), em que as amostras foram pesadas (massa inicial) em uma balança semianalítica digital (0,01 g). Em seguida, as amostras foram secas em estufa de 100 L com circulação forçada de ar (modelo Q317M-42, Quimis, São Paulo, Brasil) a 103 ± 2 °C, até atingirem massa constante. Depois disso, as amostras foram retiradas da estufa, armazenadas em um dessecador com sílica gel para resfriamento e pesadas pela última vez para a obtenção da massa anidra.

A análise estatística foi realizada separadamente por espécie e a umidade do método gravimétrico foi utilizada como referência. As médias de umidade obtidas pelos medidores elétricos foram comparadas à do método gravimétrico, utilizando-se o teste t de *Student* (nível de significância de 5%) para amostras pareadas. Para o medidor resistivo foram comparados os resultados das quatro escalas de espécie do aparelho.

3. Resultados e discussão

Os resultados do trabalho podem ser verificados na Tabela 1. A umidade média das tábuas de *Pinus* sp. e *Eucalyptus* sp. foi de 13,9% e 11,2%, respectivamente, indicando a condição inicial (umidade de equilíbrio) de armazenamento da madeira no estoque de onde foram coletadas.

Tabela 1 – Resultados de umidade da madeira com o método gravimétrico e com os medidores elétricos

Espécie	Umidade (%)					
	Método gravimétrico	Medidor capacitivo	Medidor resistivo			
			Escala 1	Escala 2	Escala 3	Escala 4
***Pinus* sp.**	13,9 (4,9)	14,0 (5,5)	8,7 (9,0)	11,2 (7,7)	13,7 (7,0)	16,4 (6,3)
t_c	-	$-0,8^{ns}$	93,2*	34,0*	$1,4^{ns}$	-22,5*
***Eucalyptus* sp.**	11,2 (5,5)	10,7 (10,4)	8,6 (6,5)	11,1 (5,4)	13,7 (4,9)	16,3 (4,8)
t_c	-	$1,4^{ns}$	10,4*	$0,2^{ns}$	-9,3*	-17,8*

Coeficiente de variação (%) entre parênteses. n.s.: não significativo ($p > 0,05$). *significativo a 5% de probabilidade ($p \leq 0,05$).

Para ambas as espécies, não foi observada diferença significativa (teste *t* de Student, $p > 0,05$) entre as médias de umidade obtidas pelos métodos gravimétrico e capacitivo. Esse resultado expressa a confiabilidade do medidor capacitivo para estimativas rápidas e de baixo custo da umidade da madeira, que depende do correto manuseio do aparelho, principalmente do ajuste da densidade da madeira.

Para as tábuas de *Pinus* sp., a diferença média do método capacitivo em relação ao método gravimétrico foi de apenas 0,1 p.p. (ponto percentual), com erro absoluto médio de 0,35 p.p. Os desvios individuais variaram de −0,79 a +1,20 p.p., evidenciando elevada concordância entre os métodos para essa espécie.

Para *Eucalyptus* sp., embora a diferença entre as médias obtidas pelos métodos capacitivo e gravimétrico tenha sido de apenas 0,5 p.p., a análise das medições pareadas mostrou erro absoluto médio de 1,66 p.p., com desvios individuais variando de −2,33 a +1,65 p.p. Esses resultados indicam que a proximidade entre as médias decorreu, em parte, da

compensação entre valores subestimados e superestimados, evidenciando que a ausência de diferença significativa entre as médias não implica, necessariamente, elevada concordância entre as medições individuais.

Destaca-se que, na prática industrial, é inviável medir a densidade aparente da madeira serrada antes da medição da umidade com o aparelho capacitivo. Assim, o aparelho é ajustado para uma densidade aparente "geral", o que pode implicar maiores erros de estimativa da umidade em comparação com o método gravimétrico.

Para cada espécie, foram obtidas quatro médias de umidade com o medidor resistivo, uma em cada escala. Destaca-se que essas escalas referem-se a grupos de espécies (Gann, 2007).

Tanto para o *Pinus* sp. quanto para o *Eucalyptus* sp., verificou-se uma escala adequada do aparelho para a medição da umidade, correspondente às escalas 3 e 2, respectivamente, cujas médias não diferiram significativamente em relação ao método gravimétrico (teste *t* de Student, $p > 0,05$). A diferença de escalas adequadas entre as espécies indica que possuem resistências elétricas distintas. Isso reforça dois aspectos importantes sobre a escolha adequada de escalas em medidores resistivos: i) nem sempre é possível adotar a mesma escala para diferentes espécies; ii) uma escala inadequada pode subestimar ou superestimar significativamente a umidade da madeira, comprometendo a confiabilidade da estimativa da umidade em aplicações práticas.

Para *Pinus* sp., entre as escalas, a terceira apresentou o menor erro médio em relação ao método gravimétrico, com subestimação de apenas 0,13 p.p. O erro absoluto médio foi de 0,31 p.p., e os desvios individuais variaram de −0,89 a +0,50 p.p., sendo que todas as leituras apresentaram diferença igual ou inferior a 1 p.p. em relação ao método gravimétrico. As escalas 1, 2 e 4 produziram erros médios de −5,17, −2,64 e +2,49 p.p., respectivamente, confirmando que a seleção inadequada da escala pode comprometer substancialmente a estimativa da umidade.

Para *Eucalyptus* sp., entre as escalas avaliadas, a escala 2 apresentou o menor erro médio em relação ao método gravimétrico, com subestimação de apenas 0,04 p.p. Contudo, o erro absoluto médio foi de 1,15 p.p., e os desvios individuais variaram de −1,43 a +1,55 p.p., sendo que 27,3% das leituras apresentaram diferença de até 1 p.p. As escalas 1, 3 e 4 produziram erros médios de −2,55, +2,51 e +5,15 p.p., respectivamente, confirmando que a seleção inadequada da escala pode comprometer substancialmente a estimativa da umidade.

Os resultados obtidos evidenciam que o uso de escalas inadequadas pode resultar tanto na subestimação quanto na superestimação da umidade da madeira, reforçando a importância da correta seleção da escala de medição conforme a espécie avaliada.

4. Conclusões

Tomando-se o método gravimétrico como referência, foi possível obter medidas de umidade confiáveis com medidores elétricos portáteis. Para o medidor resistivo, as melhores escalas de medição foram 3 e 2, respectivamente, para as madeiras de *Pinus* sp. e *Eucalyptus* sp. Assim, recomenda-se que esse equipamento seja utilizado com a escala correspondente à espécie avaliada e com a temperatura devidamente ajustada.

Para o medidor capacitivo, verificou-se que a confiabilidade da medição depende do correto ajuste da densidade aparente da madeira antes de sua utilização. Além disso, para ambos os equipamentos, recomenda-se a calibração periódica e a verificação dos resultados em relação ao método gravimétrico, de modo a minimizar erros de medição e garantir maior confiabilidade no controle da umidade da madeira.

Para estudos futuros, sugere-se testar tábuas com uma amplitude de umidade maior (8 a 25%, por exemplo) para verificar se a confiabilidade dos aparelhos se mantém nessas condições.

5. Referências bibliográficas

American Society for Testing and Materials. (2025). ASTM D4442-20: Standard test methods for direct moisture content measurement of wood and wood-based materials. ASTM International.

Associação Brasileira da Indústria de Madeira Processada Mecanicamente. (2026). Estudo setorial 2026. ABIMCI.

Batista, D. C., Mendonça, A. R., & Regazzi, A. J. (2019). Use of a resistive moisture meter to estimate the moisture content of untreated and thermally modified Tectona grandis L.f. juvenile wood. BioResources, 14(3), 5171–5187. https://bioresources.cnr.ncsu.edu/resources/use-of-a-resistive-moisture-meter-to-estimate-the-moisture-content-of-untreated-and-thermally-modified-tectona-grandis-l-f-juvenile-wood/

Dias, J. M. S., Oliveira Filho, F. M., Araújo, A. Y. F., César, S. F., & Cunha, R. D. A. (2018). Avaliação comparativa entre métodos de aferição do teor de umidade em peças de madeira de dimensões reduzidas. In Anais do XXII Encontro Latino-Americano de Iniciação Científica, XVIII Encontro Latino-Americano de Pós-Graduação e VIII Encontro de Iniciação à Docência. Universidade do Vale do Paraíba.

Digisystem. (2019). Medidor de umidade de contato para madeiras DUC 2020. Digisystem.

Donato, D. B., Castro, R. V. O., Carneiro, A. C. O., Carvalho, A. M. M. L., Pereira, B. L. C., Oliveira, A. C., & Barbosa, C. J. (2014). Determinação da umidade da madeira em tora por diferentes métodos. Pesquisa Florestal Brasileira, 34(80), 449–453. https://doi.org/10.4336/2014.pfb.34.80.608

Gann Mess- und Regeltechnik GmbH. (2007). GANN Hydromette H 35 + HT 65: Instruções de uso. https://www.gann.de/en/products/handhelds/electronic-moisture-meters/classic-series/ht-65

James, W. L. (1988). Electric moisture meters for wood (General Technical Report FPL-GTR-6). United States Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. https://research.fs.usda.gov/download/treesearch/9823.pdf

Rodrigues, W. (1999). Determinação do teor de umidade em madeiras por meio de medidores elétricos (Dissertação de mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

Pinheiro, C. (2014). *Efeitos do teor de umidade da madeira no fresamento de Pinus elliottii* (Dissertação de mestrado). Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá.

Fonte, A. P. N., & Trianoski, R. (2015). Efeito da gramatura sobre a qualidade de colagem lateral da madeira de *Tectona grandis*. *Revista de Ciências Agroveterinárias, 14*(3), 224–233. https://doi.org/10.5965/223811711432015224

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Análise de covariância para avaliação do desempenho de madeira sólida e engenheirada à flexão estática

Geraldo Bortoletto Júnior[1]

[1] Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" – ESALQ/Universidade de São Paulo - USP

Resumo: A comparação do desempenho mecânico entre madeira sólida e produtos de madeira engenheirada pode ser influenciada pelas diferenças de densidade entre os materiais, dificultando a avaliação de sua eficiência estrutural. Nesse contexto, avaliou-se o efeito de três diferentes materiais de engenharia — madeira sólida de *Pinus* sp. tratada com CCA, compensado misto de *Eucalyptus dunnii* e *Pinus* sp., e LVL de *Eucalyptus* sp. — sobre os módulos de ruptura (MOR) e de elasticidade (MOE) à flexão estática, utilizando a densidade como covariável. Antes das análises estatísticas, os valores de densidade, MOR e MOE obtidos dos materiais avaliados foram corrigidos para o teor de umidade padrão de 12%. Em seguida, aplicou-se aos dados uma análise de covariância (ANCOVA), adotando a densidade a 12% como covariável, seguida pelo teste de Tukey ($\alpha = 0,05$). Nas médias brutas, o compensado apresentou desempenho superior ao da madeira sólida. Contudo, após o ajuste estatístico para a densidade média global, ocorreu uma inversão, e a madeira sólida superou o compensado em resistência e rigidez. O LVL consolidou-se como o material de maior eficiência tecnológica, mantendo-se estatisticamente superior aos demais avaliados sob flexão estática.

Palavras-chave: Propriedades mecânicas; Painéis estruturais; Produtos de madeira.

Analysis of covariance for evaluating the performance of solid and engineered wood in static bending

Abstract: Comparing the mechanical performance of solid wood and engineered wood products can be influenced by differences in density among the materials, making it difficult to assess their structural efficiency. In this context, the effect of three different engineered wood materials — solid *Pinus* sp. wood treated with CCA, mixed *Eucalyptus dunnii* and *Pinus* sp. plywood, and *Eucalyptus* sp. LVL — on the modulus of rupture (MOR) and modulus of elasticity (MOE) in static bending was evaluated, using density as a covariate. Prior to the statistical analyses, the density, MOR, and MOE values obtained for the evaluated materials were corrected to the standard moisture content of 12%. Subsequently, an analysis of covariance (ANCOVA) was applied to the data, with density at 12% moisture content as the covariate, followed by Tukey's test ($\alpha = 0.05$). Based on the raw means, the plywood exhibited higher performance than solid wood. However, after statistical adjustment for the overall mean density, an inversion occurred, with solid wood outperforming plywood in both strength and stiffness. LVL showed the highest technological efficiency, remaining statistically superior to the other materials evaluated under static bending.

Keywords: Mechanical properties; Structural panels; Wood products.

1. Introdução

A caracterização mecânica da madeira e de seus derivados baseia-se na determinação dos módulos de ruptura (MOR) e de elasticidade (MOE), parâmetros fundamentais para

avaliar a resistência e a rigidez em flexão estática (Bortoletto Júnior e Garcia, 2004; Iwakiri, 2005; Wang et al., 2024). Contudo, a interpretação isolada dessas propriedades mecânicas frequentemente desconsidera a influência crucial da densidade aparente do material, cuja propriedade física se encontra intrinsecamente ligada à variabilidade da composição química e da estrutura anatômica da madeira, bem como aos parâmetros de compactação aplicados na consolidação dos painéis multilaminados.

Na ciência da madeira, a densidade é um importante indicador das propriedades mecânicas, pois ela correlaciona-se diretamente com a resistência e a rigidez (Panshin; De Zeeuw, 1980; Walker, 1993; Cabral et al., 2022). Em produtos engenheirados, características como a densidade e o arranjo direcional das lâminas também influenciam o desempenho mecânico; em painéis multilaminados, maiores densidades e o direcionamento paralelo das lâminas resultaram em ganhos de resistência e rigidez (Bilik e Trianoski, 2022).

A correlação direta entre densidade e propriedades de flexão estática introduz um desafio metodológico complexo ao comparar materiais com arquiteturas estruturais distintas, tais como a madeira sólida, os painéis compensados e os de lâminas paralelas (LVL). Esses painéis industrializados apresentam aumento da densidade, em relação à madeira de origem, decorrente da compactação das lâminas durante a prensagem, favorecida pelo efeito da temperatura que reduz a resistência da madeira à compressão, e da incorporação da massa de adesivo polimérico denso (Spulle et al., 2021; Khoo et al., 2021). Consequentemente, uma alta resistência mecânica observada em um painel industrializado pode estar associada à sua maior densidade, resultante da compactação física e do acréscimo da massa do adesivo curado, e não exclusivamente à eficiência de seu arranjo estrutural.

Para mitigar esse viés e viabilizar uma comparação equitativa, a aplicação da análise de covariância (ANCOVA) surge como uma ferramenta estatística de importante interesse. Ao adotar a densidade como covariável, torna-se possível isolar o seu efeito puramente gravitacional e volumétrico. Essa abordagem metodológica permite "purificar" os dados mecânicos, revelando o real impacto da arquitetura interna e dos processos de engenharia de fabricação sobre o desempenho dos materiais derivados da madeira, preenchendo uma lacuna crítica na modelagem desses produtos estruturais lignocelulósicos.

Os objetivos do trabalho foram os seguintes: **i**) avaliar e comparar os módulos de ruptura (MOR) e de elasticidade (MOE) à flexão estática de três diferentes materiais de engenharia; **ii**) investigar a influência da densidade como covariável física interferente nas propriedades mecânicas avaliadas; **iii**) isolar estatisticamente o efeito da densidade através de

modelagem por análise de covariância (ANCOVA), determinando as médias marginais ajustadas e validando a eficiência estrutural intrínseca de cada tipo de material.

2. Material e métodos

2.1 Matéria-prima

Os três tipos de materiais avaliados no trabalho foram cedidos por uma empresa do segmento madeireiro, todos eles já cortados nas dimensões nominais empregadas nos ensaios (40 x 40 x 950 mm), compreendendo o que segue: **i)** 08 amostras de madeira sólida de *Pinus* sp. tratada com CCA; **ii**) 08 amostras de compensado misto de *Eucalyptus dunni* (11 lâminas) e *Pinus* sp. (10 lâminas), totalizando 21 lâminas sobrepostas com camadas cruzadas em relação à direção das fibras, coladas entre si com resina fenol-formaldeído; **iii**) 08 amostras de LVL de *Eucalyptus* sp., composto por 21 lâminas, sobrepostas em camadas com a direção das fibras estritamente paralelas ao comprimento do painel, coladas entre si com resina fenol-formaldeído.

2.2 Ensaios físico-mecânicos

As amostras dos três tipos de materiais avaliados foram submetidas a ensaios de flexão estática, por meio de uma máquina universal de testes computadorizada, dotada de célula de carga e LVDT (*Linear Variable Differential Transformer*) para registro das forças aplicadas e dos deslocamentos verticais, respectivamente. Os ensaios foram conduzidos com base na norma brasileira NBR 7190 (ABNT, 2022), respeitando-se a relação L/H = 21 para o vão entre os apoios. No caso da madeira sólida, em 04 amostras a força foi aplicada na face tangencial, do lado côncavo dos anéis de crescimento; nas outras 04 amostras a força foi aplicada na face radial. No caso do compensado, em 04 amostras a força foi aplicada na direção perpendicular às linhas de cola (*flatwise*); nas outras 04 amostras a força foi aplicada na direção paralela às linhas de cola (*edgewise*). Para o LVL, adotou-se as aplicações de força do mesmo modo descrito para o compensado.

Antes desses ensaios, as amostras tiveram suas dimensões e massas mensuradas, por meio de paquímetro e balança, gerando os dados necessários para determinação da densidade aparente (D) de cada tipo de material, obtida pela divisão da massa pelo volume correspondente.

Após os ensaios de flexão estática foram determinados o MOR e o MOE dos materiais. Também, foram retiradas subamostras, mais próximas quanto o possível da região de ruptura, para determinação do teor de umidade dos materiais no momento dos ensaios. Para tanto, utilizou-se o método gravimétrico, ou seja, de pesagem das subamostras antes (P_U)

e após o período de secagem em estufa (P_S) na temperatura de 103±2 °C, até atingirem massa constante. O teor de umidade dos materiais expresso em percentagem, no momento dos ensaios de flexão, foi obtido pela diferença entre P_U e P_S, dividido por P_S, multiplicado por 100.

Finalmente, o teor de umidade no momento dos ensaios foi utilizado para corrigir os valores iniciais de D, MOR e MOE para o teor de umidade padrão de 12%, empregando-se as expressões de correção preconizadas pela norma NBR 7190 (2022) para cada caso, passando-se a denomina-los, respectivamente, $D_{12\%}$, $MOR_{12\%}$ e $MOE_{12\%}$.

2.3 Modelagem estatística

Para controlar estatisticamente a influência da $D_{12\%}$ sobre o $MOR_{12\%}$ e o $MOE_{12\%}$, foi estruturado um modelo linear geral de análise de covariância (ANCOVA), conforme dado a seguir:

$$Y_{ij} = \mu + \tau_i + \beta\left(x_{ij} - \bar{x}..\right) + \varepsilon_{ij}$$

Onde: Y_{ij} representa as variáveis de resposta mecânica ($MOR_{12\%}$ ou $MOE_{12\%}$); μ é a média geral da variável de resposta; τ_i corresponde ao efeito fixo atribuído ao tipo de material avaliado (i = madeira sólida, compensado, LVL); β designa o coeficiente de inclinação linear comum da covariável; x_{ij} denota a $D_{12\%}$ observada em cada amostra individual; $\bar{x}..$ define a média global observada para a covariável $D_{12\%}$; e ε_{ij} configura o erro experimental do modelo.

2.4 Validação de pressupostos e testes complementares

A validação das inferências lineares procedeu-se mediante a verificação estrita dos seguintes pressupostos estatísticos: **i**) Homogeneidade das inclinações de regressão: testada através do termo de interação direta (tipo de material x $D_{12\%}$) no modelo linear, avaliando o paralelismo das retas de tendência individuais; **ii**) Normalidade e homogeneidade de variâncias dos resíduos: o comportamento distribucional foi avaliado utilizando os resíduos extraídos do modelo geral por meio dos testes de Shapiro-Wilk (normalidade) e de Levene (homocedasticidade), associados à consistência do delineamento experimental balanceado (N = 8 por grupo de material avaliado); **iii**) Teste de Tukey pós-ANCOVA: uma vez constatada a significância estatística global dos efeitos pelo teste F, as médias marginais estimadas (médias corrigidas matematicamente para o valor médio global da $D_{12\%}$) foram submetidas ao teste de comparações múltiplas de Tukey a 5% de significância.

As análises estatísticas e as modelagens de covariância foram conduzidas em ambiente de programação Python (versão 3.10), utilizando as bibliotecas de referência científica SciPy

(submódulo stats) e Statsmodels. As rotinas computacionais foram empregadas no processamento dos dados, na validação dos pressupostos, na extração dos quadros de ANCOVA e na execução automatizada do teste de comparações múltiplas de Tukey.

3. Resultados e discussão

3.1 Validação preliminar dos pressupostos da ANCOVA

A premissa fundamental de paralelismo exigida para a estruturação de uma inclinação linear unificada foi atendida satisfatoriamente. A análise do termo de interação revelou que não há variação significativa entre os ângulos de inclinação individuais de cada material: **i**) Interação no $MOR_{12\%}$: F = 1,54; Valor-p = 0,2416; **ii**) Interação no $MOE_{12\%}$: F = 1,55; Valor-p = 0,2386. Assim, em ambos os casos, aceitou-se a hipótese de paralelismo das retas. Adicionalmente, os resíduos matemáticos extraídos do modelo de covariância integrado demonstraram aderência rigorosa à curva de distribuição normal e homogeneidade de variâncias (homocedasticidade).

3.2 Equações de regressão e comportamento preditivo

A modelagem linear combinada estimou as equações de regressão para o comportamento mecânico dos materiais em função da densidade ($X = D_{12\%}$), governadas pelas respectivas inclinações de tendência comuns calculadas no modelo ($\beta_{MOR12\%}$ = 89,68 MPa e $\beta_{MOE12\%}$ = 24268,69 MPa).

As equações estimadas para cada material foram as seguintes: **i**) Madeira sólida: $MOR_{12\%} = 29,30 + 89,68 \cdot X$; $MOE_{12\%} = -2156,92 + 24268,69 \cdot X$; **ii**) Compensado: $MOR_{12\%} = -6,00 + 89,68 \cdot X$; $MOE_{12\%} = -7143,62 + 24268,69 \cdot X$; **iii)** LVL: $MOR_{12\%} = 29,88 + 89,68 \cdot X$; $MOE_{12\%} = 27,99 + 24268,69 \cdot X$. Quando essas equações são equalizadas, substituindo-se X pela média global da covariável ($\overline{x}$ = 0,6469 g/cm³), obtêm-se exatamente os valores das médias marginais ajustadas de cada material.

3.3 Análise de covariância global

Os testes F indicaram efeito significativo tanto da covariável $D_{12\%}$ quanto do tipo de material avaliado sobre o MOR e o MOE, demonstrando que desempenham papéis explicativos no sistema analítico adotado (Tabela 1 e Tabela 2).

Tabela 1 - Quadro de análise de covariância (ANCOVA) para o MOR

FV	SQ	GL	Estatística F	Valor-p (Pr>F)	Significância
Materiais Avaliados	4575,23	2	34,23	$3,49 \times 10^{-7}$	**

D12% (covariável)	348,06	1	5,21	0,0336	*
Resíduo	1336,66	20	-----	----------	----------

**Significativo (p < 0,05). **Altamente significativo (p < 0,01).*

Tabela 2 - Quadro de análise de covariância (ANCOVA) para o MOE

FV	SQ	GL	Estatística F	Valor-p (Pr>F)	Significância
Materiais Avaliados	$1{,}69 \times 10^{8}$	2	173,48	$2{,}31 \times 10^{-13}$	**
D12% (covariável)	$2{,}54 \times 10^{7}$	1	52,01	$5{,}56 \times 10^{-7}$	**
Resíduo	$9{,}76 \times 10^{6}$	20	--------	----------	----------

***Altamente significativo (p < 0,01).*

3.4 Médias ajustadas e agrupamento estatístico de Tukey

A Tabela 3 consolida as médias experimentais, bem como as médias marginais estimadas acompanhadas das respectivas distinções por letras do teste de comparações múltiplas de Tukey.

Tabela 3 - Resumo comparativo das médias de amostragem brutas, e médias marginais ajustadas por ANCOVA com letras de agrupamento do teste de Tukey.

Materiais	$D_{12\%}$ (g/cm³)	$MOR_{12\%}$ Bruto (MPa)	$MOR_{12\%}$ Ajustado (MPa)	$MOE_{12\%}$ Bruto (MPa)	$MOE_{12\%}$ Ajustado (MPa)
Madeira	$0{,}478^{16}$	$57{,}08^{21}$	87,31 *b*	$9428{,}38^{22}$	13542,50 *b*
Compensado	$0{,}775^{1}$	$63{,}59^{13}$	52,01 *c*	$11682{,}13^{16}$	8555,80 *c*
LVL	$0{,}687^{1}$	$91{,}53^{6}$	87,89 *a*	$16712{,}50^{3}$	15727,41 *a*

Médias ajustadas seguidas pela mesma letra na coluna não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey (α = 0,05). O número sobrescrito nas médias da $D_{12\%}$, do $MOR_{12\%}$, e do $MOE_{12\%}$ brutos dos materiais, indica o coeficiente de variação em percentagem.

Observa-se na Tabela 3 que o desdobramento das médias experimentais e a respectiva correção promovida pelo controle da $D_{12\%}$ revelaram uma alteração significativa na classificação de desempenho mecânico dos materiais avaliados.

Numa análise estatística simplesmente descritiva de médias brutas, o painel compensado misto apresentou valores superiores de resistência e rigidez em relação a madeira sólida de pinus. No entanto, a aplicação da ANCOVA demonstrou que essa diferença está associada, em parte, à maior densidade do compensado (0,775 g/cm³), impulsionada pela presença de lâminas de *Eucalyptus dunnii* (espécie de alta densidade) combinada com a densificação por prensagem. Esse processo afeta especialmente as lâminas de pinus que compõem o painel misto, pois

apresentam menor resistência à compressão durante a prensagem e são compactadas em maior grau. De acordo com Hua et al. (2022), as madeiras do gênero *Eucalyptus* geralmente apresentam maior resistência e rigidez em relação a muitas espécies de coníferas. Soma-se a isso a incorporação da resina fenol-formaldeído nas linhas de cola, cuja massa e participação volumétrica, associadas à elevada densidade do adesivo após a cura, também contribuem para a densidade final do painel (Khoo et al., 2021)

Ao qualificar e equalizar matematicamente todos os materiais para uma mesma densidade referencial de 0,6469 g/cm³, observou-se uma inversão notável no comportamento estrutural: a madeira sólida de pinus superou o compensado misto tanto em resistência ($MOR_{12\%}$ ajustado de 87,31 MPa contra 52,01 MPa) quanto em rigidez ($MOE_{12\%}$ ajustado de 13542,50 MPa contra 8555,80 MPa). Tecnicamente, isso ocorre porque o arranjo ortogonal do compensado (laminação cruzada) direciona praticamente metade de suas lâminas a 90° em relação ao plano solicitado; embora essa arquitetura possa resultar em excelente estabilidade dimensional planar, ela penaliza severamente o desempenho mecânico, pois o esforço de flexão exige continuidade de fibras longitudinais.

Por outro lado, o LVL de eucalipto consolidou-se como o material de maior eficiência estrutural em ambos os cenários. Mesmo após o desconto estatístico do fator densidade, o LVL manteve valores de $MOR_{12\%}$ ajustado (87,89 MPa) e $MOE_{12\%}$ ajustado (15727,41 MPa) significativamente superiores aos demais materiais avaliados. Essa eficiência mecânica superior decorre da sinergia entre a resistência mecânica intrínseca do gênero *Eucalyptus* (Hua et al., 2022), a arquitetura de suas 21 lâminas com as fibras paralelas (Bilik e Trianoski, 2022) e a eficiente transferência de tensões proporcionada pela resina fenol-formaldeído, altamente rígida. Além disso, o processo de laminação técnica do LVL dispersa eventuais defeitos naturais da madeira, redutores da resistência e da rigidez, tais como nós e desvios de grã, e o torna mais homogêneo (Bortoletto Júnior, 2009; Wang et al., 2024). Essa homogeneidade do LVL relatada na literatura é corroborada pelos dados da Tabela 3, observando-se os baixos coeficientes de variação das suas propriedades de resistência e rigidez. A paralelização e a dispersão dos defeitos naturais das lâminas que compõem o LVL de eucalipto contribuem para que as fibras longitudinais absorvam as tensões de tração e compressão na flexão com máxima eficácia, superando as limitações anatômicas da madeira sólida e as perdas direcionais do compensado misto comentadas anteriormente.

Bortoletto Júnior (2008) apresenta resultados das propriedades de flexão estática para diferentes espécies e variedades de *Pinus* (*P. caribaea* var. *caribaea*, *P. caribaea* var.

hondurensis, *P. caribaea* var. *bahamensis*, *P. oocarpa*, *P. merkusii*, *P. taeda* e *P. elliottii* var. *elliottii*) cultivadas no estado de São Paulo, cujos valores de MOR variaram entre 59 e 86 MPa e os de MOE, entre 6431 e 12969 MPa. Verifica-se que o valor médio do MOR bruto da madeira sólida do presente estudo (Tabela 3) mostrou-se ligeiramente abaixo da faixa reportada na literatura; contudo, o MOE bruto enquadrou-se no intervalo descrito.

Jaeger e Ziger (2007) avaliaram compensados mistos de *Eucalytus dunnii* e *Pinus taeda*, com 18 mm de espessura, compostos por 9 lâminas (5 de eucalipto e 4 de pinus) coladas com fenol-formaldeído, e obtiveram valores médios de MOR e MOE à flexão estática de 57,79 MPa e 9845,94 MPa, respectivamente. Veiga (2026) avaliou compensados mistos de *Eucalytus dunnii* e *Pinus* spp., com 12 mm de espessura, compostos por 5 lâminas (3 de eucalipto e 2 de pinus) coladas com fenol-formaldeído, e obteve valores médios de densidade aparente, MOR e MOE à flexão estática, respectivamente, de 0,648 g/cm³, 57,20 MPa e 7909,78 MPa. Observa-se que os valores de MOR e MOE dos compensados relatados na literatura, embora levemente inferiores, são compatíveis com os valores brutos obtidos no presente estudo.

Lara Palma e Ballarin (2011) avaliaram as propriedades de painéis LVL de 50 mm de espessura, produzidos com 23 lâminas de *Eucalyptus grandis* coladas com fenol-formaldeído e obtiveram valores médios de densidade aparente igual a 0,690 g/cm³, MOR e MOE à flexão estática (*flatwise*) de 88,76 MPa e 13114 MPa, respectivamente. Para flexão estática (*edgwise*), os valores médios de MOR e MOE encontrados pelos autores foram, respectivamente, 88,63 MPa e 15871 MPa. Nota-se que os valores de densidade aparente, MOR e MOE obtidos por esses autores são próximos e condizentes com os valores encontrados no presente estudo.

Guimarães Júnior et al. (2015) avaliaram painéis LVL de 18 mm de espessura, obtidos a partir da madeira de 5 clones de *Eucalyptus urophylla*, produzidos com 9 lâminas coladas com resorcinol-formaldeído, e encontraram valores médios de densidade aparente variando entre 0,610 e 0,830 g/cm³ e de MOR e MOE à flexão estática (*flatwise*), respectivamente, entre 53,5 MPa e 59,8 MPa, e entre 10408,6 MPa e 12558,2 MPa. Ainda que a faixa de densidade aparente determinada por esses autores inclua o valor encontrado no presente estudo observa-se que os respectivos valores de MOR e MOE são notadamente inferiores.

4. Conclusões

Com base nos resultados experimentais e nas modelagens estatísticas conduzidas neste estudo, depreendem-se as seguintes conclusões:

A inclusão da $D_{12\%}$ como covariável foi estatisticamente validada pelo teste de homogeneidade de inclinações, demonstrando ser uma premissa fundamental para controlar o efeito mascarador da densidade sobre as propriedades de flexão estática.

O LVL de *Eucalyptus* sp. consolidou-se como o material de maior eficiência mecânica dentre os demais avaliados. Mesmo após a retirada do efeito benéfico da densidade, o LVL reteve os maiores valores de $MOR_{12\%}$ ajustado (87,89 MPa) e $MOE_{12\%}$ ajustado (15727,41 MPa), evidenciando a contribuição da sua arquitetura estrutural baseada na laminação paralela e da homogeneidade dada pela dispersão de defeitos naturais da madeira.

A madeira sólida de *Pinus* sp. revelou-se estruturalmente superior ao compensado misto de *Eucalyptus dunnii* e *Pinus* sp. quando avaliada sob uma mesma densidade referencial. O MOR ajustado da madeira sólida superou o do compensado em 67,8%, enquanto o MOE ajustado foi 58% maior.

O processo de cruzamento de lâminas a 90° característico do compensado, embora possa lhe conferir excelente estabilidade dimensional planar, comprometeu severamente sua eficiência mecânica longitudinal, tornando esse material menos rígido e menos resistente que todos os demais avaliados quando isolado o fator densidade.

5. Agradecimentos

O autor expressa seus agradecimentos à Indusparquet Indústria e Comércio de Madeiras Ltda., representada pelo senhor José Antônio Baggio, pelo fornecimento das matérias-primas utilizadas. Estende os agradecimentos ao Prof. Dr. João Luís Ferreira Batista (ESALQ/USP) pela revisão das análises estatísticas deste estudo.

6. Referências bibliográficas

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2022). Projeto de estruturas de madeira (ABNT NBR 7190).

Bilik, A. C. B.; Trianoski, R. (2022). Evaluation of the physico-mechanical properties of plywood panels and laminated veneer lumber of *Pinus glabra Walt*. Floresta, 52(2), pp. 323–331.

Bortoletto Júnior, G.; Garcia, J. N. (2004). Propriedades de resistência e rigidez à flexão estática de painéis OSB e compensados. Árvore, 28(4), pp. 563-570.

Bortoletto Júnior, G. (2008). Estudo de algumas propriedades físicas e mecânicas da madeira de *Pinus merkusii*. Scientia Forestalis, 36(79), pp. 237-243.

Bortoletto Júnior, G. (2009). Estudo comparativo das propriedades físicas e mecânicas da madeira e do LVL de *Pinus merkusii*. Revista Forestal Venezolana, 53(2), pp. 191-195.

Cabral, J. P. et al. (2022). Densification of timber: a review on the process, material properties, and application. Journal of Wood Science, 68:20. https://doi.org/10.1186/s10086-022-02028-3

Guimarães Júnior, J. B. et al. (2015). Qualidade de painéis LVL produzidos com madeira de clones de *Eucalyptus urophylla*. Pesquisa Florestal Brasileira, 35(83), pp. 307-313.

Hua, L. S. et al. (2022). Engineering wood products from *Eucalyptus* spp. Advances in Materials Science and Engineering, v. 2022, Article 8000780.

https://doi.org/10.1155/2022/8000780

Iwakiri, S. Painéis de madeira reconstituída. Curitiba: FUPEF, 2005. 247 p.

Jaeger, P.; Ziger, M. (2007). Avaliação das propriedades mecânicas de painéis compensados de *Eucalyptus dunnii* e *Eucalyptus dunnii*/*Pinus* taeda. Cerne, 13(3), pp. 329-338.

Khoo, P. S. et al. (2021). Effect of glue spreads on the structural properties of laminated veneer lumber from spindleless rotary veneers recovered from short rotation *Hevea* plantation logs. Polymers, 13(21), 3799.

https://doi.org/10.3390/polym13213799

Lara Palma, H A.; Ballarin, A. W. (2011). Propriedades físicas e mecânicas de painéis LVL de *Eucalyptus grandis*. Ciência Florestal, 21(3), p. 559-566.

Veiga, B. M. (2026). Avaliação de painéis compensados produzidos com lâminas de *Eucalyptus dunnii* e *Pinus* spp. para aplicações em edificações em light wood frame (Dissertação de mestrado). Universidade Federal do Paraná.

Panshin, A. J.; De Zeeuw, C. Textbook of wood technology. 4. ed. New York: McGraw-Hill, 1980. 722 p.

Spulle, U. et al. (2021). Influence of hot pressing technological parameters on plywood bending properties. BioResources, 16(4), p. 7550-7561.

Walker, J. C. F. Primary wood processing: principles and practice. London: Chapman & Hall, 1993. 595 p.

Wang, Q. et al. (2024). Mechanical properties and probabilistic models of wood and engineered wood products: A review of green construction materials. Case Studies in Construction Materials, 21:e03796.

https://doi.org/10.1016/j.cscm.2024.e03796

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Análise de deslocamentos horizontais em torres de madeira roliça, sob ação de ventos

Renilson Luiz Teixeira[1]; Chris Stephanie Larco Chávez[2]; Keliane de Jesus Reis[2]; José Tarcísio Lima[2]; Francisco Carlos Gomes[3]; José Reinaldo Moreira da Silva[2]

[1] IFES/campus Colatina e Departamento de Ciências Florestais – ESAL/UFLA
[2] Departamento de Ciências Florestais – ESAL/UFLA
[3] Departamento de Engenharia Agrícola – EENG/UFLA

Resumo: Este estudo analisou o comportamento estrutural de uma torre de madeira roliça osmopressurizada de *Eucalyptus spp*, no Centro de Excelência em Matas Ciliares (CEMAC/UFLA), sob ação de ventos. O objetivo foi aplicar simulações estruturais simplificadas para avaliar deslocamentos horizontais que afetam a estabilidade global. A metodologia envolveu levantamento geométrico e determinação de cargas de vento, utilizando os softwares Ftool e Eberick. Adotou-se para a madeira o módulo de elasticidade de 17.000 MPa, conforme literatura de ensaios experimentais. Resultados indicaram que, sob condição de apoios engastados, os deslocamentos (6,3 a 8,9 mm) situaram-se abaixo do limite de projeto de 17,6 mm (relação H/500) sugerido para estruturas em serviço. Entretanto, a hipótese de apoios articulados resultou em deslocamento de 20,2 mm, excedendo as recomendações de desempenho. Conclui-se que a rigidez das conexões de base é determinante para a estabilidade global de torres de madeira.

Palavras-chave: Estruturas de madeira; Rigidez estrutural; Simulação e modelagem.

Analysis of horizontal displacements in round timber towers under wind loads

Abstract: This study analyzed the structural behavior under wind loads of a round timber tower made of osmopressurized *Eucalyptus spp* at the Center of Excellence in Riparian Forests (CEMAC/UFLA). The objective was to apply simplified simulation models to evaluate horizontal displacements affecting global stability. The methodology involved geometric survey and load determination, utilizing Ftool and Eberick software. An elasticity modulus of 17,000 MPa was adopted for the timber based on experimental literature. Results indicated that under the fixed support condition, displacements (6.3 to 8.9 mm) were below the allowable limit of 17.6 mm (H/500) recommended for structural serviceability. Conversely, pinned supports led to 20.2 mm, exceeding displacement thresholds. It is concluded that base connection stiffness is essential for global stability in tall timber frame designs.

Keywords: Timber structures; Structural stiffness; Simulation and modeling.

1. Introdução

A segurança e a estabilidade global das edificações dependem da análise rigorosa das ações do vento (NBR 6123, ABNT 2023; NBR 6120, ABNT 2019). Em estruturas de madeira, a anisotropia (Furlani, 1995), o baixo módulo de elasticidade (Ballarin e Nogueira, 2003) e a

sensibilidade higroscópica tornam essa análise crítica para a estabilidade dimensional ao longo do tempo.

A integridade estrutural vincula-se à eficiência das conexões e contraventamentos, visto que falhas em ligações críticas podem causar colapsos progressivos (Brito, 2014). Calil Júnior (2003) destaca que a adequada verificação da estabilidade global é essencial para resistir a esforços laterais. O dimensionamento deve fundamentar-se na NBR 7190-1 (ABNT, 2022), integrada às normas de ações, para assegurar conformidade técnica. Apesar dos avanços, avaliar deslocamentos em estruturas esbeltas permanece um desafio, exigindo simulações que reflitam o comportamento real das conexões (Brito, 2014). Este trabalho objetiva aplicar a simulação simplificada para analisar os deslocamentos horizontais em uma torre confeccionada em madeira roliça.

2. Material e métodos

A metodologia fundamentou na resistência dos materiais, focando em tensões e deformações por carregamentos externos e tensões internas. O estudo de caso analisou a torre de madeira roliça do CEMAC (DCF/ESAL/UFLA), em Lavras/MG, uma estrutura vertical esbelta de toras de *Eucalyptus* sp contra ventada para garantir estabilidade global (Figura 1).



Figura 1. Vista da torre do Centro de Excelência em Matas Ciliares.
Fonte: Autores (2026)

Inicialmente, procedeu-se a caracterização geométrica da estrutura (Figura 2). Nela, encontra-se todos os dados de dimensões em planta (2,5 x 2,5 m), altura total (8,8 m), modulação dos níveis estruturais e identificação dos elementos constituintes, como os montantes verticais, as vigas horizontais e diagonais de contraventamento e os elementos de ligação rotulados. Foram medidos os diâmetros médios dos elementos e as possíveis variações geométricas ao longo do comprimento, características intrínsecas da madeira utilizada.

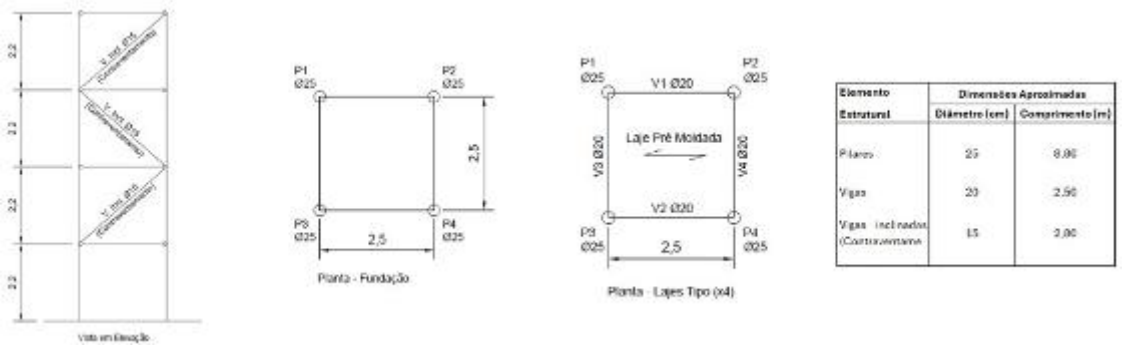


Figura 2. Croqui esquemático.
Fonte: Autores (2026)

Analisaram-se as ligações entre as peças roliças de madeira e sua rigidez para definir as vinculações dos modelos (articuladas, semirrígidas ou engastadas). Desenvolveram-se modelos 2D no software Ftool (Marlin Tecnologia, 2026), como pórtico equivalente, e 3D no Eberick (AltoQi, 2026), para obtenção de esforços, deslocamentos e análise da interação espacial das ações. A determinação das ações de vento foi realizada conforme a NBR 6123 (ABNT, 2023). A velocidade característica do vento está descrita na Equação 1.

$$V_k = V_0 \text{ x } S_1 \text{ x } S_2 \text{ x } S_3 \quad (1)$$

Em que V_o = velocidade básica do vento para a região de Lavras/MG,

S_1 = coeficiente aos fatores topográfico = terreno aproximadamente plano;

S_2 = coeficiente da rugosidade do terreno = Categoria III;

S_3 = fator estatístico = Edificação usual;

A pressão dinâmica do vento (q) foi determinada conforme a Equação 2.

$$q = 0{,}613 . V_k^2 \quad (2)$$

A força total atuante na estrutura foi calculada considerando a área projetada exposta ao vento e o coeficiente de forma da edificação (Equação 3).

$$F = q \cdot C_p \cdot A \quad (3)$$

Em que:

C_p = o coeficiente de pressão externa,

A = a área de projeção da estrutura.

Para fins de modelagem estrutural, a ação do vento foi convertida em carregamento distribuído ao longo da altura da torre (Equação 4).

$$w = \frac{F}{H} \quad (4)$$

Em que: H é a altura total da estrutura.

A avaliação dos deslocamentos horizontais no topo da torre foi realizada com base nos conceitos da resistência dos materiais, considerando a estrutura como elemento em balanço, submetido a carregamento distribuído. A flecha máxima foi estimada por meio da Equação 5.

$$\delta = \frac{w . H^4}{8 . E . I} (5)$$

Em que:

δ = deslocamento horizontal no topo, E = módulo de elasticidade longitudinal da madeira e I = inércia equivalente da seção estrutural, obtida a partir da contribuição dos elementos resistentes da torre.

Para elementos de madeira em toras, a inércia de cada elemento foi considerada com base na seção circular maciça (Equação 6).

$$I_i = \frac{\pi . d_i^4}{64} (6)$$

Em que d é o diâmetro da peça.

A inércia equivalente foi obtida pela soma das contribuições individuais dos elementos estruturais, considerando a posição dos elementos em relação ao eixo neutro global e admitindo-se comportamento solidário entre os elementos (Equação 7).

$$I_{eq} = \sum (I_i + A_i . y_i^2) (7)$$

Em que:

I_i= inércia da seção da tora,

A_i= área da seção transversal,

y_i= distância do centroide da tora ao eixo neutro global.

Na caracterização elástica da madeira da torre, foi considerado como madeira de *Corymbia citriodora*, apresentando módulo de elasticidade longitudinal médio de aproximadamente 17.000 MPa (Ballarin e Nogueira, 2003), fundamentado na equivalência estatística dos ensaios de compressão (16.981 MPa) e tração (16.583 MPa), paralela às fibras, normativamente aceitos pela NBR 7190-1 (ABNT, 2022). Para a modelagem estrutural da torre de peças roliças de *Corymbia citriodora*, a adoção do coeficiente de Poisson υ_{LR} = 0,37 é perfeitamente adequada, sendo este o valor médio consagrado pela literatura internacional de Bodig e Jayne (1993) como uma simplificação segura para a caracterização elástica transversal de madeiras folhosas

Nos deslocamentos horizontais, foram adotados critérios de estado limite de serviço, conforme recomendações normativas. A NBR 7190-1 (ABNT, 2022) não estipula valores de

limite global de deformabilidade lateral para estruturas verticais esbeltas de madeira. Assim, adotou-se o critério conservador de H/500, equivalente a 17,6 mm, recomendado para pórticos verticais sob combinações frequentes de serviço de concreto armado (NBR 6118, ABNT 2023). Ela é resguardada pela literatura internacional de engenharia de estruturas em madeira (EN 1995-1-1, 2004, cláusula 9.2.5.3), que prescreve limites de deslocamento lateral instantâneo na ordem de l/500 para sistemas de contraventamento de base, garantindo a estabilidade global em serviço.

Na interpretação dos resultados foram consideradas as diretrizes da NBR 6120 (ABNT, 2019) e os princípios clássicos da resistência dos materiais. A comparação dos valores dos deslocamentos foi analiticamente obtida. A coerência dos modelos adotados e a influência dos sistemas de contraventamento e da rigidez das ligações no comportamento global da estrutura foram avaliadas pelas simulações computacionais.

3. Resultados e discussão

A análise adotada, dos deslocamentos horizontais induzidos pelo vento, possibilitou resultados consistentes e tecnicamente fundamentados, contribuindo para a compreensão do desempenho estrutural com carregamentos laterais. Na Tabela 1 encontram os resultados dos parâmetros, do cálculo da ação do vento e verificação dos deslocamentos horizontais das peças roliças da torre do CEMAC (DCF/ESAL/UFLA).

Tabela 1. Parâmetros e cálculos da ação do vento e verificação de deslocamento na construção de madeira do CEMAC (DCF/ESAL/UFLA)

Etapa	Parâmetro	Descrição / Hipótese adotada	Expressão	Resultado
1	**Fator topográfico (S_1)**	Terreno aproximadamente plano	S_1	1,0
2	**Fator de rugosidade (S_2)**	Categoria III (campus com vegetação), altura 10–20 m	S_2	0,90
3	**Fator estatístico (S_3)**	Edificação usual	S_3	1,0
4	**Velocidade básica**	Região de Lavras–MG	V_0	35 m/s
5	**Velocidade característica**	Combinação dos fatores	$V_k = V_0 \cdot S_1 \cdot S_2 \cdot S_3$	31,5 m/s
6	**Pressão dinâmica**	Função da velocidade do vento	$q = 0{,}613 \cdot V_k^2$	608 N/m²
7	**Altura da torre**	Geometria da estrutura	H	8,80 m
8	**Largura frontal**	Dimensão exposta ao vento	b	2,50 m
9	**Área exposta**	Área projetada	$A = H \cdot b$	22 m²

10	**Coeficiente de forma**	Estrutura esbelta de madeira	C_p	1,2
11	**Força do vento**	Ação total na estrutura	$F = q \cdot C_p \cdot A$	16,05 kN
12	**Carga distribuída**	Distribuição ao longo da altura	$w = \frac{F}{H}$	1,82 kN/m
13	**Flecha no topo (calculada)**	Modelo em balanço	$\delta_{calc} = \frac{w \cdot H^4}{8 \cdot E \cdot I_{eq}}$	*Ftool e Eberick
14	**Limite de deslocamento**	Estado limite de serviço	$\delta_{calc} \leq \frac{H}{500}$	$\leq 1{,}76$ cm

* A flecha horizontal no topo foi estimada pelo modelo de viga em balanço, adequada para análises preliminares de estruturas esbeltas. Os cálculos dos deslocamentos são realizados por meio de modelagem computacional nos softwares Ftool (Marlin Tecnologia, 2026) e Eberick (AltoQi, 2026), considerando E = 17.000 MPa e υ_{LR}=0,37, e a geometria real da estrutura em toras, com determinação automática da Inércia Equivalente, garantindo maior precisão na avaliação dos deslocamentos em serviço.

Na Tabela 2 encontram-se os carregamentos permanentes sobre as vigas. As ações provenientes da alvenaria de vedação foram calculadas utilizando-se blocos cerâmicos vazados de 90 mm, revestidos em ambas as faces, resultando em carga de 1,6 kN/m². Sendo a altura de pé-direito de 2,20 m, obteve-se carga linear de 3,52 kN/m sobre as vigas. O peso próprio dos elementos de madeira foi incorporado automaticamente nas modelagens dos softwares Ftool (Marlin Tecnologia, 2026) e Eberick (AltoQi, 2026), baseando-se em suas propriedades geométricas e físicas.

Para as lajes pré-moldadas de 120 mm de espessura, adotou-se peso próprio de 1,67 kN/m² somado a carga variável de 3,0 kN/m², pela utilização como cozinha, na instituição de ensino. A reação de apoio dessas lajes foi calculada com distribuição da carga igualmente entre duas vigas paralelas, com vão de 2,50 m, resultando em 5,84 kN/m, que corresponde a 50% da sua carga total. As contribuições de alvenaria e lajes resultaram em carregamento distribuído de 9,36 kN/m para as análises estruturais.

Tabela 2. Carregamentos permanentes sobre as vigas

Etapa	Ação considerada	Descrição / Hipótese adotada	Expressão	Resultado
1	**Alvenaria de vedação**	Bloco cerâmico vazado (9 cm), revestido em ambas as faces, altura de 2,20 m	q_{alv} = (1,6KN/m²) **.** 2,20 m	3,52 kN/m
2	**Peso próprio das vigas de madeira**	Considerado automaticamente na modelagem estrutural	—	Automático (Ftool/Eberick)
3	**Peso próprio das lajes**	Laje pré-moldada, espessura final de 12 cm	g_{laje} = 1,67	1,67 kN/m²
4	**Carga variável (sobrecarga de uso)**	Cozinha em instituição de ensino	q_{var} = 3,00	3,00 kN/m²

5	**Reação de apoio das lajes**	50% da soma das cargas distribuídas em duas vigas (vão = 2,50 m)	R = (2,50 . (1,67 + 3,00)) . 0,50	5,84 kN/m
6	**Carga total nas vigas**	Soma das ações atuantes	q_{total} = 3,52 + 5,84	9,36 kN/m

3.1 Modelagem estrutural no software Ftool (Marlin Tecnologia, 2026)

Com configuração de pórtico plano bidimensional, após os carregamentos das ações do vento e das forças permanentes (Tabelas 1 e 2), com pilares engastados na base e com características geométricas (Figura 2), além da adoção do módulo de elasticidade longitudinal de 17.000 MPa e coeficiente de Poisson (υ_{LR} = 0,37), o modelo estrutural (Figura 3), para o deslocamento horizontal no topo, atingiu 6,3 mm (Figura 4), que se encontra abaixo do limite máximo admissível (17,6 mm), estabelecido para critérios de serviço (Tabela 1), indicando comportamento estrutural satisfatório para a rigidez global.

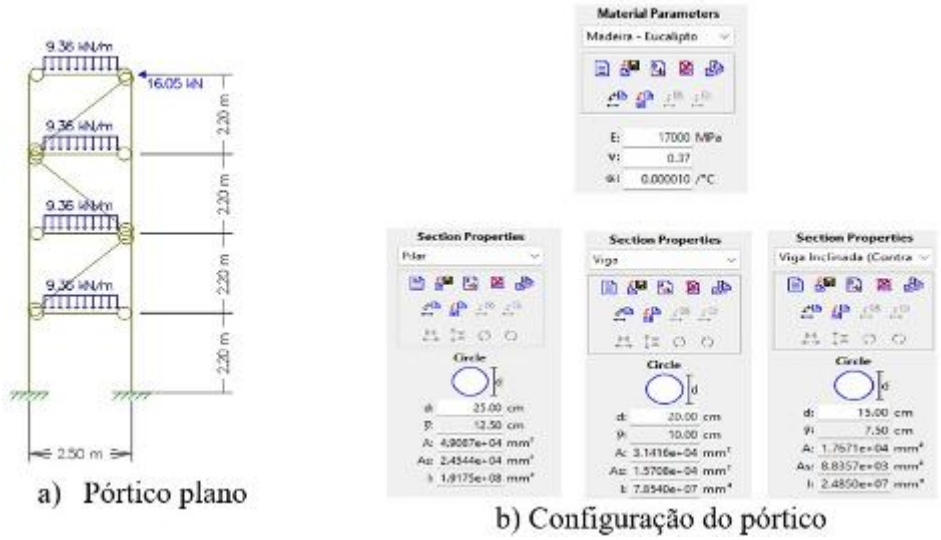


Figura 3. Modelo estrutural, configurado no software Ftool (Marlin Tecnologia, 2026).
Fonte: Autores (2026)

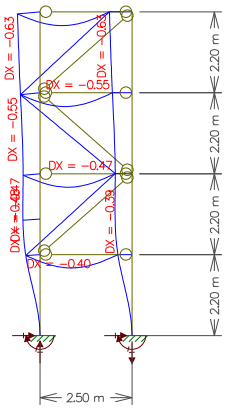


Figura 4. Representação dos deslocamentos horizontais, após configuração normatizada, obtida pelo Ftool (Marlin Tecnologia, 2026).

Fonte: Autores (2026)

A simulação com apoios puramente articulados no Ftool (Figura 5) resultou em deslocamento de 20,2 mm, excedendo o limite de 17,6 mm.

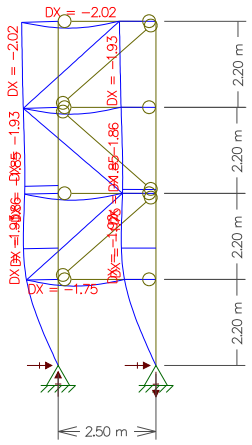


Figura 5. Representação gráfica dos deslocamentos horizontais considerando pilares apenas apoiados (articulados).
Fonte: Autores (2026)

Fisicamente, a hipótese de articulação, na prática, pode representar a perda de rigidez rotacional devido à deterioração localizada de base por umidade ou folgas de fixação mecânica nas emendas metálicas. O comportamento engastado idealizado (com deslocamentos de 6,3 a 8,9 mm) exige uma tipologia de ligação com capacidade de transmitir momentos fletores à fundação, a qual na prática construtiva de estruturas de madeira roliça se dá pelo uso de golas/capuzes metálicos envolventes associados a barras de aço roscadas transversais passantes ancoradas no bloco de concreto.

3.2 Modelagem estrutural no software Eberick (AltoQi, 2026)

Mesmo considerando que o software Eberick (AltoQi, 2026) é tradicionalmente utilizado para dimensionamento de estruturas de concreto armado, adotando as mesmas características geométricas, condições de carregamento e parâmetros anteriormente definidos, observou que o resultado da modelagem do pórtico estrutural permitiu a simulação dos elementos estruturais em madeira, para a classe de resistência Dicotiledônia C-40, como materiais genéricos. A modelagem tridimensional do pórtico, bem como a configuração dos pilares, vigas e elementos de contraventamento, encontra-se na Figura 6. Foi evidenciado a representação estrutural mais completa, em comparação ao modelo bidimensional adotado no Ftool (Marlin Tecnologia, 2026).

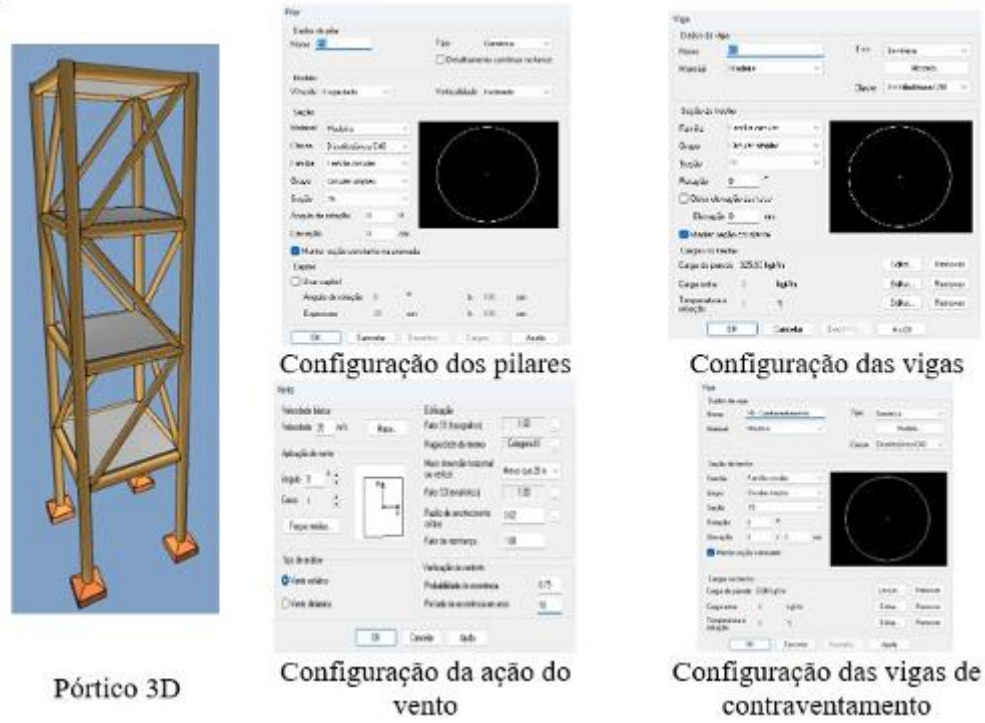


Figura 6. Modelagem estrutural do pórtico em madeiras, pelo software Eberick (AltoQi, 2026), para a classe de resistência Dicotiledônea C-40, como materiais genéricos.
Fonte: Autores (2026)

Os resultados indicaram valores de deslocamentos horizontais, no topo da estrutura da torre, da mesma ordem de grandeza daqueles verificados na análise anterior. O deslocamento máximo registrado foi de 8,9 mm (Figura 7), compatível com o valor obtido no modelo em pórtico plano analisado no software Ftool (Marlin Tecnologia, 2026).

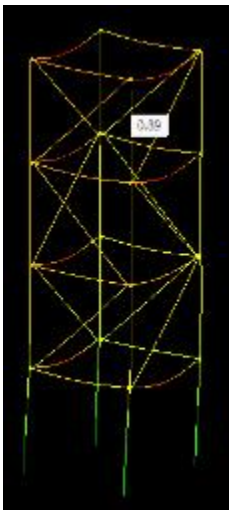


Figura 7. Pórtico unifilar com deslocamento máximo de 8,9 mm (Eberick, 2026).
Fonte: Autores (2026)

A proximidade dos resultados para modelo plano Ftool (Marlin Tecnologia, 2026) e espacial Eberick (AltoQi, 2026) reforça a consistência das modelagens, contribui para a

validação dos procedimentos e aumenta a confiabilidade dos resultados para a avaliação do desempenho estrutural.

4. Conclusões

As análises do comportamento dinâmico da torre de madeira roliça do CEMAC sob ações do vento permitiram concluir que:

- Conformidade em Serviço: Sob a hipótese de vinculação rígida na base (engastamento), os deslocamentos laterais obtidos no topo atendem ao limite normativo de 17,6 mm (relação H/500), atestando o adequado desempenho estrutural em serviço sob a velocidade característica de vento na região de Lavras-MG.
- Criticidade das Ligações: A hipótese de bases articuladas eleva os deslocamentos horizontais para 20,2 mm, ultrapassando os parâmetros de aceitabilidade, o que demonstra que a estabilidade em serviço do sistema vertical roliço é intrinsecamente dependente da rigidez rotacional das ligações de base.
- Influência dos Parâmetros Locais: A calibração com o módulo de elasticidade longitudinal (E=17.000 MPa) e coeficiente de Poisson específico (υ_{LR} =0,37) do *Corymbia citriodora* minimiza superestimativas de flexibilidade estrutural e garante precisão aos resultados numéricos.
- Acurácia Computacional: A convergência entre os resultados obtidos de forma plana bidimensional (6,3 mm) e tridimensional espacial (8,9 mm) valida as modelagens unifilares simplificadas como procedimentos robustos para análises preliminares de torres de madeira roliça.

5. Agradecimentos

Agradecemos à UFLA, pela estrutura necessária para a realização deste trabalho e ao IFES pelo incentivo constante as nossas pesquisas. Agradecemos também a CAPES, ao CNPq e a FAPEMIG cujos recursos foram fundamentais para a realização, bem como participação no VII CBCTEM.

6. Referências bibliográficas

AltoQi. (2026). *Eberick: Software para projetos estruturais* (Versão 2026). https://altoqi.com.br/eberick

Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2019). *ABNT NBR 6120: Ações para o cálculo de estruturas de edificações*. ABNT.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2022). *ABNT NBR 7190-1: Projeto de estruturas de madeira – Parte 1: Critérios de dimensionamento*. ABNT.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2023). *ABNT NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto*. ABNT.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2023). *ABNT NBR 6123: Forças devidas ao vento em edificações*. ABNT.

Ballarin, A. W., Nogueira, M. (2003). *Determinação do módulo de elasticidade da madeira em ensaios de compressão paralela às fibras*. Cerne, 9(1), 66–80.

Bodig, J., Jayne, B. A. (1993). *Mechanics of wood and wood composites* (2nd ed.). Malabar: Krieger Publishing Company.

Brito, L. D. (2014). *Patologia em estruturas de madeira: Metodologia de inspeção e técnicas de reabilitação* (Tese de doutorado). Universidade de São Paulo.

Calil Junior, C., Lahr, F. A. R., Dias, A. A. (2003). *Dimensionamento de elementos estruturais de madeira*. Manole.

European Committee for Standardization. (2004). *EN 1995-1-1: Eurocode 5: Design of timber structures - Part 1-1: General - Common rules and rules for buildings*. Brussels: CEN

Furlani, J. E. (1995). *Um estudo sobre a variação numérica do coeficiente de Poisson na madeira, considerando a anisotropia do material* (Dissertação de mestrado). Universidade Estadual de Campinas.

Marlin Tecnologia. (2026). *Ftool: Análise estrutural* (Versão 2026). https://portal.ftool.com.br/

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Analise dos Principais Fatores do Processo de Vergado da Madeira para a Produção de Moveis

Analysis of the Main Factors in the Wood Bending Process for Furniture Production

Oxandra Roca Rivera[1]; José Patrício Santana de Almeida[1]; Daniel Alberto Álvarez Lazo[1]; Katiúcia Andreia Silva de Araujo[1]; Juarez Benigno Paes[1]; Caridad Rivera Calvo[2]

[1] Universidade Federal do Espírito Santo
[2] Universidad de Pinar del Río

Tema: Produtos Madeireiros: Painéis, produtos engenheirados, madeira preservada, móveis e pisos

Resumo:
O processo de vergado da madeira é amplamente utilizado na fabricação de móveis devido à sua capacidade de produzir peças com maior resistência mecânica, melhor aproveitamento da matéria-prima e elevado valor agregado. O objetivo deste estudo foi determinar os principais fatores que influenciam o processo de curvatura da madeira para otimizar sua aplicação na produção de móveis. A metodologia utilizada baseou-se na consulta a 12 especialistas vinculados a universidades e ao setor madeireiro, os quais avaliaram 12 variáveis relacionadas às propriedades da madeira e às condições de processamento. Os dados foram analisados por meio de estatística descritiva, coeficiente de concordância de Kendall, análise de agrupamento hierárquico e análise de componentes principais. Os resultados indicaram que densidade da madeira, espécie e umidade são os fatores de maior influência no processo de vergado, enquanto variáveis operacionais apresentaram menor impacto relativo. A análise multivariada confirmou que as propriedades intrínsecas da madeira exercem papel predominante no comportamento do material durante a curvatura. Conclui-se que a seleção adequada da matéria-prima é fundamental para melhorar a qualidade e o desempenho do processo de vergado na fabricação de móveis.

Palavras-chave: Plasticidade; Curvatura; Propriedades mecânicas.

Analysis of the Main Factors in the Wood Bending Process for Furniture Production

Abstract:
The wood bending process is widely used in furniture manufacturing due to its ability to produce components with greater mechanical strength, better raw material utilization, and high added value. The objective of this study was to determine the main factors influencing the wood bending process in order to optimize its application in furniture production. The methodology was based on consultations with 12 specialists from universities and the wood industry, who evaluated 12 variables related to wood properties and processing conditions. The data were analyzed using descriptive statistics, Kendall’s coefficient of concordance, hierarchical cluster analysis, and principal component analysis. The results indicated that wood density, species, and moisture content are the most influential factors in the bending process, while operational variables showed lower relative impact. The multivariate analysis confirmed that the intrinsic properties of wood play a predominant role in the material behavior during bending. It was concluded that the proper selection of raw material is essential to improve the quality and performance of the wood bending process in furniture manufacturing.

Keywords: Plasticity; Curvature; Mechanical properties.

Introdução

Entre as diferentes técnicas aplicadas ao processamento da madeira, o vergado destaca-se por possibilitar a produção de peças curvas com maior resistência mecânica, melhor aproveitamento da matéria-prima e elevado valor agregado. Esse processo é amplamente empregado na fabricação de móveis, embarcações, equipamentos esportivos e elementos decorativos, permitindo a obtenção de formas complexas sem comprometer a continuidade das fibras da madeira.

O processo de curvatura da madeira depende diretamente da capacidade do material em sofrer deformações sem ocorrência de falhas estruturais (GRYTSAK, 2024). Para isso, técnicas de plastificação ou amolecimento são normalmente empregadas antes do vergamento, utilizando métodos como vaporização, fervura e aquecimento por micro-ondas. Segundo Wu et al. (2022), o amolecimento da madeira reduz sua rigidez e aumenta sua plasticidade, favorecendo o processo de conformação.

Fatores como espécie da madeira, densidade, umidade, módulo de elasticidade, presença de nós e inclinação das fibras podem influenciar significativamente o desempenho da madeira durante a curvatura. De acordo com Gaff et al. (2016), a capacidade de vergamento está diretamente associada ao menor raio de curvatura suportado pelo material antes da ocorrência de danos estruturais. Além disso, Straže et al. (2023) destacam que as propriedades intrínsecas da madeira exercem forte influência sobre a qualidade final das peças curvadas, podendo afetar tanto a resistência mecânica quanto a estabilidade dimensional do produto.

Nesse contexto, compreender a interação entre as propriedades da madeira e os parâmetros operacionais do processo torna-se fundamental para otimizar a fabricação de móveis com peças vergadas. A utilização de métodos estatísticos multivariados tem se mostrado eficiente na identificação das variáveis mais relevantes em processos industriais complexos, permitindo melhor interpretação das relações entre os fatores analisados. Técnicas como análise de agrupamento hierárquico e análise de componentes principais possibilitam reduzir a dimensionalidade dos dados e identificar padrões de comportamento entre variáveis associadas ao vergamento da madeira (Becker et al., 2024).

Dessa forma, o objetivo geral deste trabalho foi determinar os principais fatores que influenciam o processo de vergado da madeira para otimizar sua aplicação na produção de móveis.

2. Material e métodos

1.1 Condições de trabalho

A pesquisa foi realizada com a participação de 12 especialistas vinculados à Universidade Federal do Espírito Santo, à Universidade de Pinar del Río, assim como profissionais relacionados ao processamento da madeira nos estados de Pernambuco e Espírito Santo, Brasil. Os participantes possuíam experiência nas áreas de tecnologia da madeira, processamento mecânico e pesquisa florestal.

1.2 Metodologia utilizada

1.2.1 Determinação dos principais fatores que influenciam o processo de vergado da madeira

Para identificar os fatores que influenciam o processo de conformação e vergado da madeira, foi desenvolvido um estudo baseado na avaliação de especialistas, conforme metodologia proposta por Cruz et al. (2025). Inicialmente, foi selecionado um grupo de especialistas em tecnologia da madeira e pesquisadores florestais, aos quais foi apresentada uma lista contendo 12 fatores previamente identificados como relevantes na literatura científica (Gaff et al., 2016; Wu et al., 2022).

Tabela 1 – Fatores apresentados na consulta aos especialistas

Codificação	Fatores	Codificação	Fatores
x_1	Espécie	x_7	Inclinação da fibra
x_2	Densidade da madeira	x_8	Pressão de curvado
x_3	Modulo de elasticidade	x_9	Tempo de pressão
x_4	Largura dos aneis de crescimento	x_{10}	Temperatura de amolecimento
x_5	Presença de lenho juvenil/lenho	x_{11}	Espessura da madeira utilizada
x_6	Presença de nó	x_{12}	Umidade da madeira

Cada especialista atribuiu valores ordinais variando de 1 a 12 para os fatores analisados, considerando que o valor 1 representava maior influência no processo de vergamento e o valor 12 a menor influência. Para avaliar o nível de concordância entre os especialistas, foi calculado o Coeficiente de Concordância de Kendall (W) por meio da Prova de Friedman, utilizando o software Minitab versão 19.

A Prova de Friedman foi aplicada considerando:

Tratamento = variáveis analisadas;

Bloco = especialistas.

O coeficiente de concordância de Kendall foi obtido utilizando a Equação 1.

$$W=\frac{\chi 2}{n(k-1)}$$

Em que: W= coeficiente de concordância de Kendall; χ2 = valor do chi-quadrado obtido pela Prova de Friedman; n= número de especialistas; k= número de variáveis analisadas.

1.2.2 Procedimentos estatísticos

Para examinar os fatores associados ao processo de vergamento da madeira, foram utilizados três procedimentos estatísticos complementares. Inicialmente, aplicaram-se estatísticos descritivos com o objetivo de sintetizar a tendência central, dispersão e posição relativa das variáveis analisadas.

Em seguida, realizou-se análise de agrupamento hierárquico utilizando a distância do coeficiente de correlação e o método de ligação de Ward, visando identificar padrões de similaridade entre as variáveis, conforme metodologia descrita por Riboli e Lindino (2023).

Por fim, foi conduzida a Análise de Componentes Principais (ACP), com o objetivo de reduzir a dimensionalidade dos dados e destacar as principais direções de variabilidade das informações analisadas, seguindo a metodologia proposta por Becker et al. (2024). Os resultados foram apresentados por meio de tabelas, dendrogramas e gráficos dos componentes principais; segundo o fluxograma de etapas metodológicas planejadas.

3. Resultados e discussão

2.1 Estatísticos descritivos

A partir dos resultados dos estatísticos descritivos obtidos para as variáveis analisadas (Tabela 2), e considerando a escala adotada no estudo, na qual o valor 1 representa maior influência e o valor 12 menor influência, foi possível identificar os fatores de maior impacto no processo de vergamento da madeira.

Tabela 2 – Estatísticos descritivos das variáveis analisadas

Variável	N	Média	Erro padrão	Desvio padrão

Espécie	12	2,167	0,322	1,115
Densidade da madeira	12	1,833	0,271	0,937
Módulo de elasticidade	12	4,500	0,337	1,168
Largura dos anéis de crescimento	12	7,33	1,12	3,87
Presença de lenho juvenil/adulto	12	5,083	0,336	1,165
Presença de nó	12	8,500	0,557	1,931
Inclinação da fibra	12	8,250	0,592	2,050
Pressão de curvatura	12	9,417	0,679	2,353
Tempo de pressão	12	10,083	0,452	1,564
Temperatura de amolecimento	12	8,250	0,392	1,357
Espessura da madeira utilizada	12	5,917	0,723	2,503
Umidade da madeira	12	6,67	1,47	5,09

Observa-se que a variável densidade da madeira apresentou a menor média (1,833), indicando tratar-se do fator de maior influência no comportamento da madeira durante o processo de curvatura. Em seguida, destaca-se a variável espécie, com média de 2,167, evidenciando elevada relevância no processo de vergamento. Esses resultados sugerem que as propriedades intrínsecas do material desempenham papel fundamental na capacidade de deformação e produção de móveis curvados, uma vez que influenciam diretamente características como resistência, rigidez e comportamento estrutural da madeira, concordando com os resultados apresentados por Straže et al. (2023).

Por outro lado, variáveis como módulo de elasticidade (4,500), presença de lenho juvenil/adulto (5,083) e espessura da madeira utilizada (5,917) apresentaram valores médios intermediários, indicando influência moderada no processo. Essas variáveis estão relacionadas tanto às propriedades mecânicas quanto à estrutura anatômica da madeira, contribuindo de forma significativa, porém não predominante.

A variável umidade da madeira, com média de 6,670, apresentou influência intermediária; entretanto, seu elevado desvio padrão (5,090) indica alta variabilidade nas respostas, sugerindo que seu efeito pode variar consideravelmente de acordo com as condições específicas do processo.

As variáveis largura dos anéis de crescimento (7,330), presença de nó (8,500), inclinação da fibra (8,250), temperatura de amolecimento (8,250), pressão de curvatura (9,417) e tempo de pressão (10,083) apresentaram maiores valores médios e, consequentemente, menor influência relativa no vergamento da madeira segundo a percepção dos especialistas.

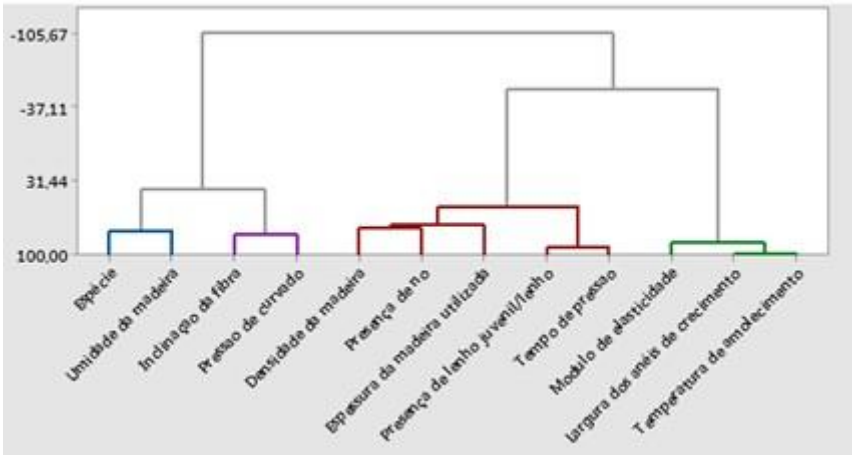
De forma geral, os resultados indicam que o vergamento da madeira é predominantemente influenciado pelas propriedades intrínsecas do material, especialmente densidade da madeira e espécie, enquanto variáveis relacionadas ao processo de curvatura exercem influência secundária. Esses achados reforçam a importância da seleção adequada da matéria-prima para otimizar o desempenho da madeira em aplicações que envolvem deformação por curvatura.

A concordância entre os especialistas foi avaliada por meio do coeficiente de concordância de Kendall (W), calculado a partir da prova de Friedman no software Minitab versão 19. O valor obtido foi W = 0,553, indicando nível de concordância moderado a alto entre os avaliadores. A significância estatística foi confirmada (χ^2 = 73,01; gl = 11; p < 0,001), evidenciando concordância entre os especialistas na avaliação das variáveis analisadas.

2.2 Análise de agrupamento hierárquico

A partir do dendrograma obtido (Figura 2), gerado no software Minitab versão 19, foi possível observar a formação de grupos de variáveis com comportamentos semelhantes. Considerando um ponto de corte em torno de 50% a 55% de similaridade, identificaram-se quatro conglomerados principais, refletindo diferentes níveis de influência e inter-relação entre as variáveis analisadas.

Sim



Variáveis

Figura 2 – Dendrograma das variáveis.

A análise de agrupamento hierárquico foi realizada com base na distância do coeficiente de correlação, utilizando o método de ligação de Ward, com o objetivo de identificar padrões de similaridade entre as variáveis que influenciam o processo de vergamento da madeira.

O Conglomerado 1, composto pelas variáveis espécie e umidade da madeira, apresentou elevada similaridade interna e posicionou-se relativamente isolado em relação aos demais grupos. Esse comportamento indica que tais variáveis possuem padrão de resposta semelhante e

exercem forte influência no processo de vergamento, sendo consideradas fatores determinantes segundo a percepção dos especialistas. O Conglomerado 2 reuniu as variáveis densidade da madeira, presença de lenho juvenil/adulto, presença de nó, tempo de pressão e espessura da madeira utilizada. Esse grupo representa um conjunto de fatores de influência intermediária, associados tanto às propriedades físicas quanto às condições de processamento, evidenciando interação significativa entre características do material e parâmetros operacionais. O Conglomerado 3 foi formado pelas variáveis módulo de elasticidade, largura dos anéis de crescimento e temperatura de amolecimento, indicando comportamento semelhante entre si, porém com menor influência relativa quando comparadas aos grupos anteriores. Essas variáveis estão relacionadas principalmente às propriedades mecânicas e estruturais da madeira.

Por fim, o Conglomerado 4, composto por inclinação da fibra e pressão de curvatura, sugere associação entre variáveis diretamente ligadas ao processo mecânico de curvatura, apresentando influência mais específica e menos dominante no contexto geral do vergamento.

Considerando a escala adotada no estudo, na qual valores mais baixos indicam maior influência, e analisando a proximidade das variáveis no dendrograma, pode-se inferir que espécie e umidade da madeira configuram-se como fatores de elevada relevância no processo de vergamento.

Esse resultado é reforçado pelo fato de ambas formarem agrupamento distinto e altamente coeso, indicando expressivo consenso entre os especialistas quanto à sua importância.

De maneira geral, a análise de agrupamento evidenciou que o comportamento do vergamento da madeira resulta da interação entre diferentes grupos de variáveis, sendo as propriedades intrínsecas do material, especialmente espécie e umidade, os fatores mais determinantes.

Em contraste, variáveis relacionadas ao processo de curvatura e a características mecânicas específicas apresentaram influência secundária ou intermediária, atuando de forma complementar no fenômeno analisado.

2.3 Análise de Componentes Principais (ACP)

A Análise de Componentes Principais (ACP) foi aplicada com o objetivo de reduzir a dimensionalidade do conjunto de dados e identificar as principais direções de variabilidade associadas ao processo de vergamento da madeira, considerando os valores próprios e a variância explicada apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 – Valores próprios e variância explicada

Componente	Valor próprio	Proporção	Acumulada

CP1	4,9109	0,409	0,409
CP2	4,1826	0,349	0,758
CP3	1,3613	0,113	0,871
CP4	0,8543	0,071	0,942
CP5	0,4492	0,037	0,980
CP6	0,1424	0,012	0,992
CP7	0,0529	0,004	0,996
CP8	0,0453	0,004	1,000
CP9	0,0011	0,000	1,000
CP10	0,0000	0,000	1,000
CP11	-0,0000	-0,000	1,000
CP12	-0,0000	-0,000	1,000

Considerando que o estudo envolve 12 variáveis, a soma dos valores próprios é aproximadamente igual a 12, confirmando a consistência da análise. O primeiro componente principal (CP1) representou 40,9% da variância total, enquanto o segundo componente principal (CP2) explicou 34,9%. O terceiro componente principal (CP3) apresentou contribuição de 11,3%. De forma acumulada, os dois primeiros componentes principais explicaram 75,8% da variabilidade total dos dados, indicando que a maior parte da informação pode ser adequadamente representada em um plano bidimensional. Becker et al. (2024), relatam que os dois primeiros componentes devem explicar, no mínimo, 70% da variância total para adequada interpretação multivariada. Dessa forma, os resultados obtidos corroboram a existência de interação significativa entre as variáveis analisadas.

A interpretação dos componentes foi realizada com base nas cargas fatoriais, considerando os maiores valores absolutos como indicativos de maior contribuição das variáveis. O Componente Principal 1 (CP1) foi fortemente influenciado por variáveis relacionadas às propriedades físicas e mecânicas da madeira, destacando-se módulo de elasticidade (0,420), largura dos anéis de crescimento (0,377), temperatura de amolecimento (0,363) e densidade da madeira (0,284).

Além disso, as variáveis pressão de curvatura (-0,421) e inclinação da fibra (-0,312) apresentaram contribuições relevantes com sinal negativo, indicando relação inversa. Dessa forma, o CP1 pode ser interpretado como um eixo relacionado ao comportamento estrutural e mecânico da madeira durante o processo de vergamento. O Componente Principal 2 (CP2) esteve associado principalmente às condições de processamento e às características anatômicas da madeira, destacando-se tempo de pressão (0,464), presença de lenho juvenil/adulto (0,445) e densidade da madeira (0,340). Por outro lado, as variáveis espécie (-0,356) e umidade da madeira (-0,314) apresentaram comportamento oposto dentro desse componente. Assim, o CP2 pode ser interpretado como um eixo relacionado às condições operacionais do processo e às características intrínsecas da madeira.

Embora apresente menor contribuição para a variância total, o Componente Principal 3 (CP3), com 11,3%, evidenciou influência de variáveis específicas, como presença de nó (0,498), espessura da madeira utilizada (0,414) e inclinação da fibra (-0,480). Esse componente esteve associado a características estruturais particulares e defeitos da madeira, desempenhando papel secundário na explicação global do fenômeno.

4. Conclusões

Os resultados obtidos permitiram identificar os principais fatores que influenciam o processo de vergamento da madeira para aplicação na produção de móveis. Entre as variáveis analisadas, densidade da madeira, espécie e umidade apresentaram maior influência no comportamento do material durante a curvatura.

As análises estatísticas demonstraram que as propriedades intrínsecas da madeira exercem influência predominante no processo de vergamento, enquanto os parâmetros operacionais atuam de forma complementar.

Conclui-se que a adequada seleção da matéria-prima é fundamental para otimizar a qualidade, estabilidade e desempenho da madeira submetida ao processo de curvatura.

5. Referências bibliográficas

BECKER, I., BRITTO, G. C. S., NASCIMENTO, E., & FARIA, R., 2024. Análise de componentes principais e de cluster como ferramenta para avaliar a qualidade de sobremesa láctea. Revista PesquisAgro, 8 (1) 4-19. DOI: 10.33912/AGRO.2596-0644.2024.v8.nX1. p.4-19.id875

CRUZ, D., VIERA, D., & ALVAREZ, D. 2025. Comportamiento mecánico de cinco especies no tradicionales para producción de muebles a partir de piezas conformadas: Relación con

parámetros de encolado (viscosidad y consumo). Revista Cubana de Ciencias Forestales, 13 (2) e916. https://cfores.upr.edu.cu/index.php/cfores/article/view/916

GAFF, M., VOKATY, V., BABIAK, M., & BAL., B. C. 2016. Coefficient of wood bendability as a function of selected factors. Construction and Building Materials 126, 632–640. http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.09.085

GRYTSAK, S. S. 2024. Study of the technological process of bending ash wood. Forestry, Forest, Paper and Woodworking Industry, 50, 52-64. https://doi.org/10.36930/42245005

https://www.google.com/search?q=Moveis+de+pe%C3%A7as+curvadas+de+madeira+&sca_esv=Moveis de Peças vergadas.

RIBOLI, S. A., LINDINO, C. A. 2023. Análise exploratória (PCA e HCA) no monitoramento e rastreabilidade de fontes de água urbana. Tecnia, 8 (2), 141-157. https://periodicos.ifg.edu.br/tecnia/article/view/577/782

STRAŽE, A.; ŽIGON, J.; PERVAN, S.; MIKŠIK, M.; PREKRAT, S. 2023. The Influence of Processing Conditions on the Quality of Bent Solid Wood from European Oak. Forests 2023, 14, 1047. https://doi.org/10.3390/f14051047

WU, Y., ZHU, J., QI, Q., & CUI, L. 2022. Research progress of solid wood bending softening technology. review. Wood research 67 (6), 1056-1073. doi.org/10.37763/wr.1336-4561/67.6.10561073.

PRODUTOS MADEIREIROS & DERIVADOS

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

ANÁLISE DOS RENDIMENTOS DE MADEIRA SERRADA EM DIFERENTES SERRARIAS DE PINAR DEL RIO, CUBA
ANALYSIS OF SAWN TIMBER YIELDS IN DIFFERENT SAWMILLS OF PINAR DEL RIO, CUBA

Daniel Alberto Alvarez Lazo[1], Ayessa Leckoundzou[2], Andrade Fernando Egas[3]. Ignacio Estévez Valdés[4], Osvaldo Fosado Téllez[5], Djeison Cesar Batista[6], Juarez Benigno Paes[6]. Rinaldo Caraciolo Ferreira[7].

[1]Universidade de Pinar del Rio, Cuba; [2] Universidade Mariem NGuabi, Congo; [3]Universidade Eduardo Mondlane, Moçambique; [4] Universidade Estatal do Sul de Manabi, Equador; [5] Universidade Técnica de Manabí, Equador; [6] Universidade Federal de Espirito Santos. Brasil; [7] Universidade Federal Rural de Pernambuco, Brasil.

Tema: Produtos Madeireiros: Painéis, produtos engenheirados, madeira preservada, móveis e pisos

Resumo

O objetivo deste trabalho está relacionado ao desenvolvimento de procedimentos matemáticos que possibilitem aumentar o rendimento e qualidade da madeira serrada de Pinus caribaea Morelet var. caribaea Barret & Golfari em diferentes serrarias de Pinar del Rio, Cuba, entre 2015 e 2025. As toras en cada serraria foram selecionadas para a determinação de seus principais defeitos. Determinam-se os rendimentos de madeira serrada das diferentes serrarias.Os principais aspectos que definem a qualidade do processo de desdobro foram determinados por meio de controle estatístico de processo. Os modelos matemáticos são utilizados como ferramenta de trabalho para desenvolver procedimentos que permitam aumentar o rendimento da madeira serrada. O primeiro corte de abertura é definido e, com o recurso à modelação matemática, é possível aumentar o rendimento da madeira serrada em todas as serrarias em estudo acima do 60 %. O controlo estatístico do desdobro das toras demonstra que o processo está fora de controlo em todas as serrarías envolvidas nesta investigação.

Palavras-chave: pinus, processamento, qualidade

ANALYSIS OF SAWN TIMBER YIELDS IN DIFFERENT SAWMILLS OF PINAR DEL RIO, CUBA

Abstract

The objective of this work is related to the development of mathematical procedures that make it possible to increase the yield and quality of sawn timber of *Pinus caribaea* Morelet var. *caribaea* Barret & Golfari in different sawmills in Pinar del Rio, Cuba, between 2015 and 2025. Logs in each sawmill were selected to determine their main defects. The sawn timber yields of the different sawmills were determined. The main aspects that define the quality of the sawing process were determined through statistical process control. Mathematical models are used as a working tool to develop procedures that allow increasing the yield of sawn timber. The first opening cut is defined and, using mathematical modeling, it is possible to increase the sawn timber yield in all sawmills studied by more than 60%. The statistical control of log sawing demonstrates that the process is out of control in all sawmills involved in this investigation.

Keywords: pinus, processing, quality

Introdução

A necessidade urgente de tomar decisões adequadas em serrações e quantificar o impacto dessas decisões são indicadores da importância da aplicação de métodos de gestão na administração da produção florestal (Alvarez et al. 2020). Alguns estudos mostram que os níveis de utilização de matéria-prima em serrações estão correlacionados com diferentes características da toro, como o diâmetro e a conicidade (Leckoundzou et al. 2024).

A análise abrangente de toda esta informação deverá contribuir de alguma forma para o desenvolvimento de estratégias que permitam neutralizar o efeito negativo ou favorecer o efeito positivo dos fatores que mais influenciam o rendimento volumétrico, condição necessária para elevar os níveis de utilização de matéria-prima e a eficiência industrial em geral (Alagbada, 2021; Balasso et al., 2022). Assim, as pressões adicionais trazidas pelo aumento constante da procura de produtos lenhosos e não lenhosos levaram o Ministério da Agricultura de Cuba a estender o processo de melhoria do negócio às empresas florestais cubanas, que inclui entre os seus principais objetivos a redução de custos e o aumento da produtividade e da produção (Martínez et al., 2024).

Atingir estes objetivos passa necessariamente pela aplicação do controlo estatístico do processo de serradura, sabendo que a qualidade dos toros, dependendo da quantidade e magnitude dos defeitos, tem uma influência marcada no rendimento e na qualidade da madeira serrada (Roscon et al. 2023). Como as matérias-primas representam normalmente mais de 80% dos custos de produção numa serração, é necessário reduzir o desperdício (Torrecillas et al. 2020); assim sendo, o controlo estatístico do processo de serradura é fundamental para maximizar a qualidade, o desempenho e a produtividade, uma vez que uma pequena redução na espessura da serra pode gerar poupanças substanciais na utilização de matérias-primas (Viera et al. 2025).

O objetivo deste trabalho está relacionado ao desenvolvimento de procedimentos matemáticos que possibilitem aumentar o rendimento e qualidade da madeira serrada de Pinus caribaea Morelet var. caribaea Barret & Golfari em diferentes serrarias de Pinar del Rio, Cuba, entre 2015 e 2025

METODOLOGIA UTILIZADA

Este trabalho é realizado nas serrações Isabel Rubio e Combate de la Teneria de Guane, Isabel Rubio (Empresa Agroflorestal Macurije); Albaro Barba (Empresa Agroflorestal Pinar del Rio; Serrações Rigo Fuentes, La Jagua e La Baria (Empresa Agroflorestal La Palma). A Empresa Agroflorestal Macurije tem coordenadas geográficas de 22º 06’ a 22º 42’ de latitude norte e 83º

48’ a 84º 23’ de longitude oeste na região mais ocidental da província de Pinar del Río, Cuba. (Guera et al., 2020); abrangendo partes dos territórios dos municípios de Guane e Mântua (Valdes et al., 2021). A Empresa Agroflorestal La Palma tem coordenadas geográficas de 22°45’ de latitude norte e 83°31’ de longitude oeste (Sánchez et al., 2025). A Empresa Agroflorestal Pinar del Rio tem coordenadas geograficas de 22º24´de latitude norte e 83°41' de longitude oeste. (Rojas et al., 2023)

Determinação do Tamanho da Amostra

Nas serraria em estudo, uma amostra aleatória de 100 toros da espécie Pinus caribaea Morelet var. Barret e Golfari foi retirada de povoamentos naturais para determinar o número de unidades representativas para o estudo, utilizando o diâmetro na base dos toros como variável de interesse. A seguinte equação, apresentada por Chacko (1965) e citada por Alvarez et al. (2020), foi utilizada para este efeito:

$$n=\frac{t_{\alpha}^{2}*S^{2}}{E^{2}}(1)$$

Em que: n – tamanho da amostra; t_{α}^{2} - valor tabelado de t com (n-1) graus de liberdade; S^2- variância estimada; E^2- erro admissível.

Determinação de defeitos nas toras

O rendimento de maderira serrada das toras é fortemente influenciado pela presença de defeitos, que variam em tipo, localização e magnitude. Vários estudos têm destacado que tanto os defeitos internos como os externos afetam significativamente não só o volume de madeira utilizável, mas também a qualidade e o valor dos produtos finais (Cataldo et al., 2025).

a) Conicidade

Para determinar a Conicidade, utiliza-se a equação apresentada por Alvarez et al., (2020):

$$Conicidade=\frac{D_b-D_t}{C}*100(2)$$

Onde: Conicidade, cm/m; Db – diâmetro maior da tora, cm; Dt – diâmetro menor da tora, cm; C- comprimento da tora, m.

b) Excentricidade

Para determinar a excentricidade da medula, o centro geométrico foi localizado na secção transversal final de cada tronco e a distância da medula ao centro da mesma secção transversal foi medida e utilizada a seguinte equação (Alvarez et al., 2020):

$$E_{cc}=\left(\frac{L_c}{dm}\right)*100 \qquad (3)$$

Onde: Ecc - excentricidade, Lc - distância entre o centro geométrico e a posição real da medula na tora, m; dm - diâmetro médio da tora, m.

c) Ovalidade

$$\text{Ovalidade} = \frac{d}{D}.100 \quad (4)$$

Em que: Ovalidade, %; d: menor diâmetro da tora, cm; D: maior diâmetro da tora, cm.

Rendimento da madeira serrada

Para obter o rendimento da madeira serrada foi utilizada a seguinte relação (Leckoundzou et al., 2024 e Roscon et al. 2024):

(5)

Em que: R_v - rendimento da madeira serrada, %; Vma - Volume de madeira serrada, m³; Vt - Volume das toras serradas, m³

O volume total de madeira serrada em cada tora nas serrarias é determinado com base em medições lineares obtidas a partir da madeira serrada, de acordo com as seguintes expressões:

(6)

Em que: Vma - volume de madeira serrada numa tora, m^3; ai, gi, li - largura, espessura e comprimento da peça i obtida a partir de uma tora ou grupo de toras; n - número de peças serradas numa tora.

Determinação da variação de desdobro

Para a amostragem, foram utilizadas 100 peças serradas de Pinus caribaea Morelet var. caribaea Barret & Golfari, selecionadas aleatoriamente em cada uma das serrarias em estudo localizadas na província de Pinar del Rio. O processo demora 10 dias úteis em tempo real, medindo-se 10 peças por dia, de acordo com a metodologia proposta por Brown (2000) e Torrecillas (2020). A amostragem é realizada antes de qualquer processo de plaineado, coincidindo com a metodologia proposta por Thomas e Buehlmann (2023) e Viera et al. (2025). Foram feitas seis medições em cada peça de madeira serrada, três em cada bordo, equidistantes ao longo do seu comprimento. Teve-se o cuidado de estabelecer uma sequência consistente de medições em relação à direção de saída das peças da serra, de forma a identificar quaisquer potenciais problemas no equipamento. Assim sendo, foi utilizado o programa CONTROL versão 5.1 (Alvarez et al. 2020), que permite determinar as dimensões ótimas de corte, bem como a variação da espessura, com base na formulação proposta por Leckoundzou et al. (2024) e Viera et al. (2025), que se encontra descrita abaixo:

$$D_0 = \frac{DF + TC}{(1 - \%C)} + Z \cdot St \qquad (7)$$

Em que: Dimensão de corte ideal da madeira verde, mm; *DF*: Dimensão final, mm; *TC*: Tolerância de planeado, mm; *DF*: Dimensão final, mm; %*C*: Tolerância de retração da madeira. O valor da retração tangencial é utilizado. *Z*: Fator de dimensão mínimo aceitável.

DF = 13 mm, 25 mm: TC =0; C tangencial = 4,30 (Se emplea o valor da contração tangencial da madeira de Pinus caribaea Morelet var. Caribaea tendo em consideração os resultados obtidos por Ibáñez (1975), Z = 5 %.

Este modelo permite a compensação das perdas dimensionais devido à contração e ao processamento, garantindo que a madeira verde é cortada em dimensões que, após a secagem e aplainamento, cumpram as especificações finais. Para calcular a variação total de serradura é muito importante utilizar a seguinte equação matemática (Viera et al., 2025):

$$St = \sqrt{\overline{Sd}^2 + Se^2} \qquad (8)$$

Em que: *St*: Variação total de desdobro, mm; *Sd*: Desvio padrão do processo de desdobro em cada peça, mm; *Sd*: Média aritmética do desvio padrão do processo de desdobro em cada peça, mm; *Se*: Desvio padrão do processo de desdobro entre as peças, mm

$$Se = S^2(\overline{x}) \qquad (9)$$

$S^2(\overline{x})$ - Repressenta a variância das médias das espessuras de cada peça amostrada.

A partir dos trabalhos desenvolvidos por Torrecillas et al., (2020); coincidindo com Leyva et al., (2020) e Rascón et al., (2023), se constroem gráficos de controle de qualidade da meia, segundo os limites de controle superior e inferior para definir assim sim o processo de desdobro está acima ou abaixo do controle. Para isso, são utilizadas as seguintes equações suportadas no programa CONTROL:

$$LSC = \acute{X} + A_2 \overline{R}\, LC = \acute{X}\, LIC = \acute{X} - A_2 \overline{R} \qquad (10)$$

Em que: LCS- Limite de controle superior; LCI-Limite de controle inferior; $\overline{\overline{x}}$ – Meia total da espessura da peça serrada; A_2- Fator para determinar os limites de controle $\acute{X}$; $\overline{R}$- Intervalo ou amplitude promedio de la mostra (diferença entre o valor maior e menor das seis medidas na espessura de cada peça serrada.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Análise da qualidade das toras em diferentes serrarías em Pinar del Río durante o processo de conversão primaria, os defeitos dos toros têm um impacto muito significativo no rendimento e na qualidade da madeira serrada. As toras com formatos mais cilíndricos e retos são as mais desejáveis para o processamento mecânico, resultando em maiores rendimentos de madeira

serrada (Aguiar et al., 2022). Os defeitos investigados foram observados na Tabela 1, o que possibilita fazer uma analise da qualidade das toras nas serraria en estudo.

Tabela 1. Determinação da magnitude dos defeitos das toras.

Defeitos	SCTG	SIR	SRF	SAB	SLB	SLJ
Excentricidade, %	6,75	6,80	7,88	9,42	8,24	8,16
Conicidade, cm/m	1,44	1,49	1,93	1,76	1,40	1,32
Ovalidade,%	1,22	1,23	1,31	1,34	1,19	1,19

SCTG- Serraría Combate de la teneria de Guane; SIR- Serraría Isabel Rubio; SRF- Serraría Rigo Fuentes; SAB- Serraría Albaro Barba; SLB- Serraría la Baria; SLJ- Serraría La Jagua.

A classificação das toras de Pinus caribaea Morelet var. Caribaea Barret e Golfari, tendo em conta a norma cubana de classificação de coníferas NRGA (2007), é de Classe A. As toras com menor número de defeitos foram obtidas nas serrarias La Jagua e La Baria, pertencentes à empresa agroflorestal La Palma. Isto sugere que estas serrarias produzirão os maiores rendimentos de madeira serrada, em linha com os resultados obtidos por Leckoundzou et al. (2024) e Cataldo et al. (2025).

Determinação do Rendimento da Madeira Serrada

Os níveis de rendimento da madeira serrada nas serrações estudadas são baixos, o que implica uma baixa utilização da madeira como matéria-prima. Tabela 2. Estes resultados são inferiores aos obtidos por Ambriz et al. (2018) para o Pinus spp., que obtiveram um rendimento de madeira serrada de 62,80%.

Tabela 2. Rendimento de madeira serrada para as diferentes serrações analisadas

Serraría	Tempo Real
	Rendimento de madeira serrada, %
Rigo Fuentes (EAF La Palma)	45,20
Albaro Barba (EAF Pinar del Río)	43,50
Isabel Rubio (EAF Macurije)	50,05
Combate de la Tenería de Guane (EAF Macurije)	51,30
La Varia (EAF La Palma)	53,25
La Jagua (EAF La Palma)	54,68

Para aumentar os rendimentos da madeira serrada é utilizado um procedimento matemático baseado no Cálculo Diferencial e na Geometria Descritiva que permite obter a seguinte expressão matemática que define a melhor dimensão do primeiro corte de abertura nas troças durante o desdobro, coincidiendo com os criterios desenvolvidos por Wieruszwski et al., (2021):

$y = 0.9r$ (11)

Em que r- representa o raio da seção transversal da tora, cm

Por outro lado, a aplicação do seguinte modelo de programação matemática, tendo em conta a selecção óptima dos esquemas de deadobro, permitirá aumentar os volumes de madeira serrada a partir da matéria-prima disponível.

Função Objetivo:

Min¿ (12)

Em que

Índices: i: Tipo de diagrama de serradura; j: Número de máquinas; k: Classificação dimensional da tora; l: Número total de diagramas de desdobro; J: Número total de máquinas disponíveis; K: Número de classificações dimensionais a processar; L: Número total de sortimentos possíveis.

Variáveis: x_{ij}: toras serradas para o diagrama de desdobro i na máquina j; S_l: Variável auxiliar associada ao não cumprimento do plano de produção para o sortido l devido à falta de tempo (m3); Y_{ij}: Variável binária associada à execução do diagrama de serradura i na máquina j.

Parâmetros: D: Indicador a minimizar na função objetivo; β_l: Penalização por incumprimento do plano de produção para o sortido l; di: Desperdício obtido ao executar um diagrama de corte do tipo i (m^3); δ_k: Penalização por não possuir matéria-prima do tipo k; ω_{ij}: Metros cúbicos (m^3) de madeira que não são processados com o diagrama de corte i na máquina j devido a uma alteração no diagrama de corte.

A aplicação dos procedimentos acima desenvolvidos demonstra um aumento significativo dos rendimentos de madeira serrada nos diferentes estabelecimentos, comprovando que a aplicação de modelos matemáticos é uma ferramenta eficaz para a melhoria dos indicadores de produção. Tabela 3.

Analisando a Tabela 3, ao aplicar os procedimentos propostos, os rendimentos de madeira serrada aumentam 6,26% na serração de Rigo Fuentes e 18,00% na serraría Albaro Barba; com valores acima dos 60%, que são resultados superiores aos obtidos por Roscon et al., (2023), para o Pinus durangensis e muito próximos dos obtidos por Ambriz et al., (2018).

Tabela 3. Valores médios de diferentes indicadores de rendimento de madeira serrada (%) obtidos em diferentes serrações

Serrarías	Tempo Real	Variante proposta
	Rendimento de madeira serrada, %	Rendimento de madeira serrada, %
Rigo Fuentes (EAF La Palma)	54,68	61,94
Albaro Barba (EAF Pinar del Río)	43,50	61,80
Isabel Rubio (EAF Macurije)	50,05	60,18
Combate de la Tenería de Guane (EAF Macurije)	53,50	60,50
La Varia (EAF La Palma)	51,30	60,22
La Jagua (EAF La Palma)	53,25	61,40

Aplicação do Controlo estatístico do processo de desdobro

Com base na implementação de uma estratégia para o controle estatístico de dimensões em serrarias na província de Pinar del Río, observa-se um sobredimensionamento generalizado da madeira serrada. De acordo com os valores médios de espessura das peças amostradas, nenhum sortimento de madeira verde cortada apresenta tolerâncias volumétricas suficientes para atender às dimensões finais regulamentadas para o mercado em relação à dimensão ótima (Tabela 4). Resultados semelhantes foram obtidos por Viera el et al., (2025)

Tabela 4. Cálculo do controlo dimensional da madeira serrada com o Controlo Estatístico de Processo.

Serrarías	Dimensão ótima, mm	Dimensão final, mm	Variaçao total do processo
Albaro Barba, Pinar del Río	16,81	13,00	1,96
Combate de la tenería de Guane, Pinar del Río	26,30	25,00	0,04
Rigo Fuentes	16,70	13,00	1,89
La Baria	25,73	25,00	0,77

La Jagua	25,99	25,00	0,20

Durante a análise da variação de desdobro, observa-se que todas as serrarias estão fora de controle, com valores que não coincidem com as demandas do consumidor e que também afetam o rendimento e a qualidade da madeira serrada produzida. A Figura 1 mostra como exemplo os resultados da variação de desdobro na serraria Conbate da teneria de Guane na Empresa Agroflorestal Macurije.

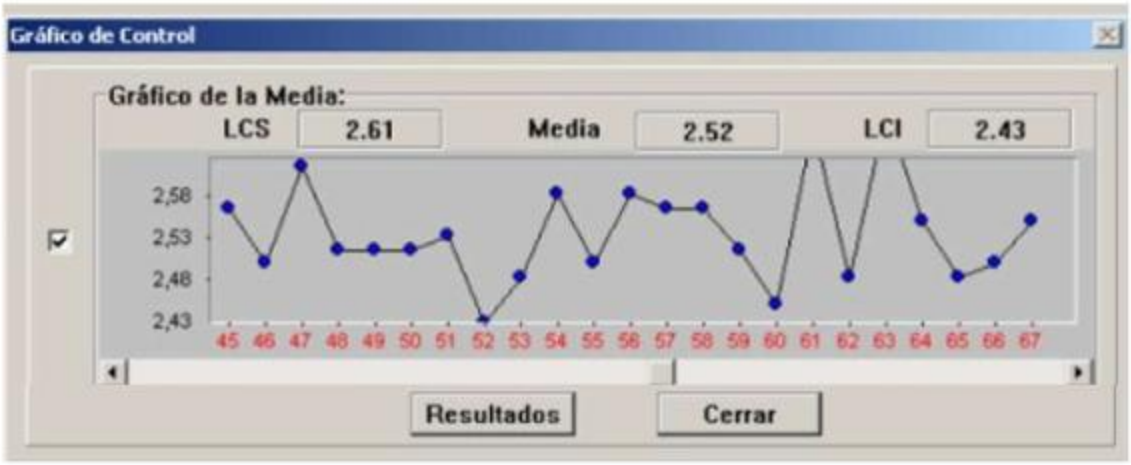


Figura 1. Variação de desdobro na serraria Conbate da teneria de Guane na Empresa Agroflorestal Macurije.

A variação na espessura das peças deve-se não apenas aos desvios excessivos da serra em relação à sua trajetória normal, mas também ao desalinhamento dos esquadros do carro. Isso resulta em todas as peças internas (peças mais próximas dos esquadros do carro) apresentando um defeito perceptível em forma de cunha em uma direção, enquanto as peças externas (peças mais distantes dos esquadros do carro) ficam livres ou são afetadas aleatoriamente por esse defeito em uma ou outra direção.

A variação de espessura observada entre as peças também se deve a imprecisões cometidas pelo operador da serra, que frequentemente projeta padrões de corte que tendem a subestimar ou superestimar as peças internas.

O controle estatístico do processo de desdobro demonstra que o processo está fora de controle e, portanto, é necessário analisar a qualidade da matéria-prima, das máquinas utilizadas e a habilidade do operador. Aspectos-chave para alcançar maior eficiência na indústria florestal,

onde o uso de modelos matemáticos são ferramentas muito valiosas em serrarias. Resultados similares foram obtidos por Alvarez et al., (2026).

CONCLUSÕES

A classificação das toras de Pinus caribaea Morelet var. Caribaea Barret e Golfari, tendo em conta a norma cubana de classificação de coníferas NRGA (2007), é de Classe A

O desenvolvimento de um procedimento matemático para definir o primeiro corte de abertura e a implementação do modelo de programação matemática para otimizar a seleção dos padrões de serradura possibilitam um aumento significativo do rendimento da madeira serrada de Pinus caribaea Morelet var. Morelet barret & Golfari em todas as serrarías.

O controlo estatístico do desdobro das toras demonstra que o processo está fora de controlo em todas as serrarías envolvidas nesta investigação. Assim sendo, é necessário analisar a qualidade da matéria-prima, das máquinas utilizadas e a habilidade do operador.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

Alagbada, O. R. (2024). Lumber recovery efficiency of some selected sawmills in Ishiagu, Ebonyi State, Nigeria. Journal of Research in Forestry, Wildlife & Environment, 13(4) 101-108, 2021.

Alvarez, D., Sebastiao, F. N., Buenga, F. N., & Silva. S. (2020). Quality analysis of tropical wood sawing in Cabinda, Angola. Revista Cubana de Ciencias Forestales, 8(1)34-53. http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2310-34692020000100034

Aguiar, D. R., Lima, A. J. N., Santos, J., & Higuchi, N. (2022). Rendimento de madeira serrada para espécies comerciais manejadas na Amazônia central. Natural Resources, 12 (2) 86-95. http://doi.org/10.6008/CBPC2237-9290.2022.002.0009

Ambriz, E., Andrade, M. Y., & Sosa, E. M. (2028). Rendimiento volumétrico e importância del control de calidad de madera aserrada de *Pinus* spp. TecnoCiencia, 2(1)37-41. https://doi.org/10.54167/tch.v12i1.132

Balasso, M., Hunt, M., Jacobs, A., & O´Reilly, J. (2022). Quality traits of plantation *Eucalyptus nitens* logs impacting volume and value recovery of structural sawn boards. European Journal of Wood and Wood Products, 80 (80)657-668. https://doi.org/10.1007/s00107-022-01790-x

Brown, T. D. (2000). Lumber Size Control, Part 1: Measurement Methods. Oregon State University, Extension Service. Corvallis, OR, USA. 11 p.

Cataldo, M. F., Mammoliti, A., Papanorea, S. F., &Proto, A. R. (2025). Sawing yield estimation of defective logs in Olea europaea L., Robinia pseudoacacia L., and Castanea sativa Mill. species growing in Southern Italy. Annals of Forest Science 82:36. https://doi.org/10.1186/s13595-025-01305-7

Chacko, V. J. (1965). Manual on sampling techniques for forest surveys. Publisher Management of Publication, Delhi, 172 p. https://www.worldcat.org/title/manual-on-sampling-techniques-for-forestsurveys/oclc/679920637

Https://www.ebay.com/help/policies/member-behaviour-policies/user-privacy-notice-privacy-policy?id=4260. Recuperado el 23/02/2026

Guera, O. G. M., Silva, J. A. A., Ferreira, R. L., Alvarez, D., Barrero, H., & Diaz, A. (2020). Enfoque multivariado en experimentos de extracción de madera en plantaciones forestales. Madera y Bosques, 26(2) e2621934. http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=61763413010

Ibáñez, A. (1975). Informe sobre nueve espécies maderables cubanas. Instituto de Investigaciones Forestales. Ministerio de la Agricultura. Ciudad Habana. Cuba. 55 pp.

Leckoundzou, A., Alvarez, D., Martinez, Y., Rojas, Y., & Espinosa, M. A. (2024). Predição do rendimento de madeira serrada de Pinus caribaea Morelet var. caribaea Barret & Golfari Pinar del Río, Cuba. Revista Cubana de Ciencias Forestales, 12 (1) e805. https://cfores.upr.edu.cu/index.php/cfores/article/view/805

Leyva, I., Alvarez, D., La O, Y., Céspedes, G., & Segurado**,** Y. (2000). Rendimiento y calidad dimensional de la madera aserrada de *Samanea saman Jacq*. en el Aserradero de la Empresa Agroforestal Guantánamo. Revista Cubana de Ciencias Forestales, v. 8, n. 3, p. 507-518. http://cfores.upr.edu.cu/index.php/cfores/article/view/579

Martínez, J. L., Alvarez, D., & Fernández, R. R. (2024). Evaluación del potencial de madera en pie en plantaciones de *Pinus Caribaea* en Cuba. Avances, 26(1)1-17. http://avances.pinar.cu/index.php/publicaciones/article/view/798

Ministerio de la Agricultura. (2007). Norma |Ramal. Clasificación de madera en bolo de especies coníferas de Cuba. Instituto de Investigaciones Forestales.

Roscon, J., Aguirre, O. A., Rodríguez, E. A., Jiménez, P. J., Treviño, E., Najera, J., & Iniguez, J. (2024). Contraste del rendimiento de aserrado e ingresos económicos en aserraderos tradicionales y modernos en el norte de México. Madera y Bosques, 30 (2) e3022580.

Sánchez, T., Urrutia, Y., Crespo, A. P., Zaldivar, A., Castillo, B. R., Hernández, I., Somarriba, E., Rizo, M., Alfaro, B., Delgado, M. C., & Suarez, J. L. (2025). Caracterización socio-productiva de los sistemas con cerdos que pastorean en el bosque Pinus caribaea-Quercus cubana A. Rich en la provincia de Pinar del Río (en línea). Turrialba, Costa Rica, CATIE. 50 p. (Serie técnica. Informe técnico / CATIE, no. 465). Disponible en https://repositorio.catie.ac.cr/handle/11554/13379

Thomas, E., Buehlamnn, U. (2023). Effect of Sawing Variation on Hardwood Lumber Recovery —Part II: Board Count. Forest Prod. J, 73(1)66-74. DOI: 10.13073/FPJ-D-22-00058

Torrecillas, C. A., Orozco, R., Nájera, J. A., Hernández, J. C., Hernández, F. J., Cruz, R., Corral, J. J., & Goche, J. R. (2020). Evaluación del refuerzo de asierre en madera seca y cepillada del ejido Pueblo Nuevo, Durango. Revista Mexicana de Ciencias Forestales, 11(57) enero-febrero. 2020. https://doi.org/10.29298/rmcf.v11i57.645

Valdes, R. H., Alvarez, D., & Fernandez, R. R. (2021). Análisis de la calidad superficial de diferentes maderas. Revista Avances, 23 (2)20-21. http://www.ciget.pinar.cu/ojs/index.php/publicaciones/article/view/612

Viera, D., Cruz, V., Alvarez, D., & Fuentes, O. (2025). Desarrollo de Varsaw: Un software para optimización dimensional en el aserrado. Revista Cubana de Ciencias Forestales, 13(2) e919. 2025. https://cfores.upr.edu.cu/index.php/cfores/article/view/919/1312

Wieruszwski, M., Mirski, R., Ttrociński, A., & Kawalerczyk, J. (2021). Effect of sawn zone on the quality of lumber in the evaluation of selected pine wood defects. Annals of Warsaw University of Life Sciences SGGW Forestry and Wood Technology, (114) 26-32. DOI:10.5604/01.3001.0015.2370

Zavala, D. (1991). Manual para el establecimiento de un sistema de control de la variación de refuerzo en madera aserrada. Texcoco, México. Serie de Apoyo Académico 44. Universidade Autónoma Chapingo

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Aplicabilidade e aceitação de painéis EGP produzidos com resíduos de madeiras tropicais

Josiane Fernandes Keffer[1]; Rosilani Trianoski[2]; [1]; Esoline Helena Cavalli Zamarian[3]; Adriano Reis Prazeres Mascarenhas[1]; Setsuo Iwakiri[2]

[1] Universidade Federal de Rondônia
[2] Universidade Federal do Paraná
[3] Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Resumo: Valorizar resíduos madeireiros da Amazônia permite obter produtos de maior valor agregado e alinhar as indústrias aos princípios da economia circular. Avaliou-se a percepção de profissionais da movelaria sobre painéis colados lateralmente produzidos com resíduos de madeiras tropicais. Um questionário estruturado foi aplicado a 39 participantes, majoritariamente arquitetos e designers, para a análise tátil e visual de um protótipo de mesa de centro. Considerando os aspectos estéticos (desenhos e texturas) do produto, 94,9% dos participantes indicaram elevada aceitação. A qualidade percebida foi classificada como alta por 84,6% dos profissionais. Quanto à aplicabilidade, o material foi recomendado para mobiliário de alto padrão e destaque. A origem sustentável do material influenciou positivamente 94,9% dos profissionais. O EGP apresentou potencial mercadológico e para agregar valor aos resíduos madeireiros na Amazônia, além de potencializar o aumento da eficiência do uso e rendimento da madeira explorada.

Palavras-chave: Painel colado lateralmente; Resíduos madeireiros; Percepção de mercado.

Applicability and acceptance of EGP panels produced with tropical wood waste

Abstract: Adding value to wood waste from the Amazon enables the creation of higher-value products and aligns industries with circular economy principles. This study evaluated the perceptions of furniture industry professionals regarding edge-glued panels made from tropical wood waste. A structured questionnaire was administered to 39 participants, primarily architects and designers, who conducted a tactile and visual assessment of a coffee table prototype. Regarding the product's aesthetic aspects (patterns and textures), 94.9% of participants indicated a high level of acceptance. Perceived quality was rated as high by 84.6% of the professionals. In terms of applicability, the material was recommended for high-end and statement furniture pieces. The material's sustainable origin positively influenced 94.9% of the professionals. The EGP demonstrated market potential and the ability to add value to Amazonian wood waste, while also enhancing the efficiency of wood utilization and the yield from harvested timber.

Keywords: Edge-glued panel; Wood waste; Market perception.

1. Introdução

A região amazônica detém ~68% da cobertura florestal do Brasil, possuindo uma vasta diversidade de espécies com alto potencial madeireiro (ABIMCI, 2022). Contudo, o setor opera predominantemente na geração de produtos de baixo valor agregado, apresentando baixas taxas de conversão de toras em produtos (35-40%) (Valdiones et al., 2022). Essa dinâmica resulta em um elevado volume de resíduos sólidos, como costaneiras, aparas e sobras, que, embora classificados pela legislação para aproveitamento industrial, são historicamente subutilizados ou destinados apenas à geração de energia por meio da queima direta (Brasil, 2016; Valdiones et al., 2022).

Nesse cenário, o desenvolvimento de Produtos de Maior Valor Agregado (PMVA) surge como uma solução estratégica para a otimização dos recursos florestais e o fortalecimento da economia circular no setor madeireiro (Valdiones et al., 2022; Parobek & Paluš, 2024). Entre esses produtos, o painel colado lateralmente (*Edge Glued Panel* - EGP) destaca-se por permitir o reaproveitamento de peças curtas e estreitas de madeira sólida, conferindo ao produto atributos estéticos e decorativos valorizados pela indústria moveleira (Trianoski & Iwakiri, 2020). Pesquisas anteriores que fundamentam este estudo comprovaram a viabilidade tecnológica do uso de resíduos de espécies tropicais manejadas para a produção de painéis EGP (Keffer, 2024; Keffer et al., 2024).

Entretanto, para além da conformidade técnica e mecânica, a inserção efetiva de um novo material no mercado depende da sua aceitação por parte de profissionais que especificam e desenvolvem projetos de produtos. Assim, como desdobramento dessa etapa tecnológica, torna-se necessário investigar a percepção subjetiva de profissionais do setor moveleiro e de interiores sobre os usos potenciais do material.

Diante do exposto, o presente estudo teve como objetivo avaliar a percepção de profissionais do setor moveleiro quanto aos aspectos estéticos, táteis e ao potencial de aplicação comercial de painéis EGP produzidos com resíduos de madeira sólida de espécies tropicais manejadas, utilizando um protótipo de mobiliário de alto valor agregado como objeto de demonstração e análise.

2. Material e métodos

A coleta de dados foi realizada por meio da avaliação de um protótipo confeccionado com painel EGP produzido a partir de resíduos de madeiras tropicais manejadas, utilizando-se um questionário estruturado do tipo *survey* (Gil, 2019), aplicado a profissionais dos setores moveleiro e de design de interiores em Curitiba/PR, entre julho e dezembro de 2023. O objeto

da avaliação consistiu em um painel EGP fabricado com resíduos sólidos (costaneiras, aparas e sobras) provenientes do processamento primário de madeiras tropicais manejadas na Amazônia Sul Ocidental. As espécies utilizadas na composição do painel foram *Cedrela odorata* (cedro-rosa), *Enterolobium schomburgkii* (orelha-de-macaco), *Erisma uncinatum* (cedrinho) e *Qualea paraensis* (cambará) (Keffer, 2024).

Para a demonstração prática da aplicabilidade do material, foi utilizado um protótipo físico: a Mesa de Centro Vinil Média Natural, gentilmente reproduzida pela empresa Fitto Design (Figura 1). O móvel teve seu tampo original substituído pelo painel EGP híbrido produzido com as espécies citadas, permitindo a observação direta das texturas, desenhos e cores naturais das madeiras tropicais.



Figura 1 – Mesa de Centro Vinil Média Natural com tampo original (a) e protótipo confeccionado com substituição do tampo por painel EGP híbrido (b).

A pesquisa foi direcionada a profissionais atuantes no setor moveleiro e de interiores, cujas atividades exigem conhecimento técnico sobre materiais e tendências de mercado. O grupo de participantes foi composto por: designers, arquitetos, fabricantes de móveis, lojistas e marceneiros. A seleção dos respondentes baseou-se em sua expertise profissional, assegurando que a avaliação da qualidade e do potencial comercial do painel fosse fundamentada na experiência prática no mercado moveleiro.

O questionário foi composto por questões de múltipla escolha e campos abertos destinados à caracterização do perfil profissional dos participantes. Os participantes foram convidados a analisar visual e tatilmente o protótipo da mesa de centro. Após essa avaliação, responderam ao questionário de forma independente e anônima, registrando suas percepções sobre os atributos do painel e seu potencial de aplicação em produtos moveleiros, sem interferência dos pesquisadores.

As variáveis analisadas foram agrupadas em quatro dimensões principais: 1. Aspectos estéticos: avaliação da atratividade dos desenhos, texturas e da combinação de cores naturais

das madeiras que compuseram o painel, bem como da percepção visual geral do produto. 2. Qualidade percebida: avaliação da percepção global de qualidade durante o manuseio do produto, considerando conjuntamente atributos relacionados ao toque, acabamento superficial, dimensões e peso. 3. Potencial de aplicação e aceitação mercadológica: avaliação da adequação do painel para diferentes aplicações no setor moveleiro, intenção de compra ou recomendação do produto, posicionamento em segmentos de mercado e potencial de utilização comercial. 4. Sustentabilidade e inovação percebidas: avaliação da influência da origem do material e do aproveitamento de resíduos de madeiras tropicais manejadas na aceitação do painel, bem como da percepção dos participantes quanto ao grau de diferenciação e inovação do produto em relação aos materiais disponíveis no mercado.

As variáveis relacionadas à recomendação de uso e ao posicionamento mercadológico foram avaliadas por meio de questões de múltipla resposta, permitindo aos participantes selecionar mais de uma alternativa compatível com sua percepção sobre o painel.

Os dados foram organizados e analisados por meio de estatística descritiva, utilizando frequências absolutas e relativas. As questões sobre recomendações de aplicação do painel e posicionamento mercadológico permitiam a seleção de mais de uma alternativa. Nesses casos, as frequências relativas foram calculadas em relação ao número total de respondentes, podendo a soma dos percentuais exceder 100%.

3. Resultados e discussão

Participaram da pesquisa 39 profissionais do setor moveleiro e de interiores, com predominância de arquitetos (59%) e designers (38,5%), enquanto fabricantes de móveis representaram 2,6% da amostra (Tabela 1). A composição da amostra é relevante, pois esses profissionais atuam diretamente na especificação de materiais, no desenvolvimento de projetos e na definição de soluções estéticas e funcionais para ambientes residenciais e comerciais. A predominância de arquitetos e designers conferiu maior representatividade às avaliações dos aspectos visuais, da aplicabilidade do material e do potencial de inserção no mercado, uma vez que esses profissionais influenciam diretamente a seleção de materiais em projetos de mobiliário e interiores, principal segmento consumidor de painéis EGP no Brasil (Trianoski & Iwakiri, 2020).

Tabela 1 – Caracterização dos participantes

Categoria profissional	n	(%)
Arquiteto	23	59,0
Designer	15	38,5
Fabricante de móveis	1	2,6
Lojista	0	0,0
Marceneiro	0	0,0
Total	39	100,0

Conforme apresentado na Figura 2a, 94,9% dos participantes consideraram os desenhos e as texturas naturais atrativos e capazes de valorizar sua aplicação em projetos, enquanto o mesmo percentual afirmou que utilizaria o painel em projetos de mobiliário e interiores. Em relação à combinação das cores naturais das madeiras, 61,5% dos participantes avaliaram que a composição cromática valorizou significativamente o painel, enquanto 38,5% a classificaram como neutra, mas ainda favorável à sua utilização. Nenhum participante considerou a combinação de cores inadequada para aplicação em mobiliário.

A percepção de qualidade durante o manuseio do painel apresentou resultados igualmente favoráveis (Figura 2b). Observou-se que 84,6% dos participantes associaram o conjunto de atributos relacionados ao toque, acabamento, dimensões e peso a um produto de qualidade, enquanto os demais o classificaram como de qualidade intermediária. Nenhum respondente atribuiu avaliação negativa ao painel.

A avaliação das possíveis aplicações do painel revelou ampla aceitação para produtos de maior valor agregado (Figura 2c). A principal recomendação dos participantes foi sua utilização em mobiliários de destaque, como mesas, painéis decorativos, cabeceiras e superfícies de elevada exposição visual. Além disso, mais da metade dos respondentes também considerou adequada sua aplicação em mobiliários de apoio. A baixa frequência de respostas associadas à não utilização decorativa (2,6%) reforça a percepção positiva dos atributos visuais do painel e indica que suas características estéticas são compatíveis com aplicações nas quais o material permanece exposto e constitui elemento de destaque no ambiente.

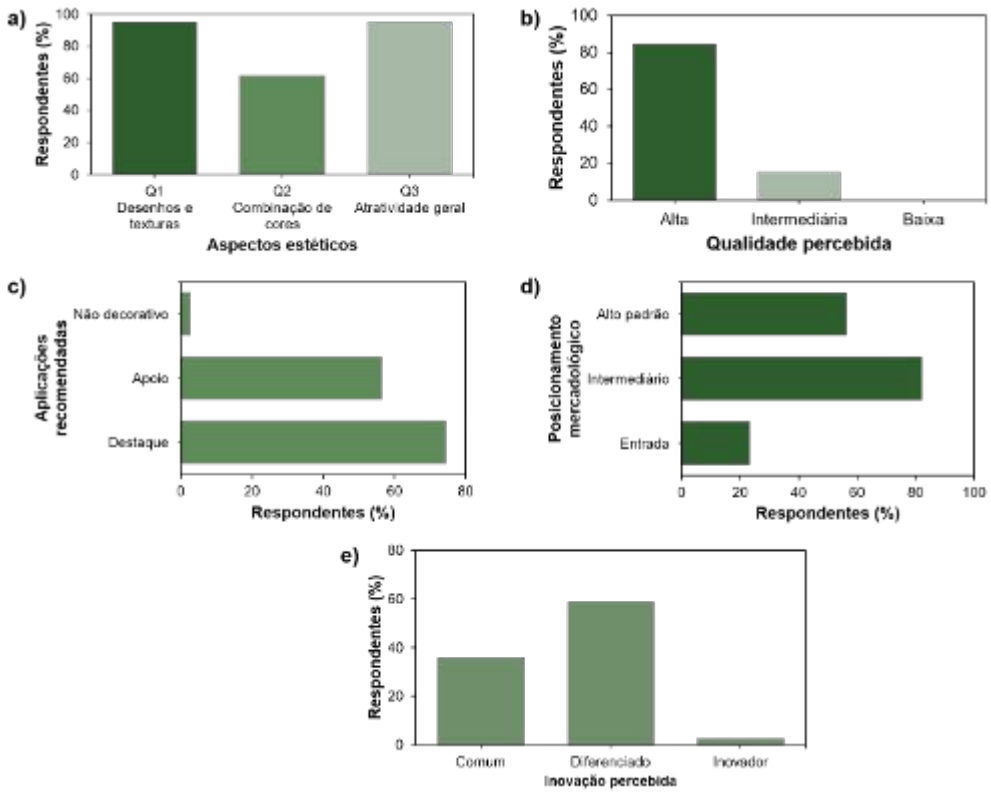


Figura 2 – Indicadores de aceitação estética do painel EGP (a); qualidade percebida do painel EGP (b); aplicações recomendadas para o painel EGP (c); posicionamento mercadológico* do painel EGP (d); e percepção de inovação do painel EGP (e).

*Questão de múltipla resposta.

A avaliação dos aspectos estéticos do painel EGP evidenciou que a heterogeneidade visual decorrente da utilização conjunta de diferentes espécies tropicais não foi percebida como fator limitante (Figura 2a). Ao contrário, a diversidade de tonalidades, desenhos e texturas foi interpretada como atributo estético positivo, agregando valor visual ao produto. Essa percepção amplia as possibilidades de aplicação pelos designers, permitindo a criação de composições cromáticas variadas e alinhadas a diferentes preferências de mercado (Keffer et al., 2024). Esse resultado é particularmente relevante para painéis produzidos com resíduos, pois materiais oriundos de reaproveitamento são frequentemente associados à menor uniformidade estética. Assim, os resultados indicam que essa característica pode ser explorada como elemento de diferenciação e valorização do produto.

A percepção de qualidade demonstrou que a utilização de resíduos de madeira não comprometeu o valor percebido do produto (Figura 2b). A elevada aceitação observada sugere que os procedimentos de processamento, colagem e acabamento empregados conferiram ao

painel características compatíveis com aquelas esperadas para produtos destinados ao mercado moveleiro (Bila et al., 2016; Rojas et al., 2020; Trianoski & Iwakiri, 2020; Bila et al., 2021).

Quanto ao segmento de mercado mais adequado para aplicação do painel, os participantes indicaram predominantemente os mercados de padrão intermediário (82,1%) e alto padrão (56,4%) (Figura 2d), evidenciando percepção favorável quanto ao potencial de utilização do material em produtos moveleiros de maior valor agregado. A maior frequência de respostas nesses segmentos sugere que os profissionais associaram o produto a mercados que demandam qualidade percebida, diferenciação estética e maior valor agregado. Esse resultado está alinhado à proposta de valorização de resíduos madeireiros por meio da produção de componentes destinados a aplicações de maior retorno econômico, contribuindo para superar os desafios associados ao aproveitamento de madeiras tropicais na fabricação de produtos engenheirados de madeira (Iwakiri et al., 2015; Bila et al., 2016; Iwakiri et al., 2016; Campelo et al., 2017; Araujo et al., 2019; Rojas et al., 2020; Bila et al., 2021).

Embora apenas um participante tenha considerado o painel uma inovação sem similares, a maioria dos respondentes (59,0%) o classificou como diferenciado em relação aos produtos disponíveis no mercado (Figura 2e). Esse resultado sugere que a principal contribuição do material não está necessariamente em uma ruptura tecnológica, mas na combinação de atributos estéticos, ambientais e funcionais capazes de conferir identidade própria ao produto.

Quanto à intensão de aquisição ou recomendação do móvel avaliado, 79,5% dos participantes afirmaram que comprariam ou recomendariam o produto, enquanto 20,5% indicaram que utilizariam o painel em outro tipo de mobiliário (Tabela 2).

Tabela 2 – Aceitação comercial do painel EGP

Variável/questão	Resposta	n	(%)
Q6	Compraria/recomendaria	31	79,5
Q6	Utilizaria em outro produto	8	20,5
Q6	Não compraria	0	0,0
Q9	Sim (potencial de inserção no mercado)	37	94,9
Q9	Não (potencial de inserção no mercado)	2	5,1

Não foram colhidas respostas sobre a impossibilidade de comprar ou recomendar o produto e 94,9% dos participantes consideraram que o painel possui potencial de utilização no

mercado moveleiro, evidenciando ampla aceitação profissional da tecnologia proposta. Esses resultados demonstram elevado potencial de inserção comercial do produto.

A origem da matéria-prima e o reaproveitamento dos resíduos exerceram influência positiva na percepção dos participantes. Nesse aspecto, 94,9% afirmaram que a utilização de resíduos de madeiras tropicais manejadas contribuiu positivamente para a aceitação do painel (Tabela 3).

Tabela 3 – Influência da sustentabilidade (origem e reaproveitamento) na aceitação do produto

Resposta	n	(%)
Sim (influência/origem)	37	94,9
Não (influência/origem)	2	5,1

A influência da sustentabilidade na aceitação do produto demonstrou que atributos associados à sustentabilidade e à economia circular são relevantes para a avaliação do material, reforçando tendências observadas no mercado contemporâneo de mobiliário, no qual critérios ambientais assumem importância crescente nos processos de especificação e aquisição (Parobek & Paluš, 2024; Vass et al., 2024). Portanto, iniciativas que propõem soluções em PMVA, como alternativa à destinação exclusiva dos resíduos para a geração de energia por meio da queima direta, são fundamentais para o desenvolvimento sustentável regional (Leite et al., 2020; Nogueira & Castro, 2021).

4. Conclusões

O painel EGP produzido com resíduos de madeiras tropicais manejadas apresentou elevada aceitação estética, percepção positiva de qualidade, potencial de aplicação em mobiliários de maior valor agregado e forte reconhecimento de seus atributos ambientais. Esses aspectos indicaram viabilidade para sua inserção no mercado moveleiro, contribuindo para a agregação de valor a resíduos do processamento primário da madeira e para o desenvolvimento de produtos alinhados aos princípios da sustentabilidade e da economia circular.

5. Agradecimentos

Agradecemos à empresa Rovermader pela doação da matéria-prima utilizada neste estudo e à empresa Fitto Design pela fabricação do protótipo com a utilização do painel EGP no tampo. Este estudo foi financiado em parte pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de

Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código Financeiro 001. À Fundação Rondônia de Amparo ao Desenvolvimento das Ações Científicas e Tecnológicas e à Pesquisa (FAPERO) pela concessão de recursos financeiros (Chamada Pública nº 005/2023 – FAPERO/DITT: Termos de Outorga nº 163/2024 e nº 190/2024).

6. Referências bibliográficas

Associação Brasileira da Indústria de Madeira Processada Mecanicamente (ABIMCI). (2022). Estudo Setorial 2022. Curitiba.

Araujo, R. D. de, Santos, J. dos, Nascimento, C. C. do, Nascimento, C. S. do, Barros, S. V. S., & Lima, M. P. (2019). Surface roughness of edge glued panels (EGP) of amazon maneged species. Ciência e Agrotecnologia, 43: e019119. https://doi.org/10.1590/1413-7054201943019119

Bila, N. F., Iwakiri, S., Trianoski, R., & Prata, J. G. (2016). Avaliação da qualidade de juntas coladas de seis espécies de madeiras tropicais da Amazônia. Floresta, 46(4). https://doi.org/10.5380/rf.v46i4.36311

Bila, N. F., Trianoski, R., Iwakiri, S., Egas, A. F., Manhiça, A. A., & Da Rocha, M. P. (2021). Bonding quality of two lesser-used wood species *Brachystegia spiciformis* and *Julbernardia globiflora* from Mozambique. Maderas. Ciencia y tecnología, 23(41). https://dx.doi.org/10.4067/s0718-221x2021000100441

Brasil (Resolução nº 474, de 06 de abril de 2016). https://www.ibama.gov.br/component/legislacao/?view=legislacao&legislacao=138205

Campelo, S., Iwakiri, S., Trianoski, R., & Aguiar, O. R. de. (2017). Utilização da madeira de *Genipa americana* para produção de painéis de colagem lateral – EGP. Floresta, 47(1). https://doi.org/10.5380/rf.v47i1.48453

Gil, A. C. (2019). Como elaborar projetos de pesquisa. Editora Atlas.

Iwakiri, S., Trianoski, R., Nascimento, C. C., Gumane, C., Lengowski, E. C., Schardosin, F. Z., & Azambuja, R. (2015). Resistência das juntas coladas de madeiras de *Inga alba* (SW) Willd e *Swartzia recurva* Poepp. Cerne, 21(3). https://doi.org/10.1590/01047760201521031844

Iwakiri, S., Trianoski, R., Fonte, A. P. N., França, M. C., Lau, P. C., & Molleken, R. (2016). Potencial de uso de madeiras de *Dinizia excelsa* Ducke e *Protium puncticulatum* J.F.Macbr para produção de painéis EGP. Scientia Forestalis, 44(111). https://dx.doi.org/10.18671/scifor.v44n111.17

Keffer, J. F. (2024). Viabilidade tecnológica de resíduos de madeiras tropicais provenientes de serrarias para produção de produtos de maior valor agregado. (Tese de doutorado). Universidade Federal do Paraná.

Keffer, J. F., Trianoski, R., Behling, A., Koehler, H. S., Iwakiri, S., & Zamarian, E. H. C. (2024). Clustering of tropical species through multivariate analysis of the bonding properties of edge-glued panels (EGP). Scientific Electronic Archives, 17(6). https://doi.org/10.36560/17620242016

Leite, M. K., Silva, C. B. B., Belini, U. L., & Heemann, A. (2020). Design de produto de maior valor agregado (PMVA) utilizando madeira de poda urbana do município de Curitiba. VIII ENSUS – Encontro de Sustentabilidade Em Projeto, 541–549. https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/249659

Nogueira, S. S., & Castro, V. G. de. (2021). Variações longitudinais nas propriedades físicas da madeira de *Mimosa tenuiflora*. Revista do Instituto Florestal, 33(2). http://dx.doi.org/10.24278/2178-5031.202133203

Parobek, J., & Paluš, H. (2024). Wood-based waste management—important resources for construction of the built environment. In: Bragança, L., Cvetkovska, M., Askar, R., & Ungureanu, V. (Eds.), Creating a roadmap towards circularity in the built environment (pp. 213-223). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-031-45980-1_18

Rojas, J. C. C., Iwakiri, S., Trianoski, R., & Mora, H. E. G. (2020). Uso de residuos de processos de transformación secundaria de tres especies tropicales en la fabricación de paneles encolados lateralemente. Scientia Forestalis, 48(125).

Trianoski, R., & Iwakiri, S. (2020). Painéis colados lateralmente - EGP. In: Iwakiri, S., & Trianoski, R. (Eds.). Painéis de madeira reconstituída (pp. 118-135). FUPEF.

Valdiones, A. P., et al. (2022). A Evolução do setor madeireiro na Amazônia entre 1980 e 2020 e as oportunidades para o seu desenvolvimento inclusivo e sustentável na próxima década. Imazon: Imaflora: ICV: IDESAM.

Vass, T., Nand, A. A., Bhattacharya, A., Prajogo, D., Croy, G., Sohal, A., & Rotaru, K. (2024). Transitioning to a circular economy: lessons from the wood industry. The International Journal of Logistics Management, 34(3). https://doi.org/10.1108/IJLM-04-2022-0200

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Atividade antifúngica dos extratos aquosos de *Schinus terebinthifolius* e *Schinus molle* contra fungos apodrecedores de madeira

Roberta Rodrigues Roubuste[1]; Daniel Tavares de Farias[1]; Giovani Mateus Wermeier Weber[1]; Eduardo Costa Cunha[1]; Wanessa Lunardi Wacht[1]; Cristiane Pedrazzi[1]; Talita Baldin[1]; Darci Alberto Gatto[2]

[1] Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), Santa Maria, RS, Brasil
[2] Universidade Federal de Pelotas (UFPel), Pelotas, RS, Brasil

Resumo: Objetivou-se avaliar a atividade antifúngica dos extratos aquosos das folhas, cascas e madeira de *Schinus terebinthifolius* e *Schinus molle* contra fungos apodrecedores de madeira. Os extratos foram obtidos por extração aquosa, liofilizados e avaliados nas concentrações de 0,25, 0,5, 0,75 e 1,0 mg/mL. A atividade antifúngica foi determinada pelo índice de crescimento micelial (ICM) e porcentagem de inibição do crescimento (PIC) em ensaios de laboratório, utilizando dois tipos de fungos: *Ganoderma applanatum* e *Gloeophyllum trabeum*. Todos os extratos promoveram redução significativa ($p < 0,05$) do crescimento micelial dos fungos em comparação às testemunhas. O fungo *G. applanatum*, os PIC foram inferiores a 50%, indicando maior tolerância aos compostos bioativos presentes nos extratos. Para *G. trabeum*, observaram-se elevadas taxas de inibição, superiores a 75% em todas as concentrações avaliadas, evidenciando a toxicidade dos extratos em estudo. Os extratos da casca e madeira, para ambas espécies (*S. terebinthifolius* e *S. molle*) apresentaram os melhores desempenhos frente ao fungo de podridão branca, em razão da maior concentração de compostos fenólicos e extrativos nessas biomassas. Não foram verificadas diferenças significativas entre as concentrações testadas, demonstrando que a menor concentração avaliada (0,25 mg/mL) foi suficiente para promover atividade antifúngica. Conclui-se que os extratos aquosos de *S. terebinthifolius* e *S. molle* apresentam potencial para aplicação como preservantes naturais de madeira, reduzindo o crescimento de fungos deterioradores. Os resultados indicam viabilidade técnica para o uso desses extratos em concentrações reduzidas, contribuindo para o desenvolvimento de alternativas de menor impacto ambiental.

Palavras-chave: Extratos vegetais; Resistência da madeira; Toxicidade.

Antifungal activity of aqueous extracts of *Schinus terebinthifolius* and *Schinus molle* against wood-rot fungi

Abstract: The aim of this study was to evaluate the antifungal activity of aqueous extracts obtained from the leaves, bark, and wood of *Schinus terebinthifolius* and *Schinus molle* against wood-decaying fungi. The extracts were obtained through aqueous extraction, freeze-dried, and evaluated at concentrations of 0.25, 0.5, 0.75, and 1.0 mg/mL. Antifungal activity was determined by the Mycelial Growth Index (MGI) and Percentage of Growth Inhibition (PGI) in laboratory assays using two wood-decaying fungi: *Ganoderma applanatum* and *Gloeophyllum trabeum*. All extracts significantly reduced ($p < 0.05$) fungal mycelial growth compared to the control treatments. For *G. applanatum*, PGI values were below 50%, indicating greater tolerance to the bioactive compounds present in the extracts. In contrast, *G. trabeum* exhibited high inhibition rates, exceeding 75% at all tested concentrations, demonstrating the toxicity of the studied extracts to this fungus. Bark and wood extracts from both species (*S. terebinthifolius*

and *S. molle*) showed the best performance against the white-rot fungus, likely due to the higher concentration of phenolic compounds and extractives in these biomasses. No significant differences were observed among the tested concentrations, indicating that the lowest concentration evaluated (0.25 mg/mL) was sufficient to promote antifungal activity. It can be concluded that the aqueous extracts of *S. terebinthifolius* and *S. molle* have potential for application as natural wood preservatives by reducing the growth of wood-decaying fungi. The results indicate the technical feasibility of using these extracts at low concentrations, contributing to the development of environmentally friendly alternatives with reduced ecological impact.

Keywords: Plant extracts; Wood resistance; Toxicity.

1. Introdução

A aplicação de preservantes químicos no controle de pragas florestais vem sendo utilizados pelas indústrias, os quais independente de suas concentrações utilizadas podem causar impactos negativos ao meio ambiente e à saúde humana, uma vez que, muitos destes, apresentam alta persistência, bioacumulação e, toxicidade sistêmica à microrganismos, comprometendo o equilíbrio dos ecossistemas (Tago et al., 2014; Tang et al., 2025). Nessa perspectiva, os extratos de plantas tornam-se uma alternativa promissora para uso como preservantes tanto em plantações agrícolas quanto na proteção de madeiras destinadas às mais diversas finalidades (Elango et al., 2012).

A utilização de extratos provenientes de frutos, folhas, cascas e madeira são uma alternativa na preservação da madeira, considerando a diminuição dos impactos ambientais e inibindo o desenvolvimento e proliferação de fungos deterioradores (Brocco, 2019). Esses microrganismos são agentes bióticos que afetam a qualidade, resistência e a durabilidade da madeira durante seu uso, os quais se desenvolvem em condições de crescimento favoráveis, como temperatura e umidade.

Os produtos naturais, como taninos, óleos vegetais e extratos de origem vegetal, apresentam eficiência na proteção da madeira contra fungos deterioradores, reduzindo significativamente a perda de massa e aumentando sua resistência biológica (Vivian et al., 2022). Ensaios laboratoriais e de campo indicam que esses compostos promovem adequada penetração e retenção na madeira, contribuindo para o aumento da durabilidade e desempenho do material para suas diversas finalidades como matéria-prima (Vivian et al., 2020).

Nesse sentido, extratos naturais obtidos de *Schinus terebinthifolius* e *Schinus molle* são uma alternativa promissora de estudo devido aos seus potenciais antifúngicos e antibacterianos. Os extratos dessas plantas apresentam significativa atividade antifúngica, atuando na inibição

do crescimento micelial e na redução do desenvolvimento de fungos deterioradores (Garza et al., 2024; Oliveira et al., 2024). Os efeitos desses extratos estão associados à presença de compostos bioativos, como monoterpenos, compostos fenólicos, e demais componentes que interferem na estrutura celular dos microrganismos (Paiva et al., 2024). Esses resultados indicam que ambas as espécies possuem elevado potencial para o desenvolvimento como preservantes naturais de madeira, contribuindo para a redução dos impactos ambientais associados aos produtos químicos convencionais.

Desta forma, o objetivo do presente trabalho foi avaliar a atividade antifúngica dos extratos das folhas, cascas e madeira de *Schinus terebinthifolius* e *Schinus molle* contra fungos apodrecedores de madeira.

2. Material e métodos

As árvores de *S. terebinthifolius* e *S. molle* foram selecionadas aleatoriamente, observando-se a ausência de bifurcações e outros aspectos relacionados à sanidade. As árvores foram abatidas para a realização dos procedimentos previstos e seccionadas em discos. Na sequência, com auxílio de uma guilhotina, as cascas foram separadas da madeira e reduzidas a palitos, e posteriormente as folhas, cascas e madeira foram secas em estufa com circulação de ar a 40 ºC até obter peso constante.

Realizou-se a moagem das biomassas vegetais de *S. terebinthifolius* e *S. molle* com auxílio de moinho de facas do tipo *Willey*. Após este processo, os materiais foram classificados para uniformização do tamanho, com o uso de um agitador de peneiras com aproveitamento da fração que ficou retida na peneira 40 mesh, e posteriormente, as amostras foram armazenadas em frascos de vidro fechados.

Os extratos das folhas, cascas e madeira de ambas as espécies foram obtidos seguindo a metodologia descrita por Ferris e Zheng (1999). Para isto, em frasco de vidro tipo Becker foram adicionadas, separadamente, 100 g de amostra da biomassa moída e 1000 mL de água destilada como solvente, os quais foram alocados em banho-maria em temperatura de aquecimento de 40 °C durante 1 hora. Após este período, os extratos foram filtrados isoladamente com o uso de filtro de papel, alocados em frascos de plástico e congelados em ultrafreezer a -50 ºC.

O processo de liofilização foi realizado a utilização de um liofilizador modelo LS3000, marca Terroni®, em que as amostras foram transportadas imediatamente até o liofilizador, no interior de caixa térmica para não haver o descongelamento e evitar a perda da qualidade dos

materiais. A liofilização foi realizada separadamente para cada um dos tratamentos (folhas, cascas e madeira), para ambas as espécies.

Os extratos secos foram diluídos em água destilada para a preparação da solução estoque (solução concentrada a 100%) no interior de frasco de vidro tipo Becker, homogeneizada com auxílio de agitador magnético sem aquecimento, durante 15 minutos e armazenada em frascos fechados. Posteriormente, realizou-se a diluição dessa solução estoque em quatro concentrações dos extratos de *S. terebinthifolius* e *S. molle*: 0,25 mg/mL, 0,5 mg/mL, 0,75 mg/mL e 1 mg/mL.

Para determinar a atividade antifúngica dos extratos contra fungos deterioradores de madeira foi realizado o teste em meio de cultura, com a utilização de Batata Dextrose Ágar (BDA) na proporção de 39 g de BDA para 1000 mL de água destilada, esterilizado em autoclave a 120 °C por 20 minutos. O meio de cultura foi vertido em placas de petri de 70 mm e mantidos em câmara de fluxo até a total solidificação durante duas horas.

Posteriormente, com o auxílio de pipeta volumétrica, foi aplicado 1 mL da solução dos extratos separadamente por cada tratamento de *S. terebinthifolius* e *S. molle* (folha, casca e madeira) em cima do meio de cultura. Após este processo, foi disposto no centro de cada placa discos miceliais de fungos *Ganoderma applanatum* (GA) e *Gloeophyllum trabeum* (GT), fungos de podridão branca e podridão parda, respectivamente, em seis repetições por tratamento, em delineamento inteiramente casualizado (DIC). Na sequência, as placas foram armazenadas em incubadora Biochemical Oxygen Demand (BOD) a temperatura de 25 ºC, umidade relativa de 75 ± 5% e fotófase de 12 horas, para realizar as análises de crescimento micelial.

As avaliações do experimento foram realizadas com auxílio de paquímetro digital e finalizaram até que os fungos das placas das testemunhas ocupassem toda o espaço da placa. O índice de crescimento micelial (ICM) e a porcentagem de inibição de crescimento (PIC), foram calculados pelas Equações 1 e 2, respectivamente.

$$\text{ICM} = \frac{C1}{N1} + \frac{C2}{N2} + \ldots + \frac{Cn}{Nn} \quad (1)$$

Em que:

ICM = Índice de crescimento micelial;

C1, C2, Cn = Crescimento micelial dos fungos na primeira, segunda e última avaliação;

N1, N2, Nn = Número de dias avaliados.

$$PIC = \frac{DTe - Dtr}{DTe} \times 100 \quad (2)$$

Em que:

PIC = Porcentagem de inibição de crescimento (%);

DTe = Diâmetro da testemunha (mm);

DTr = Diâmetro do tratamento (mm).

Posteriormente, os mesmos foram submetidos à análise de variância (ANOVA) e, quando significativo, foram comparados pelo teste de Tukey ($p< 0,05$) com o uso do software estatístico Sisvar 5.6 (Ferreira, 2019).

3. Resultados e discussão

Nas Tabelas 1 e 2 são apresentados os resultados obtidos de índices de crescimento micelial (ICM) e o percentual de inibição de crescimento (PIC) dos fungos de *Ganoderma applanatum* e *Gloeophyllum trabeum*, frente aos diferentes extratos e concentrações de *Schinus terebinthifolius* e *Schinus molle*, respectivamente.

Tabela 1 – Índice de crescimento micelial (ICM) dos fungos *Ganoderma applanatum* (GA) e *Gloeophyllum trabeum* (GT) e porcentagem de inibição de crescimento (PIC) referente aos extratos das folhas, cascas e madeira de *Schinus terebinthifolius*

Extrato	Concentrações (mg/mL)	ICM GA	PIC (%)	ICM GT	PIC (%)
Folha	0	57,92 bB	-	39,44 bA	-
	0,25	50,06 aB	26,30	14,09 aA	77,03
	0,5	49,52 aB	37,44	11,87 aA	85,75
	0,75	49,95 aB	33,79	10,80 aA	87,66
	1	47,43 aB	37,83	13,30 aA	83,95
Casca	0	53,94 bB	-	37,06 bA	-
	0,25	33,15 aB	37,45	14,31 aA	75,06
	0,5	32,71 aB	38,76	11,20 aA	86,84
	0,75	32,72 aB	36,25	11,24 aA	86,67

	1	26,19 aB	48,82	10,73 aA	87,22
Madeira	0	51,65 bB	-	39,93 bA	-
	0,25	36,59 aB	27,11	12,09 aA	80,07
	0,5	35,66 aB	32,33	12,25 aA	78,12
	0,75	32,86 aB	38,78	11,32 aA	80,84
	1	32,83 aB	40,09	9,41 aA	83,21

*Médias nas colunas seguidas por letras minúsculas iguais não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro. *Médias nas linhas seguidas por letras maiúsculas iguais não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro.

Tabela 2 – Índice de crescimento micelial (ICM) dos fungos *Ganoderma applanatum* (GA) e *Gloeophyllum trabeum* (GT) e porcentagem de inibição de crescimento (PIC) referente aos extratos das folhas, cascas e madeira de *Schinus molle*

Extrato	**Concentrações (mg/mL)**	**ICM GA**	**PIC (%)**	**ICM GT**	**PIC (%)**
Folha	0	54,45 bB	-	38,96 bA	-
	0,25	48,44 aB	35,88	7,90 aA	83,60
	0,5	46,84 aB	38,05	10,93 aA	78,77
	0,75	47,85 aB	37,08	10,79 aA	79,66
	1	47,25 aB	37,65	10,52 aA	81,45
Casca	0	53,88 bB	-	39,77 bA	-
	0,25	31,02 aB	44,93	10,26 aA	86,43
	0,5	29,47 aB	46,83	12,27 aA	84,22
	0,75	29,91 aB	45,94	11,63 aA	84,49
	1	29,13 aB	47,64	10,03 aA	87,90
Madeira	0	56,23 bB	-	38,84 bA	-
	0,25	34,94 aB	39,66	14,09 aA	77,06
	0,5	33,51 aB	40,04	11,87 aA	85,96
	0,75	31,88 aB	42,38	10,80 aA	87,66
	1	32,77 aB	41,25	13,30 aA	83,95

*Médias nas colunas seguidas por letras minúsculas iguais não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro. *Médias nas linhas seguidas por letras maiúsculas iguais não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro.

Os resultados para os diferentes extratos de *S. terebinthifolius* e *S. molle*, demonstram que para todas as concentrações testadas houve diferença significativa ($p<0,05$) em comparação com as testemunhas para os dois fungos em estudo. Os ICM foram menores para o fungo *Gloeophyllum trabeum* para todos os tratamentos estudados, o qual apresentou crescimento menor do fungo para os três extratos aplicados (folhas, casca e madeira). Em comparação às duas espécies em estudo, os resultados médios de ICM e PIC para os diferentes extratos e concentrações foram relativamente menores para os extratos com *S. molle*.

Embora entre as diferentes concentrações testadas dos extratos não tenha sido verificada diferença significativa para cada fungo, é possível observar que por terem obtido médias próximas entre as concentrações de 0,25 a 1 mg/mL para os ICM em relação aos dois fungos, a aplicação das concentrações mais baixas possibilitou resultados médios positivos e de ação antifúngica contra os agentes xilófagos, sendo uma alternativa tecnicamente viável e de menor quantidade de biomassa no preparo dos extratos.

Para as plantas em estudo, observa-se que para os diferentes extratos, a maior inibição de crescimento do fungo de podridão branca (*G. applanatum*) foi para os extratos com as cascas e madeiras, e esses fatores estão relacionados com a maior concentração de compostos fenólicos, taninos e extrativos presentes nessas biomassas, os quais são tóxicos a esse agente deteriorador (Valette et al., 2017; Torres et al., 2016; Tascioglu et al., 2013). Em comparação aos dois tipos de fungos testados, a maior inibição para os extratos com as folhas, cascas e madeiras, tanto para *S. terebinthifolius*, como também para *S. molle*, foi para o fungo de podridão parda (*Gloeophyllum trabeum*), apresentando percentual de inibição de crescimento fúngico superior a 75% para ambas concentrações.

Os fungos de podridão parda apresentam maior sensibilidade com extratos naturais, além de terem menor capacidade de atacar a lignina da madeira, enquanto que os fungos de podridão branca, os quais atacam os componentes como a lignina, celulose e hemicelulose, apresentam maior capacidade enzimática, de adaptação ao ambiente e maior tolerância a componentes presentes em extratos, como por exemplo, os compostos fenólicos (Civzele & Mezule, 2024; Woźniak et al., 2025), sendo possível corroborar ao que foi encontrado nos resultados neste estudo.

Em estudo realizado por Pinto (2020), com extrato das folhas de *Tectona grandis* contra a ação de fungos apodrecedores de madeira, obteve para o fungo de podridão parda (*Postia placenta*) taxa de inibição de mais de 70% em comparação aos demais fungos, o qual descreve

que o percentual de inibição elevado está relacionado com a sensibilidade do fungo ao extrato testado, sendo semelhante ao encontrado no presente estudo.

Alguns fungos deterioradores de madeira podem apresentar sensibilidade diferente para cada extrato em estudo, assim como pode estar relacionado com a maior velocidade de crescimento de determinado fungo, em razão da sua capacidade de degradar as substâncias presentes na solução extrativa. Para o fungo *G. applanatum* foi possível observar essas condições, tanto para o extrato com as folhas, como também com a casca e madeira de ambas espécies, em que apresentou menor percentual de inibição de crescimento (abaixo de 50%) para todas as concentrações do fungo de podridão parda.

Em estudos realizados por Hashim et al. (2009), com extratos da folha, madeira, casca, frutos e sementes de Cerbera odollam obtiveram resultados positivos em relação a fungos deterioradores de madeira. Jain et al. (2011) verificou efeito de toxicidade de extratos metanólicos de folhas e cascas de *Cleistanthus collinus* e *Prosopis juliflora* na inibição de crescimento de fungos da podridão branca e podridão parda. O potencial de produtos naturais de proporcionar a inibição do crescimento fúngico está diretamente relacionado com a composição química desses materiais, sendo distinta para cada espécie e em suas diferentes partes, como as folhas, cascas, madeira, frutos e sementes.

Os resultados obtidos, de maneira geral, demonstram que a menor concentração dos diferentes extratos impregnados na madeira (0,25 mg/mL) já foi suficiente para promover elevada toxicidade frente aos fungos de podridão branca e podridão parda utilizados, caracterizando possível efeito de saturação dos extratos. Ou seja, o aumento das concentrações dos extratos não resultou em maior atividade antifúngica dos preservantes naturais, as diferenças dos valores médios de ICM entre as concentrações foram pequenas, indicando que as concentrações mais baixas tiveram desempenho satisfatório na toxicidade contra os fungos testados no presente estudo.

4. Conclusões

Os resultados obtidos neste estudo demonstraram toxicidade e potencial dos extratos das folhas, cascas e madeira de *Schinus terebinthifolius* e *Schinus molle*, sendo possível observar em relação aos resultados obtidos dos índices de crescimento micelial, a redução do crescimento dos fungos *Ganoderma applanatum* e *Gloeophyllum trabeum* em comparação com as testemunhas. Ressalta-se que para os diferentes extratos aplicados a maior taxa de inibição foi para o fungo de podridão parda para as duas espécies em estudo.

5. Agradecimentos

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo auxílio financeiro e incentivo à pesquisa.

6. Referências bibliográficas

Brocco, V. F. (2019). *Extratos de resíduos industriais da madeira de teca para proteção da madeira a organismos xilófagos* (Tese de Doutorado). Universidade Federal do Espírito Santo.

Civzele, A. & Mezule, L. 2024. Isolation and screening of wood-decaying fungi for lignocellulolytic enzyme production and bioremediation processes. *Frontiers in Fungal Biology*, 5, 1-13. https://doi.org/10.3389/ffunb.2024.1494182.

Elango, G. Rahuman, A. A., Kamaraj, C., Bagavan, A., Zahir, A. A., Santoshkumar, T., Marimuthu, S., Velayutham, K., Jayaseelan, C., Kirthi, A. V. & Rajakumar, G. (2012). Efficacy of medicinal plant extracts against Formosan subterranean termite, Coptotermes formosanus. *Industrial Crops and Products*, 36(1), 524-530. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2011.10.032.

Ferreira, D. F. 2019. SISVAR: A computer analysis system to fixed effects split plot type designs. *Revista Brasileira de Biometria*, 37(4), 529-535. https://doi.org/10.28951/rbb.v37i4.450.

Ferris, H. & Zheng, L. (1999). Plant sources of chinese herbal remedies: effects on *Pratylenchus vulnus* and *Meloidogyne javanica*. *Journal of Nematology*, 31(3), 241-263.

Garza, N. E. R., Licea, R. Q., Flores, R. G., Silva, L. G. & Z. J. M. (2024). Garza. In Vitro Antiprotozoal Activity of *Schinus molle* Extract, Partitions, and Fractions against *Trypanosoma cruzi*. *Plants*, 13(16), 1-11. https://doi.org/10.3390/plants13162177.

Hashim, R., Boon, J. G., Sulaiman, O. & Kawamura, F. (2009). Evaluation of the decay resistance properties of Cerbera odollam extracts and their influence on properties of particleboard. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 63(8), 1013-1017. https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2009.07.002.

Jain, S., Nagaveni, H. C. & Vijayalakshmi, G. H. (2011). Effect of leaf and bark extracts of *Cleistanthus collinus* (Benth. & Hook) and *Prosopis juliflora* (Sw.) DC in combination with inorganic compounds against wood decay fungi. *Journal Indian Academy of Wood Science*, 8(2), 198-200. https://doi.org/10.1007/s13196-012-0025-z.

Oliveira, K., Franciscato, L. M. S. S., Mendes, S. S., Barizon, F. M. A., Gonçalves, D. D., Barbosa, L. N., Faria, M. G. I., Valle, J. S., Casalvara, R. F. A., Gonçalves, J. E., Gazim, Z. C.

& Ruiz, S. P. (2024). Essential Oil from the Leaves, Fruits and twigs of *Schinus terebinthifolius*: chemical composition, antioxidant and antibacterial potential. *Moleculares*, 29(2),1-14. https://doi.org/10.3390/molecules29020469.

Paiva, L. F., Ferreira, F. L. P., Miranda, I. de L. & Reis, T. C. (2024). Atividade antimicrobiana dos extratos hidroalcoólico de *Eugenia uniflora* L. (Myrtaceae) e *Schinus molle* L. (Anacardiaceae), *Revista Fitos*, 18(1), 1-11. https://doi.org/0.32712/2446-4775.2024.1718.

Pinto, A. A. de S. (2020). *Eficiência de extrativos da folha de Tectona grandis L. na inibição de fungos apodrecedores de madeira* (Dissertação de Mestrado). Universidade de Brasília.

Tago, D., Andersson, H. & Treich, N. (2014). Pesticides and health: a review of evidence on health effects, valuation of risks, and benefit-cost analysis. *Advances in Health Economics and Health Services Research*, 24, 203-295.

Tang, F. H. M., Wyckhuys, K., Li, Z. & Maggi, F. (2025). Transboundary impacts of pesticide use in food production. *Nature Reviews Earth & Environment*, 6(6), 383-400. https://doi.org/10.1038/s43017-025-00673-y.

Tascioglu, C., Yalçin, M., Sen, S. & Akcay, C. (2013). Antifungal properties of some plant extracts used as wood preservatives. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 85, 23-28. https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2013.06.004.

Torres, K. A. de M., Lima, S. M. R. R. & Ueda, S. M. Y. (2016). et al. Activity of the aqueous extract of *Schinus terebinthifolius* Raddi on strains of the *Candida genus*. *Revista Brasileira de Ginecologia e Obstetrícia*, 38(12), 593-599. https://doi.org/10.1055/s-0036-1597694.

Valette, N., Perrot, T., Sormani, R. & Gelhaye, E. (2017). Antifungal activities of wood extractives. *Fungal Biology Reviews*, 31(3), 113-123. https://doi.org/10.1016/j.fbr.2017.01.002.

Vivian, M. A., Grosskopf, E. J., Nunes, G. C. & Itako, A. T. (2020). Qualidade e eficiência de produtos naturais no tratamento preservativo das madeiras de *Araucaria angustifolia*, *Eucalyptus viminalis* e *Pinus taeda*. *Revista de Ciências Agroveterinárias*, 19(1), 35-47. https://doi.org/10.5965/223811711912020035.

Vivian, M. A., Menegussi, M., Soldi, C. & Modes, K. S. (2022). Qualidade e eficiência do tanino e de aditivos na preservação da madeira de *Pinus taeda* contra o apodrecimento. *Advances in forestry science*, 9(2), 1773-1780. https://doi.org/10.34062/afs.v9i2.13255.

Woźniak, M., Baranowska, M., Waśkiewicz, A. & Cofta, G. (2025). Activity of *Viscum album* L. extract against wood-rot fungi and its potential application in wood Preservation. *Wood Material Science & Engineering*, 21(3), 1-12. https://doi.org/10.1080/17480272.2025.2479230.

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Avaliação da integridade estrutural de árvores urbanas com uso de tomografia acústica

Maria Eduarda Meira Pratti[1]; Nathalia Gabriele Franca Dias Polido1; Henzza Ferreira Rocha1; Náthali Dos Santos Alves1; Cristiane Coelho De Moura1; Rejane Costa Alves[1]*

[1] Universidade Federal do Espirito Santo

Resumo: O presente estudo teve como objetivo avaliar a integridade estrutural de árvores localizadas no Parque Municipal Getúlio Vargas, no município de Alegre–ES, por meio da aplicação de ensaios não destrutivos, com ênfase na tomografia acústica, associadas à inspeção visual sistematizada. Inicialmente, procedeu-se à avaliação das características visuais das árvores com base na metodologia proposta por Seitz (2006), contemplando aspectos relacionados à sanidade dos troncos e galhos, histórico de podas e condições do entorno. Posteriormente, foram realizados ensaios de propagação de ondas de tensão por tomografia acústica, na altura do diâmetro à altura do peito (DAP, 1,30 m). Os resultados demonstraram que a avaliação visual sistematizada permitiu identificar os principais defeitos estruturais e fatores de risco presentes na arborização do Parque Municipal Getúlio Vargas, enquanto a tomografia acústica complementou o diagnóstico ao fornecer informações sobre a condição interna da madeira. A comparação entre os exemplares avaliados evidenciou que a presença de sintomas externos ou de ataques por organismos xilófagos não implica, necessariamente, em comprometimento estrutural do tronco, reforçando a importância da associação entre métodos visuais e ensaios não destrutivos. Dessa forma, a metodologia adotada mostrou-se adequada para subsidiar decisões de manejo, permitindo priorizar intervenções com maior segurança técnica e contribuir para a conservação da arborização urbana e a redução dos riscos à população.

Palavras-chave: Arborização urbana; Métodos não destrutivos; Diagnóstico fitossanitário

Structural integrity assessment of urban trees using acoustic tomography

Abstract: The present study aimed to evaluate the structural integrity of trees located in Getúlio Vargas Municipal Park, in the municipality of Alegre, Espírito Santo State, Brazil, through the application of non-destructive testing, with emphasis on acoustic tomography, combined with systematic visual inspection. Initially, the visual characteristics of the trees were assessed based on the methodology proposed by Seitz (2006), considering aspects related to trunk and branch health, pruning history, and surrounding site conditions. Subsequently, stress wave propagation tests using acoustic tomography were performed at breast height (DBH, 1.30 m). The results demonstrated that the systematic visual assessment enabled the identification of the main structural defects and risk factors affecting the trees in Getúlio Vargas Municipal Park, while acoustic tomography complemented the diagnosis by providing information on the internal condition of the wood. The comparison between the evaluated specimens showed that the presence of external symptoms or attacks by xylophagous organisms does not necessarily indicate structural impairment of the trunk, reinforcing the importance of combining visual assessment with non-destructive testing. Therefore, the adopted methodology proved to be an effective tool for supporting tree management decisions, allowing interventions to be prioritized

with greater technical reliability while contributing to the conservation of the urban forest and the reduction of risks to the public.

Keywords: Urban forestry; Non-destructive testing; Phytosanitary diagnosis

1. Introdução

A arborização urbana constitui elemento estruturante da paisagem e da funcionalidade ecológica das cidades, desempenhando papel estratégico na mitigação de impactos ambientais e na promoção do bem-estar coletivo. Estudos de inventário evidenciam que a presença de árvores contribui para a regulação microclimática, melhoria da qualidade do ar, incremento da biodiversidade e qualificação estética dos espaços públicos (COLETTO; MÜLLER; WOLSKI, 2008; MANFRIN et al., 2019; MOURA et al., 2020). Entretanto, a manutenção desses benefícios está condicionada à gestão técnica e ao monitoramento contínuo dos indivíduos, visto que a ausência de avaliações sistemáticas pode resultar em falhas estruturais, elevando o risco de quedas e danos à integridade física da população e ao patrimônio (SAMPAIO et al., 2019; CARVALHO; FERREIRA; SANTOS, 2019).

A avaliação visual permanece como etapa fundamental no diagnóstico inicial, permitindo a identificação de indícios externos de instabilidade, como cavidades e alterações morfológicas. A interpretação desses sinais é amplamente fundamentada pelo conceito de “linguagem corporal das árvores” (MATTHECK; BRELOER, 1994) e por metodologias de análise de risco que integram critérios de copa, tronco e sistema radicular (SEITZ, 2005; ABNT, 2019). Contudo, a inspeção estritamente visual apresenta limitações na detecção de deteriorações internas incipientes, o que reforça a necessidade de abordagens integradas (BOBROWSKI, 2016).

Nesse sentido, a aplicação de Métodos Não Destrutivos (MND) tem se consolidado como suporte essencial para o diagnóstico fitossanitário. A tomografia acústica, baseada na propagação de ondas de tensão, permite mapear variações de densidade e identificar descontinuidades estruturais, como cavidades ocultas ou a ação de fungos xilófagos (RABE et al., 2004; ARCINIEGAS et al., 2014; KOBZA et al., 2022). Complementarmente, o resistógrafo fornece perfis de resistência à perfuração, correlacionando-se com a integridade do lenho (RINN; SCHWEINGRUBER; SCHÄR, 1996; SOGE; POPOOLA; ADETOYINBO, 2021). A literatura científica reforça que a combinação desses instrumentos amplia a precisão diagnóstica em ambientes urbanos (ALLISON; WANG; SENALIK, 2020; LINHARES et al.,

2021), fundamentando decisões de manejo mais assertivas (BUCUR, 2023; MOURA; PADILHA, 2024).

O município de Alegre, no estado do Espírito Santo, abriga no Parque Municipal Getúlio Vargas um importante patrimônio arbóreo. Situado na região central e sede da prefeitura, o parque constitui um espaço de grande valor histórico, ambiental e social. Dada a necessidade de assegurar a conservação desse patrimônio e a segurança dos usuários, torna-se imprescindível a realização de um diagnóstico técnico qualificado. Assim, este trabalho tem como objetivo avaliar a estabilidade estrutural e o estado fitossanitário das árvores do Parque Municipal Getúlio Vargas, utilizando métodos não destrutivos de tomografia acústica. De forma específica, busca-se: i) identificar a ocorrência de defeitos internos e cavidades nos exemplares arbóreos; ii) correlacionar os achados instrumentais com as evidências visuais de sanidade; e iii) subsidiar o poder público municipal com diretrizes técnicas de manejo, promovendo o equilíbrio entre a preservação arbórea e a segurança pública.

2. Material e métodos

O município de Alegre, está estabelecido no estado do Espírito Santo, nas coordenadas geográficas 20°43'40" S e 41°30'21" O, a uma altitude média de 256 m. Possui área aproximada de 756,86 km². Mediante a isso, o parque municipal Getúlio Vargas, na região central da cidade, onde está instalado a sede da prefeitura e contribui com o patrimônio mais antigo do município. A área do parque ostenta uma grande diversidade florística, em sua maioria de espécies arbóreas florestais.

Avaliação Visual

As primeiras etapas basearam-se em visitas de campo afim da identificação das espécies arbóreas presentes no local, desconsiderando as espécies de palmeiras. O reconhecimento taxonômico foi realizado in loco por uma equipe multidisciplinar, contando com o apoio de um especialista na área botânica.

Após a identificação das espécies, executou-se à avaliação de risco arbóreo por meio da inspeção visual não invasiva, conforme a metodologia proposta por Seitz (2006). Esta metodologia caracteriza como “árvore de risco” aqueles indivíduos que ostentam defeitos estruturais na copa, tronco ou na raiz, apresentando um potencial de ameaça para a segurança pública e à integridade da infraestrutura urbana.

Está metodologia baseia-se em uma escala de pontuação de 0 a 5 para critérios distintos de fitossanidade e estrutura, tais com inclinação, presença de cavidades e ocorrência de pragas, em que 0 corresponde a condições ideais e 5 indica risco máximo, como indicado na figura 1. A classificação final do risco é obtido a partir da soma dos maiores valores atrelados à árvore, aos alvos e aos efeitos colaterais, sendo considerados inaptos ao receber uma pontuação igual a 15.



Figura 1-Esquema de avaliação visual de árvores de risco seguindo a Metodologia de Seitz (2006).

Fonte: Elaborada pelos autores a partir de fotografias próprias, com composição e finalização gráfica realizadas com auxílio do ChatGPT (OpenAI).

Tomografia Acústica

O princípio fundamental da tomografia acústica consiste na emissão e propagação de ondas mecânicas através do material analisado. Para a realização deste ensaio, utilizou-se o tomógrafo *Fakopp 3D Acoustic Tomograph* (RINNTECH), um sistema integrado por oito piezotransdutores, um amplificador de sinal e um software dedicado (Figura 2). Este programa é responsável por registrar o tempo de trânsito das ondas, calcular as suas respectivas velocidades e projetar um mapa tridimensional da estrutura interna do tronco ou da peça de madeira avaliada (Figura 2).

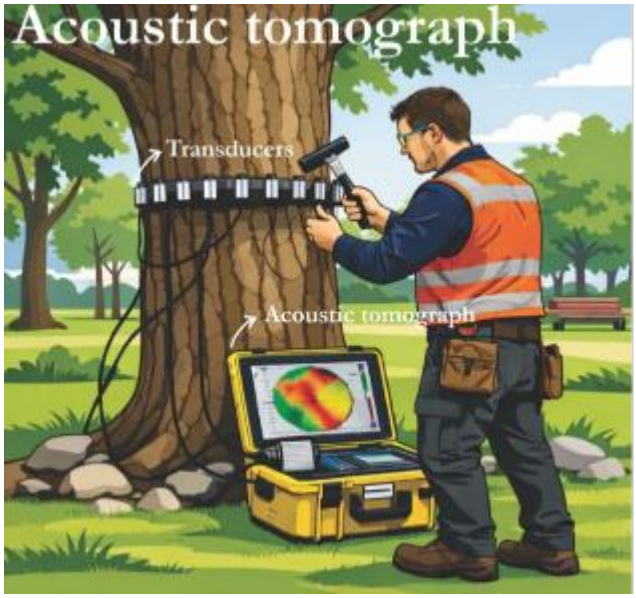


Figura 2-Esquema do aparelho tomógrafo.

Fonte: Elaborada pelos autores a partir de fotografias próprias, com composição e finalização gráfica realizadas com auxílio do ChatGPT (OpenAI).

Para garantir a precisão na leitura do tempo de percurso das ondas, os oito transdutores foram fixados de maneira equidistante ao redor de toda a circunferência do tronco. O posicionamento dos sensores foi padronizado na altura do Diâmetro à Altura do Peito (DAP), equivalente a 1,30 m do solo.

O ensaio é executado a partir de um impacto mecânico aplicado com um martelo em um dos transdutores. Esse golpe gera uma onda que se propaga pelo lenho até ser captada pelos outros sete receptores distribuídos no tronco. Cruzando os dados da circunferência da árvore com as distâncias exatas entre os sensores, o sistema determina a velocidade de propagação da onda mecânica em cada vetor.

A diagnose da estrutura interna baseia-se nas propriedades físicas da madeira: o tecido lenhoso sadio possui alta capacidade de transmissão, permitindo que as ondas viagem rapidamente. Por outro lado, a madeira degradada ou com cavidades internas atua absorvendo a energia do impacto, o que reduz drasticamente a velocidade de propagação do sinal. Essas discrepâncias são traduzidas visualmente em um gráfico cromático (Figura 2C), no qual tons de verde indicam velocidades elevadas (estruturas íntegras) e tons de vermelho sinalizam os menores valores registrados (regiões em processo de decomposição ou ocas).

3. Resultados e discussão

A sistematização dos dados experimentais seguiu uma sequência metodológica rigorosa e orientada a subsidiar o plano de manejo preventivo e a tomada de decisões na gestão pública do Parque Getúlio Vargas. A aplicação da avaliação visual de risco, fundamentada nos critérios propostos por Seitz (2006), confirmou-se como uma ferramenta de triagem preliminar de elevada eficácia. O método viabilizou a identificação e o mapeamento sistemático de desconformidades estruturais em três pontos distintos dos espécimes (copa, tronco e base), correlacionando-os diretamente com a frequência de alvos urbanos e potenciais efeitos colaterais.

O levantamento inicial registrou um cenário de expressiva heterogeneidade florística na área de estudo, totalizando 30 espécies arbóreas distintas distribuídas entre os 56 indivíduos. Essa elevada sociabilidade e riqueza específica representam um indicador ecológico positivo, contribuindo para a manutenção da biodiversidade e para a resiliência do ecossistema urbano contra perturbações. Observou-se uma forte dominância taxonômica concentrada em poucas famílias. O gênero *Ficus* manifestou a maior frequência absoluta dentro do parque, registrando 12 exemplares vivos e 5 mortos. Essa espécie foi seguida pela sibipiruna (*Cenostigma pluviosum*), com 3 indivíduos, e pelo cedro-rosa (*Cedrela fissilis*), também com 3 espécimes amostrados.

A distribuição das classes de desenvolvimento indicou que a maioria da população arbórea avaliada se encontra no estágio adulto ou maturo. Sob a perspectiva da biomecânica arbórea, constatou-se que essa maturidade fisiológica, quando combinada a um histórico de intervenções de poda severas, drásticas ou executadas sem critérios técnicos ao longo das últimas décadas, atuou como o principal vetor para o desencadeamento de anomalias severas. Os defeitos mais recorrentes e com maior potencial de falha localizaram-se na copa dos indivíduos, destacando-se galhos excessivamente angulados, bifurcações codominantes com inclusão de casca e uma taxa acentuada de deposição de galhos secos. Tais alterações morfológicas atuam como concentradores de tensões e pontos de fragilidade mecânica estrutural.

Adicionalmente, detectou-se infestação biótica ativa por cupins em sete indivíduos específicos, pertencentes às espécies flamboyant (*Delonix regia*), angico (*Anadenanthera colubrina*), árvore-da-chuva (*Samanea saman*), pau-ferro (*Libidibia férrea*), cutieira (*Joannesia princeps*), cedro e a uma espécie exótica não identificada. Por concentrar-se predominantemente na base do tronco, a atividade desses insetos xilófagos gera grande preocupação física. O ataque desses agentes gerou a hipótese de um quadro de

comprometimento interno incipiente ou em evolução, justificando a transição imediata para a etapa de validação diagnóstica por meio de ensaios não destrutivos (END).

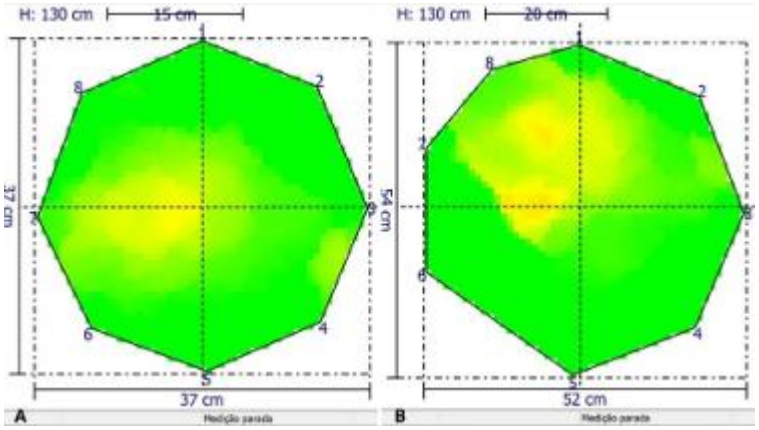


Figura 3-A: Imagem resultante do ensaio de tomografia acústica feito na sibipiruna. **B:** Imagem resultante do ensaio de tomografia acústica feito no pau-ferro.

A presença de sintomas externos na copa ou ataques bióticos na base não implicam, necessariamente, em uma perda severa e imediata da capacidade de carga do tronco, conduziu-se o ensaio de tomografia acústica no exemplar de sibipiruna (Figura 3A). O espécime, avaliado a uma altura padrão de 130 cm do solo e apresentando um fuste geometricamente calibrado em uma seção transversal octogonal de 37 cm x 37 cm, gerou um tomograma bidimensional com distribuição de dados sônicos altamente consistente.

A imagem da sibipiruna revelou uma coroa periférica contínua composta majoritariamente pelo verde, onde as velocidades de propagação das ondas mecânicas atingiram algo próximo a 2.490 m/s. Na física da madeira aplicada ao manejo de árvores urbanas, velocidades elevadas representadas por tons esverdeados correlacionam-se diretamente a tecidos lenhosos sadios, dotados de propriedades elásticas preservadas, integridade celular e alta densidade (Kobza et al., 2022). Esse resultado quantitativo atesta que as camadas externas do tronco da sibipiruna, a zona estrutural de maior relevância biomecânica para resistir aos momentos de flexão externos, encontram-se plenamente preservadas. Em contrapartida, os dados registraram uma atenuação acústica central suave e concêntrica, caracterizada por tonalidades verde-claro e amarelo, distribuída entre os eixos dos sensores 7 e 3, com uma leve inflexão em direção ao sensor 5. Esse gradiente indica uma redução moderada na velocidade

sônica (zona mediana de 1.485 m/s), o que denota uma sutil variação de densidade ou o início de um processo de alteração fisiológica central de baixa densidade, sem descontinuidades físicas.

Seguindo o mesmo delineamento amostral e buscando validar a integridade de indivíduos sob forte suspeita de degradação interna por agentes xilófagos, estendeu-se a investigação instrumentalizada para o exemplar de pau-ferro (*Libidibia ferrea*). O ensaio tomográfico foi conduzido à mesma altura padrão (130 cm do solo), configurando um fuste assimétrico com dimensões operacionais de 54 cm de altura por 52 cm de largura entre o arranjo de 8 sensores sônicos. Diferenciando-se do comportamento homogêneo observado na sibipiruna, os dados coletados no pau-ferro geraram um tomograma com marcante assimetria e variação espacial acentuada de velocidades. Na periferia inferior e no flanco lateral direito do tronco (intervalo entre os sensores 3, 4, 5 e 6), detectou-se uma sólida barreira estável de coloração verde escura. Esse padrão indica que o alburno e as camadas funcionais externas dessas faces retêm a alta densidade e a rigidez mecânica característica da espécie, fundamentais para a estabilidade estática primária do vegetal (Brazee et al., 2024).

Contudo, de forma divergente, o tomograma do pau-ferro (Figura 3B) exibiu uma expressiva e volumosa mancha de desaceleração acústica que compromete quase a totalidade do quadrante superior esquerdo do plano transversal. A anomalia estende-se de forma concêntrica a partir do núcleo geométrico em direção à periferia dos sensores 7, 8 e 1, manifestando-se por meio de uma coloração amarela intensa com núcleos alaranjados dispersos. Embora a ausência de tons vermelhos ou violetas profundos indique que a região afetada não evoluiu para uma cavidade oca, a queda de densidade restringe localmente a capacidade do fuste de dissipar tensões compressivas severas originadas no quadrante afetado.

4. Conclusão

Os resultados demonstraram que a avaliação visual sistematizada permitiu identificar os principais defeitos estruturais e fatores de risco presentes na arborização do Parque Municipal Getúlio Vargas, enquanto a tomografia acústica complementou o diagnóstico ao fornecer informações sobre a condição interna da madeira. A comparação entre os exemplares avaliados evidenciou que a presença de sintomas externos ou de ataques por organismos xilófagos não implica, necessariamente, em comprometimento estrutural do tronco na altura do DAP avaliado, reforçando a importância da associação entre métodos visuais e ensaios não destrutivos. Dessa forma, a metodologia adotada mostrou-se adequada para subsidiar decisões

de manejo, permitindo priorizar intervenções com maior segurança técnica e contribuir para a conservação da arborização urbana e a redução dos riscos à população.

5. Agradecimentos

À UFES, pelo suporte institucional, juntamente à ProEx e a CAPES.

Referências bibliográficas

Allison, R. B., Wang, X., & Senalik, C. A. (2020). Methods for nondestructive testing of urban trees. Forests, 11(12), 1341. https://doi.org/10.3390/f11121341

Arciniegas, A., Brancheriau, L., Lasaygues, P., & others. (2014). Literature review of acoustic and ultrasonic tomography in standing trees. Trees, 28(6), 1559–1567. https://doi.org/10.1007/s00468-014-1062-6

Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2019). NBR 16246-3:2019 – Podas e cortes de árvores: Parte 3: inspeções visuais e instrumentos. ABNT.

Bobrowski, R. (2016). Problemas e distinções entre métodos de avaliação da condição geral de árvores urbanas. Revista da Sociedade Brasileira de Arborização Urbana, 11(2), 1–11. https://doi.org/10.5380/revsbau.v11i2.63437

Bucur, V. (2023). A review on acoustics of wood as a tool for quality assessment. Forests, 14(8), 1545. https://doi.org/10.3390/f14081545

Carvalho, A. L. P. de, Ferreira, D., & Santos, M. C. M. P. N. dos. (2019). Análise de risco de queda de árvores: Tilia tomentosa Moench. Revista da Sociedade Brasileira de Arborização Urbana, 14(3), 1–16. https://doi.org/10.5380/revsbau.v14i3.67272

Chhin, S., & Dahle, G. (2023). Using acoustic tomography to infer stem wood quality of pine forests affected by a fungal pathogen in different latitudinal regions and plantation densities. Ecologies, 4(3), 512–520. https://doi.org/10.3390/ecologies4030033

Coletto, E. P., Müller, N. G., & Wolski, S. S. (2008). Diagnóstico da arborização das vias públicas do município de Sete de Setembro - RS. Revista da Sociedade Brasileira de Arborização Urbana, 3(2), 110–122. https://doi.org/10.5380/revsbau.v3i2.66353

Conceição, I. J., Samolão, R. P., & Santana, A. C. (2017). Proposal for a system of trees fall potential risk assessment in urban parks. Revista Árvore, 41(4). https://doi.org/10.1590/1806-90882017000400008

Kobza, M., Ostrovský, R., Adamčíková, K., & Pastirčáková, K. (2022). Stability of trees infected by wood decay fungi estimated by acoustic tomography: a field survey. Trees, 36(1), 103–112. https://doi.org/10.1007/s00468-021-02185-w

Lawday, G. (2000). The analytical use of stress waves for the detection of decay in standing trees. Forestry, 73(5), 447–456. https://doi.org/10.1093/forestry/73.5.447

Linhares, C. S. F., et al. (2021). Structural stability of urban trees using visual and instrumental techniques: A review. Forests, 12(12), 1752. https://doi.org/10.3390/f12121752

Manfrin, J., et al. (2019). Diagnóstico da arborização urbana do município de Ouro Verde do Oeste, Paraná. Revista da Sociedade Brasileira de Arborização Urbana, 13(3), 49–61. https://doi.org/10.5380/revsbau.v13i3.63661

Mattheck, C., & Breloer, H. (1994). The body language of trees: a handbook for failure analysis. HMSO Publications Centre.

Moura, E. M. de, & Padilha, T. M. (2024). Uma revisão sobre a utilização do ultrassom na caracterização das propriedades e defeitos da madeira. In Anais do 20º Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído (pp. 1–12). ANTAC. https://doi.org/10.46421/entac.v20i1.6031

Moura, J. S., et al. (2020). Inventário florístico e percepção da população sobre a arborização urbana na cidade de Brejo Santo, Ceará. Brazilian Journal of Development, 6(10), 75773–75792. https://doi.org/10.34117/bjdv6n10-124

Oliveira, F. G. R. de, et al. (2006). Efeito do comprimento do corpo-de-prova na velocidade ultra-sônica em madeiras. Revista Árvore, 30(1), 141–145. https://doi.org/10.1590/S0100-67622006000100017

Rinn, F., Schweingruber, F. H., & Schär, E. (1996). Resistograph and X-ray density charts of wood: comparative evaluation of drill resistance profiles and X-ray density charts of different wood species. Holzforschung, 50(4), 303–311. https://doi.org/10.1515/hfsg.1996.50.4.303

Sampaio, A. C. F., et al. (2019). Avaliação de árvores de risco na arborização de vias públicas de Nova Olímpia, Paraná. Revista da Sociedade Brasileira de Arborização Urbana, 5(2), 82. https://doi.org/10.5380/revsbau.v5i2.66278

Seitz, R. A. (2005). Avaliação de risco de árvores urbanas. Ação Ambiental, 8(33), 15–20.

Soge, A. O., Popoola, O. I., & Adetoyinbo, A. A. (2021). Detection of wood decay and cavities in living trees: A review. Canadian Journal of Forest Research, 51(7), 937–947. https://doi.org/10.1139/cjfr-2020-0340

Yu, H. (2020). Microscopia acústica de varredura para avaliação de materiais. Applied Microscopy, 50(1), 25. https://doi.org/10.1186/s42649-020-00045-4

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Avaliação De Produtos Para Impermeabilização De Madeira De Espécies Amazônicas

Denise Thais Pinheiro Barata Silva[1]; Raimunda Marcia Souza dos Santos[1]; Gabriel Costa Silva[1]; Ana Beatriz Nunes[1]; Antony Victor Borges Nunes[1]; Roniel Alves Lima[1]; Selma Lopes Goulart[2]

[1] Universidade Federal Rural da Amazônia, UFRA, Campus Parauapebas, PA
[2] Universidade Federal Rural da Amazônia, UFRA, Campus Parauapebas, PA

Resumo: Este trabalho foi realizado com o objetivo de estudar a taxa absorção de água por tempo de imersão, utilizando corpos-de-prova de madeira de Tauari (*Couratari oblongifolia* Ducke & Knuth) e cedro (*Cedrela fissilis* Vell), tratados com produtos impermeabilizantes de origem sintética e produtos naturais, sendo eles verniz (V), verniz náutico (VN), óleo queimado (OQ), óleo de linhaça (OL) e a cera de carnaúba (C). Foram utilizados 24 corpos de prova cúbicos de 3x3x3 cm de cada uma das espécies. A absorção de água foi avaliada pela variação de massa dos corpos de prova, utilizando o método gravimétrico nos tempos 45 minutos, 24 horas, 168 horas e 240 horas de imersão em água. Na análise permitiu-se concluir que os tratamentos V e o VN foram eficientes na redução do teor de água absorvido e da taxa de absorção das duas espécies. Já a C foi eficiente apenas na espécie Tauari e os tratamentos OL, OQ mostraram baixa eficácia.

Palavras-chave: Permeabilidade; Degradação; Durabilidade.

Evaluation of waterproofing products for Amazonian wood species.

Abstract: This study aimed to examine the water absorption rate over immersion time using wood specimens of Tauari (*Couratari oblongifolia* Ducke & Knuth) and Cedar (*Cedrela fissilis* Vell). The specimens were treated with synthetic and natural waterproofing agents: varnish (V), marine varnish (VN), used motor oil (OQ), linseed oil (OL), and carnauba wax (C). Twenty-four cubic specimens (3x3x3 cm) of each species were used. Water absorption was evaluated by measuring mass variation using the gravimetric method at immersion intervals of 45 minutes, 24 hours, 168 hours, and 240 hours. The analysis concluded that the V and VN treatments were effective in reducing both the amount of water absorbed and the absorption rate for both species. Carnauba wax (C) was effective only for the Tauari species, while the OL and OQ treatments showed low efficacy.
.

Keywords: Permeability; Degradation; Durability

1. Introdução

A madeira acompanha a história da humanidade há milhares de anos. É um material que combina resistência, beleza e versatilidade, capaz de se adaptar a diferentes usos, da construção civil à marcenaria fina. No cenário atual, em que a sustentabilidade e o uso racional dos recursos naturais ganham cada vez mais importância, ela se mantém como uma alternativa valorizada por ser renovável e apresentar baixo impacto ambiental quando manejada de forma responsável (Santos; Oliveira, 2020).

Na Amazônia, essa relevância é ainda maior. A região concentra a maior floresta tropical do planeta, com mais de quatro milhões de quilômetros quadrados, representando quase metade do território brasileiro (IBGE, 2004). A atividade madeireira está entre as principais fontes de renda, movimentando economias locais e exportações (Lentini; Veríssimo; Pereira, 2011). Entre as espécies mais conhecidas e utilizadas estão o tauari (*Couratari oblongifolia* Ducke & Knuth) de cor clara e fácil trabalhabilidade; e o cedro (*Cedrela fissilis* Vell) valorizado pela leveza e aroma característico (Kloczko et al., 2017; Teixeira et al., 2019).

Apesar de suas qualidades, a madeira possui uma característica natural que exige atenção: é higroscópica. Isso significa que ela absorve e libera umidade conforme as condições do ambiente. Essa troca de umidade provoca variações dimensionais, como retração e inchamento, que podem levar a defeitos visuais e estruturais, como empenamentos e rachaduras (Gava; Garcia; Cerchiari, 2019). Em locais muito úmidos, o risco de ataque de fungos e outros organismos aumenta, acelerando a deterioração do material (Pereira et al., 2018).

Para evitar esses problemas e prolongar a vida útil da madeira, é comum aplicar tratamentos de impermeabilização. Produtos como verniz e verniz náutico formam uma barreira protetora sobre a superfície, reduzindo a penetração de água e, no caso do verniz náutico, oferecendo ainda resistência à radiação solar. Já os impermeabilizantes de origem natural, como o óleo de linhaça e a cera de carnaúba, têm atraído interesse por serem biodegradáveis e menos agressivos ao meio ambiente. O óleo de linhaça penetra nas madeira, ajudando a repelir a água, enquanto a cera de carnaúba cria uma película que também confere brilho. O óleo queimado, apesar de ser um produto popular e de baixo custo, apresenta eficiência variável e levanta preocupações ambientais.

Estudos sobre a eficiência desses produtos indicam que o desempenho varia de acordo com a espécie e suas características anatômicas, como densidade e porosidade (Medeiros et al. 2021). Em geral, vernizes apresentam resultados mais consistentes na redução da absorção de

água, enquanto óleos e ceras tendem a ter efeito mais limitado, especialmente em madeiras mais porosas (Santos et al., 2023).

Ressalta-se que apesar da importância das madeiras de espécies amazônicas, diante do elevado valor comercial, há poucos estudo científicos sobre a preservação quando comparado a espécies comerciais de rápido crescimento dos gêneros *Pinus* pp e *Eucalyptus* spp. Faltam informações mais detalhadas sobre seu comportamento frente à umidade e a tratamentos de proteção, o que dificulta a comparação de resultados e o desenvolvimento de recomendações técnicas específicas.

Essa escassez de dados reforça a importância de estudos voltados para as espécies da Amazônia, não apenas para compreender melhor suas características, mas também para contribuir com soluções que aumentem sua durabilidade e competitividade no mercado, valorizando um recurso tão representativo para a economia e a biodiversidade da região.

O presente estudo tem como principal objetivo avaliar a absorção de água, com tempo de imersão, por corpos de prova de madeiras de espécies amazônicas tratadas com produtos impermeabilizantes e produtos com potencial impermeabilizante. Observando a eficácia de cada produto em cada espécie, o teor de massa de água absorvida por cada espécie tratada com cada produto.

2. Material e métodos

A madeira utilizada na pesquisa foi proveniente do polo moveleiro de Parauapebas, obtida através de doação. Para a confecção dos corpos de prova, as peças de madeira foram serradas nas direções transversal, longitudinais radial e tangencial às fibras da madeira, transformadas em peças cúbicas 3x3x3 cm, seguidas de lixamento manual com lixa nº 120. A metodologia adotada neste estudo foi baseada em Cerchiari et al. (2010).

Foram utilizados um total de 48 corpos de prova cúbicos sendo 24 de cada espécie, neles foram testados dois produtos impermeabilizantes sintéticos, (V) verniz e (VN) verniz náutico, e três produtos com potencial impermeabilizante, sendo dois de origem natural, (OL) óleo de linhaça e (C) cera de carnaúba, e o (OQ) óleo queimado que é utilizado, de forma popular, para impermeabilizar madeiras. Para cada um dos tratamentos foram utilizados 4 corpos de prova de cada espécie.

Os produtos foram aplicados por pincelamento, a cera de carnaúba foi derretida em banho maria e os vernizes não foram diluídos. Após a secagem completa, segundo os tempos mínimos recomendados pelos fabricantes, os corpos de prova foram imersos em água.

A análise de absorção de água foi feita pelo estudo do teor de massa de água absorvida pelos corpos de prova, utilizando-se o método gravimétrico. Os corpos de prova foram pesados em uma balança digital com precisão de 0,1g antes e depois da aplicação dos produtos. As pesagens ocorreram após 45 minutos de imersão e depois com 24 horas, 168 horas, 240h até quando houve a estabilização da absorção de água.

O teor de massa de água absorvido foi calculado segundo a equação 1, para os instantes T1=45 minutos, T2=24 horas, T3 = 168 horas e T4= 240 horas

Equação 1:

$$T_{H2O} = \frac{m_f - m_i}{m_i} \times 100$$

T$H2O$ = Teor de água absorvido (%);

mf = massa final do corpo-de-prova no instante analisado (g);

mi = massa inicial, considerada a massa do corpo-de-prova á umidade de equilíbrio, após aplicação do produto impermeabilizante (g);

A eficácia dos impermeabilizantes foi avaliada pela análise da variação da taxa de absorção de água (TAH2$_O$) ao longo do tempo, dada pela massa de água absorvida por imersão, calculada de acordo com a equação 2, para todos os instantes de medição.

Equação 2:

$$TA_{H2O} = \frac{m_f - m_i}{t_f - t_i}$$

TAH2$_O$ = Taxa de absorção de água (g/h);

mf = massa final do corpo-de-prova no instante analisado (g);

mi = massa inicial, considerada a massa do corpo-de-prova á umidade de equilíbrio, após aplicação do produto impermeabilizante (g);

tf = instante final (h);

ti = instante inicial (h).

O delineamento estatístico utilizado foi o inteiramente casualizado, em esquema fatorial 4 × 6, correspondendo a quatro espécies de madeira e seis tratamentos com quatro repetições por combinação. Neste resumo são apresentados apenas os resultados referentes a duas espécies, Tauari (*Couratari spp.*) e Cedro (*Cedrela odorata*). As avaliações foram realizadas em diferentes tempos de imersão, caracterizando medidas repetidas ao longo do experimento.

Para cada espécie e tratamento foram avaliadas a taxa de absorção e o teor de massa de água absorvida, para verificar a eficácia de cada produto na proteção da madeira contra a

penetração de umidade. Os dados obtidos foram tabulados em planilha eletrônicas do software Excel e analisados no programa Jamovi 2.6.44. Inicialmente, os dados foram submetidos a análise dos pressupostos de normalidade e homogeneidade de variâncias, por meio dos testes de Shapiro Wilk e Levene, respectivamente, não sendo atendidos. Dessa forma, empregou-se o teste de Kruskal-Wallis para comparação das medianas, seguido pelo procedimento de comparações múltiplas de Dwass-Steel-Critchlow-Fligner, com nível de significância de 5%.

3. Resultados e discussão

Com a análise qualitativa após o final do experimento foi possível observar que o verniz náutico foi o único tratamento capaz de preservar a coloração original da madeira. O verniz comum e a cera de carnaúba apresentaram comportamento semelhante, formando uma película ao redor dos corpos de prova. O óleo de linhaça não apresentou diferenças em relação a testemunha e o óleo queimado ocasionou manchas nos corpos de prova como mostram as figuras 1 e 2.

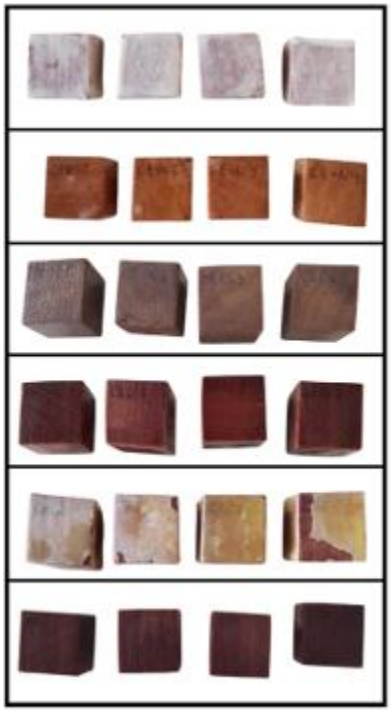


Figura 1 – Corpos de prova de Cedro

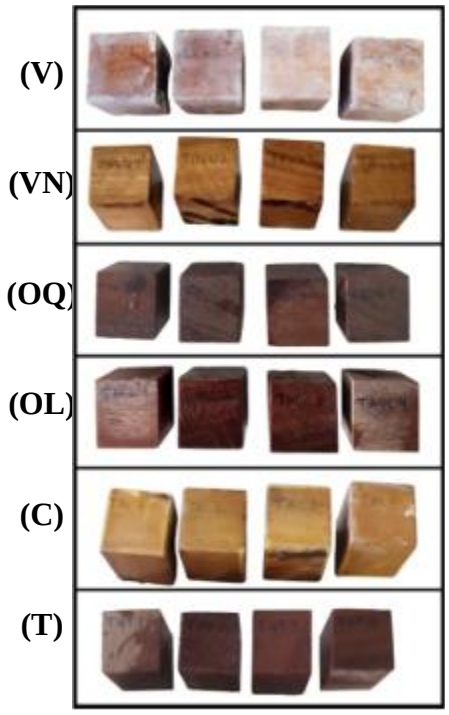


Figura 2 – Corpos de prova de Tauari

A análise estatística expressou diferenças significativas entre as espécies e os tratamentos, assim como as interações entre esses fatores. Isso mostra que a absorção de água depende não apenas da madeira, mas também do produto utilizado e do período de exposição.

Em relação ao teor de água absorvido, as espécies apresentaram comportamento intermediário. Esse resultado está de acordo com Kloczko et al. (2017) e Teixeira et al. (2019), que destacam que espécies mais densas e com poros obstruídos tendem a ser naturalmente mais resistentes à penetração de água.

No que se refere aos tratamentos, o verniz e o verniz naval foram os mais eficientes, reduzindo significativamente tanto o teor de água absorvido quanto a taxa de absorção de água. Esses achados corroboram os de Oliveira et al. (2018) e Santos et al. (2023), que também apontaram os vernizes como os produtos mais consistentes na impermeabilização de madeiras tropicais. A cera de carnaúba apresentou efeito limitado, tendo bons resultados apenas no Tauari, enquanto o óleo de linhaça e o óleo queimado não se diferiram da testemunha, o que também foi relatado por Gava et al. (2010) em ensaios de impermeabilização de espécies tropicais.

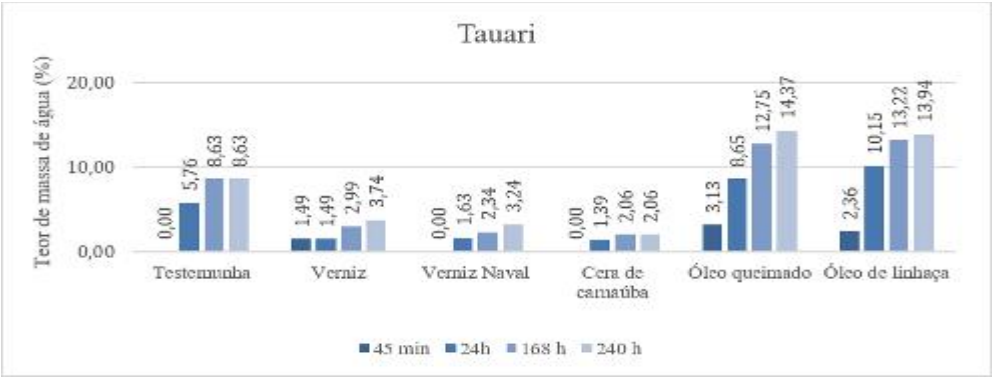


Figura 3 – Teor de massa de água absorvida pelos corpos de prova de Tauari, segundo o tratamento e o tempo de imersão

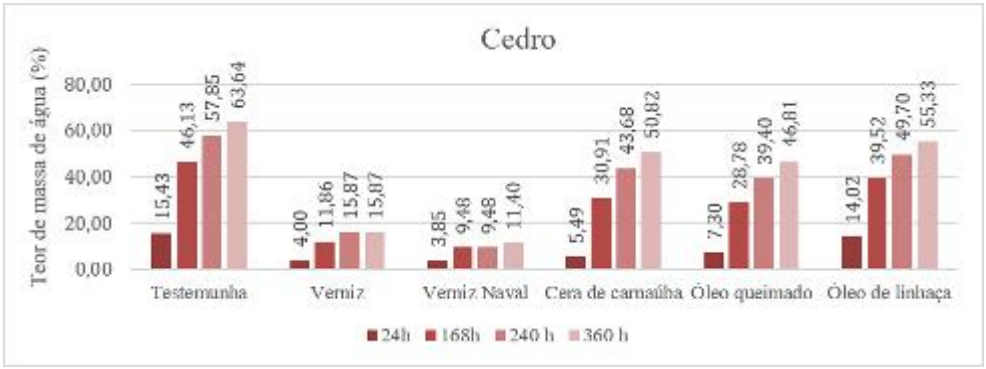


Figura 4 – Teor de massa de água absorvida pelos corpos de prova de Cedro, segundo o tratamento e o tempo de imersão

Quanto à taxa de absorção de água ao longo do tempo, observa-se nas figuras 5 e 6 que a absorção foi mais intensa nas primeiras pesagens, entre 45 minutos e 24 horas, e houve uma estabilização ao longo do tempo. Os tratamentos com verniz e verniz náutico reduziram de forma expressiva a taxa inicial de absorção, confirmando sua eficácia. Esse mesmo comportamento foi descrito por Mattos et al. (2013) em ensaios de campo com *Eucalyptus*.

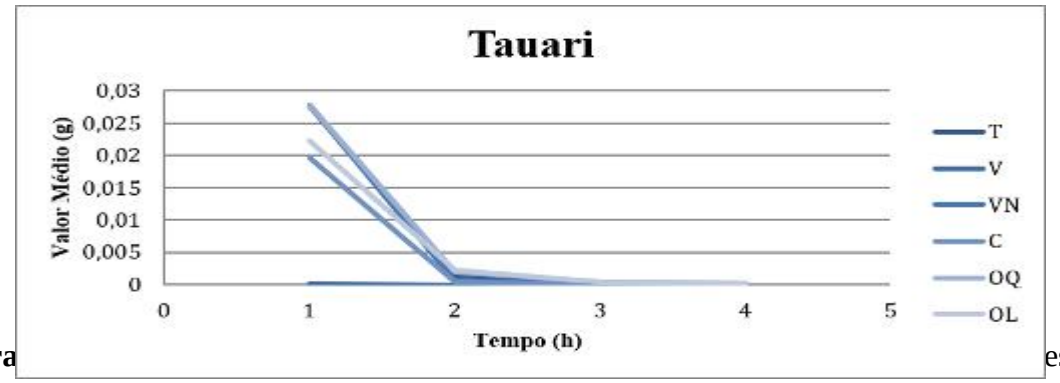


Figura estados

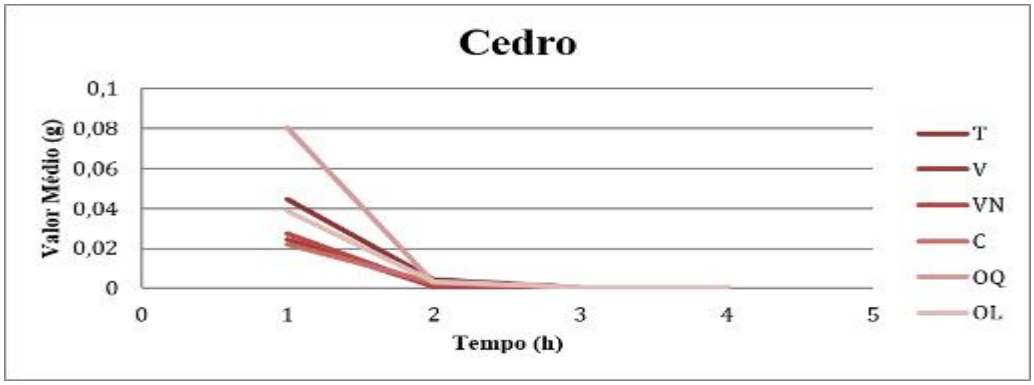


Figura 6 – Taxa de absorção de água dos corpos de prova de Cedro em todos os tempos testados

De modo geral, os resultados obtidos neste trabalho confirmam o que a literatura já aponta: os vernizes são os produtos mais eficazes para impermeabilização da madeira, independentemente da espécie, enquanto óleos e ceras apresentam limitações, sobretudo em espécies mais porosas e menos densas. Entretanto, o efeito positivo da cera de carnaúba no Tauari é um indicativo relevante, sugerindo que algumas espécies podem apresentar melhor compatibilidade com impermeabilizantes naturais, como também relatado por Borges et al. (2025) ao testar cera e óleo em madeiras amazônicas.

4. Conclusões

Os resultados demonstraram que o verniz e o verniz naval foram os tratamentos mais eficientes, pois houve uma redução significativa tanto na taxa de absorção de água quanto no teor de água absorvida. A cera de carnaúba apresentou efeito positivo apenas para o Tauari, enquanto o óleo de linhaça e o óleo queimado não se diferiram estatisticamente da testemunha na maioria dos casos, demostrando uma baixa eficácia.

De forma geral, é possível concluir que a impermeabilização da madeira depende tanto das características da espécie quanto da escolha do produto. Assim, a associação de espécies naturalmente resistentes, com produtos de alta eficiência, como o verniz e o verniz naval, constitui a estratégia mais adequada para a proteção da madeira contra a umidade, enquanto espécies mais vulneráveis, demandam estudos adicionais para garantir maior durabilidade.

5. Agradecimentos

Os autores agradecem à Universidade Federal Rural da Amazônia (UFRA), Campus Parauapebas, pelo suporte acadêmico oferecido durante a realização deste estudo, e à Profa. Dra. Selma Lopes Goulart, pela orientação, confiança e importantes contribuições ao desenvolvimento da pesquisa.

6. Referências bibliográficas

BORGES, P. T. C. et al. *Carnauba wax and linseed oil in the preservation of Amazonian woods. TreeDimensional Journal*, v. 14, e025274, 2025.

CERCHIARI, A. M. F.; GAVA, M.; GARCIA, J. N. Avaliação de produtos para impermeabilização de madeira. *CERNE*, v. 16, n. 1, p. 1-8, 2010.

GAVA, M.; GARCIA, J. N.; CERCHIARI, A. M. F. Efeito da umidade na estabilidade dimensional de madeiras tropicais. *Scientia Forestalis*, v. 47, n. 123, p. 555-563, 2019.

IBGE. *Mapa de biomas do Brasil e de vegetação*. Rio de Janeiro: IBGE, 2004. Disponível em: https://www.ibge.gov.br.

KLOCZKO, M. S. et al. Caracterização anatômica e física de madeiras tropicais da Amazônia. *Revista Árvore*, v. 41, n. 2, p. 1-12, 2017.

LENTINI, M.; VERÍSSIMO, A.; PEREIRA, D. *A expansão madeireira na Amazônia*. Belém: Imazon, 2011. Disponível em: http://www.imazon.org.br/publicacoes/o-estado-da-amazonia/a-expansao-madeireira-na-amazonia-1.

MATTOS, B. D. et al. Durabilidade a campo da madeira de três espécies de *Eucalyptus* tratadas por imersão simples. *Revista Brasileira de Ciências Agrárias*, v. 8, n. 4, p. 648-655, 2013.

MEDEIROS, D. T. et al. Caracterização da madeira de espécies da Amazônia. *Madera y Bosques*, v. 27, n. 2, p. 1-15, 2021.

OLIVEIRA, T. A. et al. Avaliação da eficiência de impermeabilizantes naturais em madeiras tropicais. *Revista Árvore*, v. 42, n. 2, p. 1-8, 2018.

PEREIRA, K. T. O. et al. Acabamentos e tratamentos preservantes para madeira: desempenho e aplicações. *Nativa*, v. 6, n. 6, p. 627-635, 2018.

SANTOS, H. G. B.; OLIVEIRA, J. V. F. Madeira como material construtivo sustentável: perspectivas e desafios. *Revista Engenharia & Construção Sustentável*, v. 5, n. 1, p. 55-67, 2021.

SANTOS, M. F. et al. Eficiência de impermeabilizantes naturais na proteção de madeiras expostas à umidade. *Floresta e Ambiente*, v. 30, n. 2, p. 1-11, 2023.

TEIXEIRA, R. R. et al. Caracterização e uso de madeiras tropicais amazônicas. *Ciência Florestal*, v. 29, n. 4, p. 1565-1577, 2019.

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Avaliação de três adesivos comerciais para colagem de madeira juvenil de *Tectona grandis* Linn. f.

Bruno Duarte Lourenço de Araújo[1]; Felipe Gabriel Santos Araújo[2]; Kamilly da Silva Pereira[2]; Hemanuelly Ferreira Breda Lãn Oliveira[3]; Flávio Rodrigues Lima[3]; Michel Picanço Oliveira[2]; Pedro Gutemberg de Alcantara Segundinho[2]; Rejane Costa Alves[2]

[1] Fields Engenharia
[2] Universidade Federal do Espírito Santo, Departamento de Ciências Florestais e da Madeira, Jerônimo Monteiro, ES, Brasil
[3] Universidade Federal do Espírito Santo, Departamento de Química, Alegre, ES, Brasil

Resumo: A qualidade da linha de cola é um fator determinante para o desempenho de produtos de madeira laminada colada, tornando essencial a seleção de sistemas adesivos adequados. Este estudo avaliou o desempenho de três adesivos comerciais na colagem de madeira juvenil de Teca, por meio da caracterização de suas propriedades físico-químicas e da determinação da resistência ao cisalhamento da linha de cola, da porcentagem de falha na madeira e da eficiência de colagem. Foram avaliados dois adesivos à base de emulsão polimérica-isocianato (EP-950 e EP-925) e um adesivo à base de acetato de polivinila (X-080). Os adesivos apresentaram diferenças entre viscosidade, teor de sólidos e pH. O EP-925 apresentou os maiores valores médios de resistência ao cisalhamento da linha de cola e de eficiência de colagem. Embora as diferenças na resistência ao cisalhamento tenham sido limitadas, a eficiência de colagem diferiu entre os adesivos EP-925 e EP-950. A porcentagem de falha na madeira variou de 77,80 a 85,70%, sem diferenças entre os tratamentos. Os resultados demonstram que a caracterização das propriedades físico-químicas dos adesivos complementa a avaliação mecânica das juntas coladas e fornece informações relevantes para a seleção de sistemas adesivos destinados à colagem da madeira juvenil de Teca.

Palavras-chave: Resistência ao cisalhamento; Eficiência da adesão; Falha na madeira.

Evaluation of commercial adhesives for bonding juvenile *Tectona grandis* wood

Abstract: Bondline quality is a key factor determining the performance of glued laminated timber products, making the selection of suitable adhesive systems essential. This study evaluated the performance of three commercial adhesives for bonding juvenile teak wood by characterizing their physicochemical properties and determining glue line shear strength, wood failure percentage, and bonding efficiency. Two emulsion polymer isocyanate adhesives (EP-950 and EP-925) and one polyvinyl acetate adhesive (X-080) were evaluated. The adhesives exhibited differences in viscosity, solid content, and pH. EP-925 presented the highest mean values of glue line shear strength and bonding efficiency. Although the differences in glue line shear strength were limited, bonding efficiency differed between the EP-925 and EP-950 adhesives. Wood failure ranged from 77.80 to 85.70%, with no significant differences among the treatments. The results demonstrate that the physicochemical characterization of adhesives complements the mechanical evaluation of bonded joints and provides valuable information for selecting adhesive systems for bonding juvenile teak wood.

Keywords: Shear Strength; Bond Efficiency; Wood Failure.

1. Introdução

A madeira laminada colada (MLC) faz parte dos principais produtos de madeira engenheirada devido ao elevado desempenho mecânico, estabilidade dimensional e possibilidade de utilização de peças de menores dimensões na fabricação de elementos estruturais (Abed et al., 2022; Faria et al., 2025). Para isso, a qualidade da colagem torna-se um dos principais fatores responsáveis pelo desempenho estrutural desses produtos, sendo diretamente influenciada pelas propriedades da madeira, pelas características do adesivo e pelas condições de processamento.

Entre os adesivos empregados na indústria madeireira, destacam-se os sistemas emulsão polimérica-isocianato (EPI) e o acetato de polivinila (PVAc), amplamente utilizados na fabricação de painéis, móveis e madeira laminada colada (Koynov & Valyova, 2025; Silva et al., 2024). O desempenho desses produtos está relacionado às suas propriedades físico-químicas, sobretudo viscosidade, teor de sólidos e pH (Silva et al., 2025). Esses parâmetros influenciam o comportamento reológico do adesivo e, consequentemente, o molhamento da superfície da madeira e a formação da linha de cola.

Além das propriedades do adesivo, as características intrínsecas da madeira também exercem influência significativa sobre o desempenho da colagem. A densidade, a distribuição e dimensão dos vasos, a orientação da grã e a presença de lenho juvenil afetam a penetração do adesivo e a formação da interface adesiva, podendo alterar a resistência ao cisalhamento e a porcentagem de falha na madeira (Oliveira et al., 2020; Silva et al., 2020).

A espécie *Tectona grandis* Linn. f. destaca-se entre as espécies florestais de grande valor comercial devido às suas excelentes propriedades tecnológicas e à elevada durabilidade natural, sendo amplamente empregada na fabricação de móveis, esquadrias e outros produtos de maior valor agregado (Chambi-Legoas et al., 2025; Souza et al., 2024). Além disso, estudos anteriores já demonstram o potencial dessa madeira para aplicação em produtos engenheirados, como madeira laminada colada e madeira laminada cruzada (Cavalheiro et al., 2026; Muñoz et al., 2022).

Nesse sentido, o objetivo do estudo foi avaliar a relação entre as propriedades físico-químicas de três adesivos comerciais e o desempenho mecânico de juntas coladas de madeira juvenil de *T. grandis* permitindo aprofundar a compreensão sobre a formação da linha de cola e a eficiência da adesão nessa espécie.

2. Material e métodos

2.1 Materiais

Foram utilizadas tábuas de madeira juvenil de *Tectona grandis* (Linn. f.), obtidas de árvores com idade variando entre 11 e 14 anos, provenientes de um povoamento florestal estabelecido na Fazenda São Jorge, situada no município de Água Boa, Mato Grosso. O material foi disponibilizado na forma de madeira serrada para fins comerciais, não havendo segregação entre madeira de cerne e alburno.

A caracterização física do lote utilizado havia sido previamente realizada por Araújo (2022), que determinou a densidade básica e a densidade aparente da madeira seguindo os critérios da norma NBR 7190-3 (ABNT, 2022). Os valores médios encontrados foram de 535,77 $kg.m^{-3}$ para a densidade básica e 617,26 $kg.m^{-3}$ para a densidade aparente a 12% de umidade. Esses resultados foram adotados para caracterização do material empregado na produção das juntas coladas.

Foram avaliados três produtos comerciais para colagem de madeira, identificados pelos códigos EP-950, EP-925 e X-080. Os sistemas EP-950 e EP-925 pertencem à classe dos adesivos emulsão polimérica-isocianato (EPI), enquanto o X-080 consiste em uma emulsão reticulável de acetato de polivinila (PVAc).

2.2 Métodos

2.2.1 Caracterização dos adesivos

A determinação do pH foi realizada conforme procedimento descrito por Chaves (2022), utilizando um pHmetro digital Alfakit, modelo AT-355, previamente calibrado com soluções tampão de pH 4,0, 7,0 e 10,0. As medições foram efetuadas à temperatura de 22 °C, registrando-se os valores após um minuto de contato entre o eletrodo e o adesivo. Para cada adesivo foram realizadas cinco repetições.

A viscosidade foi determinada de acordo com a norma D1084-16 (ASTM, 2021), utilizando um viscosímetro digital Marte, modelo MVD-8, equipado com hastes SPL3 e SPL4 e velocidade de rotação de 60 rpm. As determinações foram realizadas em amostras de 200 mL de adesivo, sendo os resultados expressos em centipoise (cP). Foram efetuadas cinco repetições para cada tratamento.

O teor de sólidos totais foi obtido pela relação entre a massa seca e a massa inicial do adesivo. Para isso, as amostras foram submetidas à secagem em estufa a 103 ± 2 °C até

estabilização da massa, conforme metodologia adotada por Chaves (2022), sendo os resultados expressos em porcentagem.

2.2.2 Produção e ensaio das amostras

Os corpos de prova foram confeccionados de acordo com a norma D905-08 (ASTM, 2005). Os ensaios mecânicos foram realizados em máquina universal de ensaios DL 10000, equipada com célula de carga de 10 kN.

As superfícies destinadas à colagem foram preparadas com lixas de granulometria 50 e 100. Os sistemas adesivos foram então formulados de acordo com as recomendações do fabricante, empregando-se 15% de endurecedor nos sistemas EPI e 6% no sistema à base de PVAc.

A aplicação foi realizada manualmente com auxílio de espátula, empregando-se gramatura de 200 $g.m^{-2}$. Os adesivos foram distribuídos de modo a formar linha de cola dupla entre as superfícies aderentes. Em seguida, as juntas foram submetidas à prensagem hidráulica sob pressão de 12 $kgf.cm^{-2}$ durante 24 horas. Para evitar colagem lateral decorrente do extravasamento de adesivo durante a prensagem, as peças foram previamente envolvidas em filme plástico. Após a prensagem, as juntas permaneceram em ambiente climatizado a 20 ± 2 °C e 65 ± 2% de umidade relativa até a estabilização da massa.

Foram confeccionados dez corpos de prova para cada formulação, destinados à determinação da resistência ao cisalhamento da linha de cola (fv,0). A eficiência da colagem (*E*%) foi calculada pela relação entre a resistência ao cisalhamento da junta colada e a resistência ao cisalhamento da madeira maciça reportada na literatura. Após os ensaios mecânicos, foi determinada a porcentagem de falha na madeira conforme as diretrizes da norma D3110 (ASTM, 1994), utilizando um gabarito quadriculado impresso em folha de acetato para estimativa visual da área de ruptura ocorrida na madeira e na linha de cola.

2.2.3 Análise estatística

Os resultados foram submetidos à Análise de Variância e aos testes de normalidade de Shapiro-Wilk e homocedasticidade de Bartlett, ao atender às prerrogativas para a análise paramétrica foi aplicado o teste de comparação de médias de Tukey a 5% de significância. Os dados foram analisados com o auxílio do pacote *agricolae* no software R Studio versão 4.3.0. (R Core Team, 2023).

3. Resultados e discussão

Os adesivos avaliados apresentaram diferenças em suas propriedades (tabela 1), evidenciando características distintas de formulação e comportamento durante a aplicação. Os produtos EP-950 e EP-925 apresentaram valores de pH próximos à neutralidade, enquanto o X-080 apresentou caráter mais ácido, com pH de 4,99. Embora todos os valores estejam dentro da faixa normalmente observada para adesivos utilizados na indústria madeireira, variações de pH podem influenciar a estabilidade da formulação e a interação química entre o adesivo e os constituintes da madeira, afetando o processo de cura e a formação da interface adesiva (Silva et al., 2019; Wang et al., 2016).

Tabela 1 - Valores médios das propriedades reológicas dos adesivos utilizados

Produto	**Propriedades**		
	pH	**Viscosidade (cP)**	**Teor de sólidos (%)**
EP - 950	6,77	1414	41,50
EP - 925	7,07	4724	46,50
X - 080	4,99	9997	53,50

A maior diferença entre os adesivos foi observada para a viscosidade. O EP-950 apresentou o menor valor médio, seguido pelo EP-925, enquanto o X-080 apresentou viscosidade superior. A viscosidade é um parâmetro diretamente relacionado à capacidade de escoamento e penetração do adesivo na estrutura anatômica da madeira (Hara et al., 2025). Formulações menos viscosas tendem a apresentar maior mobilidade e maior capacidade de penetração nos lúmens e cavidades celulares. Por outro lado, viscosidades excessivamente elevadas podem restringir essa penetração, favorecendo a formação de linhas de cola mais espessas e reduzindo a interação mecânica entre adesivo e a junta. Ferreira et al. (2018), observaram redução da qualidade de colagem quando a viscosidade alta dificultou a penetração da resina na madeira.

Os resultados também evidenciam uma relação direta entre viscosidade e teor de sólidos. O adesivo X-080 apresentou simultaneamente os maiores valores de viscosidade e teor de sólidos, enquanto o EP-950 apresentou os menores valores para ambas características. Tendência semelhante foi observada por Lubis et al. (2022), que verificaram redução da viscosidade em formulações com menor conteúdo de sólidos, demonstrando que a concentração de componentes não voláteis exerce influência significativa sobre o comportamento reológico do adesivo.

O teor de sólidos é particularmente importante em sistemas de colagem para madeira, pois está associado à quantidade de material efetivamente disponível para formar a linha de cola após a evaporação da água e dos demais componentes voláteis. Baixos teores de sólidos podem resultar em linhas adesivas menos resistentes e demandar maiores tempos de prensagem devido ao aumento da quantidade de solvente a ser removida durante a cura (Bacigalupe & Escobar, 2021; Silva et al., 2025).

Embora as amostras EP-925 tenham demonstrado maior resistência (figura 1), o teste de tukey indicou que, estatisticamente, o desempenho foi próximo ao dos demais adesivos.

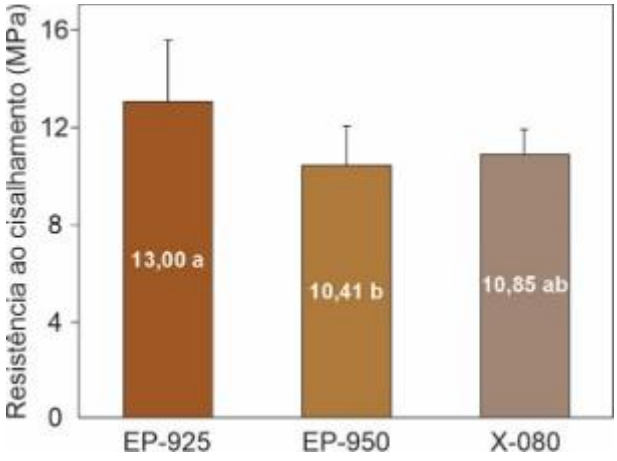


Figura 1 - Valores médios de resistência ao cisalhamento da linha de cola das peças produzidas. Médias seguidas de mesma letra, não diferem estatisticamente entre si pelo teste de tukey ($p > 0,05$).

Esse comportamento pode estar relacionado à viscosidade e ao teor de sólidos do adesivo EP-925, já que são características que favorecem o equilíbrio entre penetração na madeira e formação de uma linha de cola contínua. Em contrapartida, a menor viscosidade do EP-950 pode ter favorecido uma penetração excessiva do adesivo na estrutura anatômica da madeira, reduzindo a quantidade de adesivo disponível na interface e resultando na formação de uma linha de cola faminta (Bianche et al., 2017), o que pode comprometer a resistência da junta. Já o X-080, apesar de apresentar a maior viscosidade global, manteve resistência intermediária, indicando que a maior retenção de adesivo na interface também contribuiu para o desempenho da junta.

Resultados semelhantes foram reportados por França et al. (2020), que observaram maiores valores de resistência ao cisalhamento para juntas de *Eucalyptus* sp. produzidas com adesivos a base de isocianato (EPI) em comparação ao acetato de polivinila (PVAc). Campelo et al. (2017) atribuem esse comportamento às diferenças na composição química desses sistemas.

Enquanto os adesivos PVAc consistem em dispersões aquosas de poli(acetato de vinila), os sistemas EPI associam o acetato de vinila ao diisocianato de difenilmetano polimérico, capaz de promover maior reticulação da matriz adesiva durante a cura. Essa estrutura polimérica mais rígida proporciona maior resistência aos esforços de cisalhamento (Clemente et al., 2014).

A porcentagem de falha na madeira variou entre 77,80 e 85,70% (figura 2a), não sendo observadas diferenças entre os adesivos segundo o teste de tukey ($p < 0,05$). Segundo Faria et al. (2020), elevados percentuais de falha na madeira constituem um indicativo de que a ruptura ocorreu preferencialmente no material lenhoso, refletindo a elevada resistência da linha de cola e o adequado intertravamento mecânico entre adesivo e madeira. Esse comportamento é influenciado tanto pelas propriedades do adesivo quanto pelas características da madeira, como densidade, disposição da grã, presença de lenho juvenil e estrutura dos anéis de crescimento (Oliveira et al., 2020; He et al., 2019).

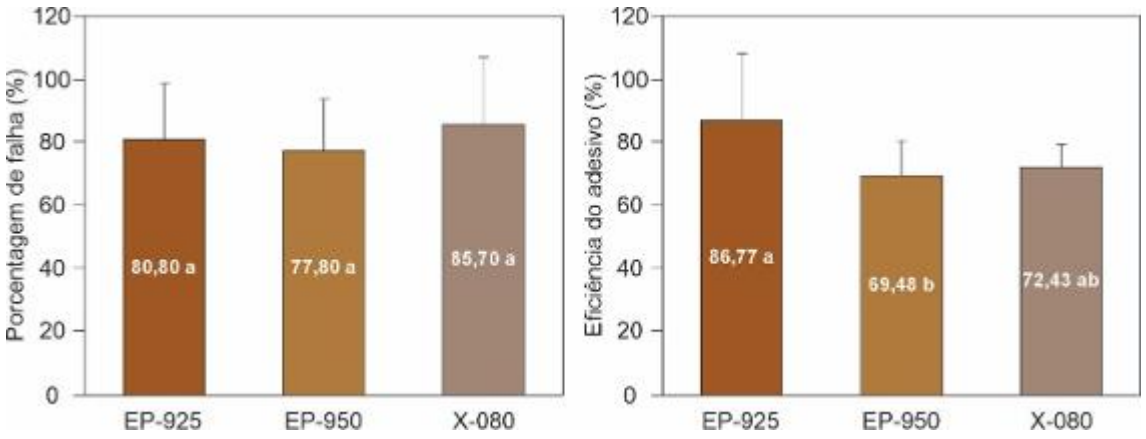


Figura 2 - Valores médios da porcentagem de falha na madeira (a) e da eficiência de colagem (b) das peças produzidas. Médias seguidas da mesma letra não diferem entre si pelo teste de tukey ($p > 0,05$).

A eficiência de colagem variou de 69,48 a 86,77% (figura 2b), sendo o EP-925 o adesivo que apresentou o maior valor médio. O teste de tukey ($p < 0,05$) confirmou que o EP-925 diferiu apenas do EP-950. A eficiência adesiva expressa a relação entre a resistência da junta colada e a resistência da madeira maciça, sendo utilizada como um indicativo da qualidade da colagem. De maneira geral, valores próximos ou superiores a 90% indicam elevado desempenho mecânico da junta e maior potencial de aplicação em elementos estruturais de madeira (Pimentel et al., 2021). Os maiores valores de porcentagem, de eficiência de colagem, obtidos pelo EP-925 corroboram a tendência observada para a resistência ao cisalhamento da linha de cola.

4. Conclusões

Os adesivos comerciais avaliados apresentaram diferenças em suas propriedades físico-químicas e em seu desempenho na colagem da madeira juvenil de *Tectona grandis*. O adesivo EP-925 apresentou os maiores valores médios de resistência ao cisalhamento da linha de cola e de eficiência de colagem, seguido pelo X-080 e pelo EP-950. A porcentagem de falha na madeira foi elevada e semelhante entre os tratamentos, indicando que a ruptura ocorreu predominantemente no material lenhoso. Entretanto, os valores de eficiência de colagem permaneceram abaixo de 90%, sugerindo que as juntas ainda não atingiram o nível de desempenho considerado mais adequado para aplicações estruturais.

5. Referências bibliográficas

Abed, J., Rayburg, S., Rodwell, J., & Neave, M. (2022). A Review of the Performance and Benefits of Mass Timber as an Alternative to Concrete and Steel for Improving the Sustainability of Structures. *Sustainability*, *14*(9), 5570. https://doi.org/10.3390/su14095570

American Society for Testing and Materials. (2021) D1084-16: Standard Test Methods for Viscosity of Adhesives. www.astm.org

American Society for Testing and Materials. (2005) D905-08: Standard Test Method for Strength Properties of Adhesive Bonds in Shear by Compression Loading. www.astm.org

American Society for Testing and Materials. (1994) D3110: Standard specification for adhesives used in nonstructural glued lumber products. www.astm.org

Araújo, K. A. S. (2022). Caracterização mecânica da madeira jovem de *Tectona grandis* (Monografia de Engenharia Industrial Madeireira). Universidade Federal do Espírito Santo.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2022). NBR 7190-3: Projetos de estruturas de madeira parte 3 (1th ed.).

Bacigalupe, A., & Escobar, M. M. (2021). Soy Protein Adhesives for Particleboard Production – A Review. *Journal of Polymers and the Environment*, *29*(7), 2033–2045. https://doi.org/10.1007/s10924-020-02036-8

Bianche, J. J., Teixeira, A. P. M., Ladeira, J. P. S., Carneiro, A. de C. O., Castro, R. V. O., & Della Lucia, R. M. (2017). Cisalhamento na Linha de Cola de Eucalyptus sp. Colado com Diferentes Adesivos e Diferentes Gramaturas. *Floresta e Ambiente*, *24*(0). https://doi.org/10.1590/2179-8087.077114

Campelo, S., Iwakiri, S., Trianoski, R., & Aguiar, O. R. (2017). Utilização da madeira de *Genipa americana* para produção de painéis de colagem lateral - EGP. *FLORESTA*, *47*(1), 129. https://doi.org/10.5380/rf.v47i1.48453

Cavalheiro, R. S., Jardim, P. I. L. G., Santos Junior, A. J., de Araujo, V. A., Júnior, C. C., Lahr, F. A. R., & Christoforo, A. L. (2026). Application of different microscopy techniques for interphase analysis of glued-laminated Tectona grandis wood. *Discover Civil Engineering*, *3*(1), 50. https://doi.org/10.1007/s44290-026-00449-3

Chambi-Legoas, R., Carpio-Mendoza, N. E., Collazos-Mendoza, B. R., & Portal-Cahuana, L. A. (2025). Technological Characterization of Teak Wood from Plantation Thinnings in the Southeastern Peruvian Amazon. *Journal of the Korean Wood Science and Technology*, *53*(5), 455–470. https://doi.org/10.5658/WOOD.2025.53.5.455

Chaves, I. L. S. (2022). Taninos de Mimosa tenuiflora Willd. Poir. Submetidos à hidrólise ácida e adição de microfibras de celulose para produção de adesivos para madeira (Tese de doutorado). Universidade Federal do Espírito Santo.

Clemente, M., Rocha, R. J., Iha, K., & Rocco, J. A. F. F. (2014). Development of prepolymer technology in the synthesis of a polyurethane binder used in solid rocket fuels. *Química Nova*. https://doi.org/10.5935/0100-4042.20140154

Faria, D. L., Mendes, L. M., & Guimarães Júnior, J. B. (2020). Estudo do comportamento mecânico de madeira laminada colada de *Hevea brasiliensis* produzida com adesivo poliuretano. *Scientia Forestalis*, *48*(126). https://doi.org/10.18671/scifor.v48n126.11

Faria, D. L., Mesquita Junior, L., Furtini, A. C. C., Santos, C. A. dos, Duarte, P. J., Guimarães Junior, J. B., Mendes, L. M., & Protásio, T. de P. (2025). Study of the mechanical properties of glued laminated timber (glulam) with treated *Hevea brasiliensis* and epoxy adhesive. *Caderno Pedagógico*, *22*(7), e16593. https://doi.org/10.54033/cadpedv22n7-271

Ferreira, A. M., Pereira, J., Almeida, M., Ferra, J., Paiva, N., Martins, J., Magalhães, F. D., & Carvalho, L. H. (2018). Biosourced Binder for Wood Particleboards Based on Spent Sulfite Liquor and Wheat Flour. *Polymers*, *10*(10), 1070. https://doi.org/10.3390/polym10101070

França, M. C., Zen, L. R., Juizo, C. G. F., Cremonez, V. G., Trianoski, R., & Iwakiri, S. (2020). Production of Joints Of Eucalyptus Sp. to Obtain Edge Glued Panels. *Floresta e Ambiente*, *27*(4). https://doi.org/10.1590/2179-8087-floram-2018-0004

Hara, M. M., Matoski, A., Sprenger, R. L., Fujihara, J. É., & Hara, C. K. (2025). Caracterização de adesivos para madeira produzidos a partir da reciclagem do poliestireno. *REVISTA DELOS*, *18*(67), e5308. https://doi.org/10.55905/rdelosv18.n67-187

He, Q., Zhan, T., Zhang, H., Ju, Z., Hong, L., Brosse, N., & Lu, X. (2019). Variation of surface and bonding properties among four wood species induced by a high voltage electrostatic field (HVEF). *Holzforschung*, *73*(10), 957–965. https://doi.org/10.1515/hf-2018-0190

Koynov, D., & Valyova, M. (2025). Synthetic Adhesives in Production of Engineered Wood Products. *Drvna Industrija*, *76*(3), 343–356. https://doi.org/10.5552/drvind.2025.0260

Lubis, M. A. R., Labib, A., Sudarmanto, Akbar, F., Nuryawan, A., Antov, P., Kristak, L., Papadopoulos, A. N., & Pizzi, A. (2022). Influence of Lignin Content and Pressing Time on Plywood Properties Bonded with Cold-Setting Adhesive Based on Poly (Vinyl Alcohol), Lignin, and Hexamine. *Polymers*, *14*(10), 2111. https://doi.org/10.3390/polym14102111

Muñoz, F., Tenorio, C., Moya, R., & Navarro-Mora, A. (2022). CLT Fabricated with Gmelina arborea and Tectona grandis Wood from Fast-Growth Forest Plantations: Physical and Mechanical Properties. *Journal of Renewable Materials*, *10*(1), 1–17. https://doi.org/10.32604/jrm.2022.017392

Oliveira, R. G. E., Gonçalves, F. G., Segundinho, P. G. de A., Oliveira, J. T. da S., Paes, J. B., Chaves, I. L. S., & Brito, A. S. (2020). Analysis of glue line and correlations between density and anatomical characteristics of Eucalyptus grandis × Eucalyptus urophylla glulam. *Maderas. Ciencia y Tecnología*, (ahead), 0–0. https://doi.org/10.4067/S0718-221X2020005000408

Pimentel, T. S., Wimmer, P., Carvalho, H. R. de, Roitman, L., & Menezzi, C. H. S. Del. (2021). Resistência ao cisalhamento da linha de cola em madeiras tropicais amazônicas. *Scientia Forestalis*, *49*(132). https://doi.org/10.18671/scifor.v49n132.19

Silva, E., Gonçalves, F., Segundinho, P., Paes, J., Chaves, I., Lopez, Y., Cruz, B., Braga, R., & Simões, I. (2025). Effect of adhesive on shear strength in young wood glued of Anadenanthera peregrina. *Scientific Reports*, *15*(1), 15833. https://doi.org/10.1038/s41598-025-98775-6

Silva, G. C., Lelis, R. C. C., Oliveira, G. de L., Silva, B. C. da, Lossano, W. C. da S., & Abreu, H. dos S. (2019). Propriedades de adesivo aplicado em painéis a partir da substituição por lignossulfonato do processo sulfito. *Ciência Florestal*, *29*(1), 322–335. https://doi.org/10.5902/1980509818414

Silva, J. G. M. da, Medeiros, P. N. de, Soranso, D. R., Tinti, V. P., Oliveira, J. T. da S., & Oliveira, J. G. L. de. (2020). Influence of anatomy on the adhesion performance of four wood species. *Research, Society and Development*, *9*(4), e31942727. https://doi.org/10.33448/rsd-v9i4.2727

Silva, J. V. F., Blanchet, P., & Cogulet, A. (2024). Bonding performance of Canadian hardwoods to produce glued laminated timber. *Journal of Building Engineering*, *98*, 111389. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.111389

Souza, L. V. C., da Silva, J. E. C., Azevedo, T. L. B., Mascarenhas, A. R. P., Ugalde Arias, L. A., Pereira, B. L. C., & Oliveira, A. C. (2024). Wood Quality of Young Tectona grandis L. f. Trees and Its Relationship with Genetic Material and Planting Site in Mato Grosso, Brazil. *Forests*, *15*(5), 860. https://doi.org/10.3390/f15050860

Wang, X.-M., Casilla, R., Zhang, Y., Cooper, P., & Huang, Z. (2016). Effect of extreme pH on bond durability of selected structural wood adhesives. *Wood and Fiber Science*, *48*, 245–259.

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Avaliação do Potencial de Fibras Branqueadas de Pergaminhos de Café para Produção de Papel

Rodrigo Fraga de Almeida[1]; Marcela Ribeiro Coura[1]; Priscila Moreira da Silva Xavier[1]; Iara Fontes Demuner[1]; Ana Márcia Macedo Ladeira Carvalho[1]; Jamille Carvalho de Souza[1]; Antonio Jacinto Demuner[1]

[1] Universidade Federal de Viçosa

Resumo: Este trabalho teve como objetivo a avaliação do potencial do pergaminho de café para a produção de papel, com o uso de uma polpa branqueada desse resíduo. A metodologia consistiu no refino da polpa em moinho PFI com 150, 300 e 450 revoluções, seguido da produção de folhas laboratoriais. Foram realizados testes de resistência à drenagem, índice de tração e resistência à passagem de ar. Os principais resultados mostraram que o refino elevou o grau Schopper-Riegler de 25 para 41 e o índice de tração de 4,06 para 13,3 N.m/g, indicando melhora nas ligações entre fibras. Por outro lado, a polpa manteve alta porosidade, com resistência ao ar variando de 0,62 a 1,95 s/100 cm³. A avaliação permitiu concluir que o pergaminho de café não é adequado para papéis comuns, mas apresenta potencial promissor para aplicações específicas, como papel de cigarro, em papéis absorventes, biodegradáveis e artesanais, além de servir como fonte para produção de celulose microfibrilada e nanocelulose.

Palavras-chave: Resíduo Agroindustrial; Propriedades Físico-Mecânicas; Sustentabilidade.

Assessment of the Potential of Bleached Coffee Parchment Fibers for Paper Production

Abstract: This study aimed to evaluate the potential of coffee parchment for paper production, using a bleached pulp from this residue. The methodology consisted of refining the pulp in a PFI mill at 150, 300, and 450 revolutions, followed by the production of laboratory sheets. Drainage resistance, tensile index, and air resistance tests were performed. The main results showed that refining increased the Schopper-Riegler degree from 25 to 41 and the tensile index from 4.06 to 13.3 N·m/g, indicating improved fiber-to-fiber bonding. On the other hand, the pulp maintained high porosity, with air resistance ranging from 0.62 to 1.95 s/100 cm³. The evaluation allowed us to conclude that coffee parchment is not suitable for common papers, but shows promising potential for specific applications, such as cigarette paper, absorbent papers, biodegradable and handmade papers, as well as serving as a source for the production of microfibrillated cellulose and nanocellulose.

Keywords: Agroindustrial Residue; Physical-Mechanical Properties; Sustainability.

1. Introdução

A super exploração de recursos naturais pressiona o meio ambiente e leva a busca por modelos produtivos mais sustentáveis, que têm impulsionado a pesquisa por formas de aproveitar os resíduos agroindustriais (Brichi et al., 2023; Sadh et al., 2018). A transformação desses materiais em produtos com valor agregado não apenas reduz o impacto ambiental associado ao seu descarte, como também representa uma oportunidade econômica de transformar custos de eliminação desses resíduos em receitas por meio da comercialização de novos produtos (Singh et al., 2021).

O café é uma das commodities mais consumidas no mundo com a produção 2024/2025 batendo 177,5 milhões de sacas (IOC, 2026) com mais de 56 milhões de sacas produzidas só no Brasil (CONAB, 2026). Cerca de 46% da cereja do café se torna resíduo, no qual está incluso casca, polpa, mucilagem e pergaminho (IOC, 2024). Entre esses, o pergaminho do café constitui aproximadamente 5,8% do peso seco do fruto, constituindo uma fonte lignocelulósica ainda pouco explorada industrialmente (Campuzano et al., 2024).

O pergaminho é a camada fina fibrosa que envolve o grão de café imediatamente abaixo da mucilagem. Campuzano et al., (2024) apresentou sua composição como sendo: 50% celulose, 21% hemiceluloses, 28% lignina e 3% cinzas. Esses valores mostram que o pergaminho apresenta características químicas que o tornam potencialmente apto à produção de polpa celulósica.

A polpa celulósica é a matéria-prima fundamental para a indústria de papel, obtida a partir do processamento de biomassa lignocelulósica (Małachowska et al., 2020). Em 2025, o Brasil produziu 29,4 milhões de toneladas de celulose e 11,3 milhões de toneladas de papel (Ibá, 2026). Produto final da cadeia celulósica, o papel é um material versátil com aplicações que vão desde embalagens e higiene pessoal até impressão e escrita. Suas propriedades mecânicas como resistência à tração, drenabilidade e porosidade são diretamente influenciadas pelas características da polpa utilizada e pelo grau de refinamento aplicado (Chen et al., 2016). A avaliação dessas propriedades é essencial para determinar a viabilidade de novas fontes de fibra celulósica.

Diante do exposto, o presente trabalho teve como objetivo avaliar o potencial de polpa celulósica branqueada do pergaminho de café para produção de papel, avaliando sua resistência à drenagem (grau Schopper-Riegler), índice de tração e resistência à passagem de ar em diferentes níveis de refinamento.

2. Material e métodos

Para a produção de papel, foi utilizada uma polpa branqueada do pergaminho de café (*Coffea canephora*) de número kappa 25. Um moinho PFI, modelo MARK VI da Hamar Norway, seguindo a norma TAPPI T248 sp-08 foi utilizado no processo de refino. O número de revoluções de cada um dos três níveis de refino utilizado foram de 150, 300 e 450 rpm.

A norma ISO 5267-1:1999 foi seguida para o teste de resistência à drenagem através do método Schopper-Riegler. As folhas de laboratório foram preparadas de acordo com a norma TAPPI T205 om-81 buscando uma gramatura de 180 g/m². A climatização das folhas foi realizada em um ambiente com umidade relativa de 50 ± 2% e temperatura de 23 ± 1 °C.

O índice de tração e a resistência ao ar do papel produzido foram determinados seguindo as normas TAPPI 494 om-06 e TAPPI 460 om-02 respectivamente.

3. Resultados e discussão

As características das fibras da polpa celulósica influenciam as propriedades físico-mecânicas do papel que será produzido e é possível, através de refino, alterar as características das fibras de maneira a melhorar algumas dessas propriedades do papel (Gharehkhani et al., 2015).

Ao refinar a polpa celulósica, algumas modificações ocorrem com as fibras, entre elas: fibrilação interna e externa, formação de finos secundários e alisamento (Loijas, 2010). A fibrilação interna torna as fibras mais flexíveis e colapsáveis, criando maior contato que leva a ligações mais fortes entre elas (Rusu et al., 2011), enquanto a fibrilação externa tem como principal efeito o aumento da área superficial das fibrilas, o que aumenta as ligações fibra-fibra (Nugroho, 2012). A formação de finos secundários é proveniente da fibrilação externa e do encurtamento das fibras (Mandlez et al., 2022), porém, este segundo efeito não é observado de maneira significativa com refinamento em um moinho PFI (Ramezani & Nazhad, 2004). Os finos tem potencial para aumentar a ligação entre as fibras (Joseleau et al., 2012), mas seu excesso pode aumentar significativamente o tempo de drenagem da polpa (Verma et al., 2015). O alisamento é a redução da curvatura das fibras tornando-as mais retas. Quanto menos curvas, mais difícil é a drenagem da polpa e maior é a resistência a tração do papel (Joutsimo et al., 2005).

Campos et al. (2000) avaliou diversas polpas industriais branqueadas de eucalipto produzidas no Brasil para aplicação na produção de papel. E, já que a polpa de eucalipto é o padrão na indústria de celulose brasileira, os resultados do estudo citado serão utilizados como

comparativos para os parâmetros físico-mecânicos apresentados a seguir da polpa de pergaminho do café. Os gráficos a seguir terão as propriedades testadas neste trabalho plotadas em função do consumo de energia do processo de refino dado em Wh.

O método Schopper-Riegler fornece informação direta sobre a drenagem da polpa. Quanto maior o °SR para uma polpa, menor é sua capacidade de drenagem (Dienes et al., 2005). A Figura 1 apresenta a relação entre a resistência à drenagem (°SR) e o consumo de energia no refino da polpa de pergaminho de café branqueada.

Figura 1 – Resistência à drenagem (°SR) em função do consumo de energia de refino.

O gráfico mostra que a resistência a drenagem aumenta quanto maior é o grau de refino. Isso pode ser atribuído ao alisamento das fibras, ao aumento no teor de finos secundários e ao colapsamento das fibras, efeitos que reduzem a porosidade da malha fibrosa que forma o papel e impede a passagem da água (Botha, 2015). A redução da drenabilidade da polpa é um efeito indesejado para a produção de papel (Taipale et al., 2010). Porém, ele vem com os benefícios já previamente mencionados de melhorias na ligação entre fibras e o consequente aumento na resistência mecânica do papel e, além disso, o valor máximo de 41 para o °SR não é um valor proibitivo. No estudo de Campos et al. (2000), as polpas de eucalipto foram testadas partindo da polpa sem refino até °SR 55, mostrando que o valor máximo obtido para a polpa de pergaminho (41 para o °SR) não impossibilitaria seu uso na produção de papel.

Um dos parâmetros que informam sobre a resistência de um papel é o índice de tração. Ele é medido tensionando uma tira de papel até que ela se rompa, sendo a força no rompimento definida como sua resistência à tração. O índice de tração é a resistência à tração dividida pela gramatura do papel e pela largura da tira testada (TAPPI 494 om-06). Na Figura 2 é apresentada a relação entre o índice de resistência à tração e o consumo de energia no refino da polpa.

Figura 2 – Índice de resistência à tração em função do consumo de energia de refino.

Com o aumento do grau de refino, a resistência a tração aumentou. O papel produzido utilizando a polpa refinada com 450 revoluções no PFI teve um aumento de mais de 3 vezes em seu índice de tração em relação a polpa não refinada (de 4,06 para 13,3 N.m/g). Apesar da melhoria, o valor de 13,3 N.m/g (°SR 41) é ainda bem baixo para produção de papel. Campos et al. (2000), avaliando polpas industriais branqueadas de eucalipto, obteve para o índice de tração de papéis produzidos com essas polpas sem refino o valor médio de 29,06 N.m/g (°SR 40). Uma vez que, além de ser importante para a aplicação final do papel como produto, o índice de tração

também é muito importante para o processo de fabricação (Yokoyama et al., 2007), este pode ser um fator limitante para aplicação desta matéria-prima para a produção de papel.

A resistência ao ar (ou resistência à passagem de ar) é um parâmetro associado ao tempo que um volume específico de ar leva para atravessar uma folha de papel seguindo determinadas condições. Quanto mais poroso o papel, menor o tempo necessário para o ar fluir através dele. A Figura 3 mostra a relação entre a resistência ao ar e o consumo de energia no refino da polpa.

Figura 3 – Resistência do ar em função do consumo de energia de refino.

Assim como as outras duas propriedades, o aumento do grau de refino fez com que a resistência à passagem de ar aumentasse. Porém, mesmo no grau mais elevado de refino, o tempo para a completa passagem do ar foi bastante curto, indicando que o material possui uma alta porosidade. Novamente, comparando com as polpas industriais brasileiras de eucalipto de Campos et al. (2000), no °SR 40 o tempo médio foi de 17,15 s/100 cm³, contra 1,95 s/100 cm³ no °SR 41 da polpa de pergaminho.

A tabela 1 resume todos os resultados apresentados no trabalho:

Tabela 1 – Resultados do refino e testes físicos

Amostra	Nº de revoluções	Consumo de energia (Wh)	°SR	IT (N.m/g)	RPA (s/100cm³)
Polpa de pergaminho de café branqueada	0	0	25	4,06	0,62
	150	2	34	8,38	1,01
	300	3	38	9,58	1,08
	450	5	41	13,3	1,95

ºSR = grau Schopper Riegler; IT= índice de tração; RPA= resistência à passagem de ar.

4. Conclusões

O papel produzido com a polpa de pergaminho de café possui alta porosidade e baixa resistência mecânica. Um possível uso para essa polpa seria papel de cigarro, que não necessita de alta resistência mecânica e se beneficia de alta porosidade. Além disso, a polpa poderia ser utilizada como um aditivo para promover maior volume e porosidade para papéis absorventes e também em papéis biodegradáveis e papéis artesanais, onde a estética rústica é mais importante do que a resistência mecânica. Usos alternativos da celulose proveniente do pergaminho do café seria a produção de celulose microfibrilada e nanocelulose.

5. Agradecimentos

Agradecemos à Universidade Federal de Viçosa pela infraestrutura e as agências de fomento (CAPES, FAPEMIG e CNPq) pela oferta de recursos.

6. Referências bibliográficas

Botha, R. (2015). Factors influencing the drainage and drying of pulp [Dissertação de Mestrado]. Universidade de Pretória.

Brichi, L., Fernandes, J. V. M., Silva, B. M., Vizú, J. F., Junior, J. N. G., & Cherubin, M. R. (2023). Organic residues and their impact on soil health, crop production and sustainable agriculture: A review including bibliographic analysis. Soil Use and Management, 39(2), 686–706. https://doi.org/10.1111/sum.12892

Campos, E. S., Martins, M. A. L., Foelkel, C. E. B., & Frizzo, S. M. B. (2000). Seleção de critérios para a especificação de pastas celulósicas branqueadas de eucaliptos na fabricação de papéis para impressão "offset". Ciência Florestal, *10*(1), 57–75.

Campuzano, F. J., Escobar, D. M., & Torres, A. M. (2024). Physicochemical characterization of coffee parchment. Revista Facultad de Ingeniería, 33(68), e16692. https://doi.org/10.19053/01211129.v33.n68.2024.16692

Chen, T., Xie, Y., Wei, Q., Wang, X., Hagman, O., Karlsson, O., & Liu, J. (2016). Effect of refining on physical properties and paper strength of Pinus massoniana and China fir cellulose fibers. BioResources, 11(3), 7839–7848. https://doi.org/10.15376/biores.11.3.7839-7848

Companhia Nacional de Abastecimento. (2026). Acompanhamento da safra brasileira de café (v. 13, Safra 2026, n. 2 – Segundo levantamento). Brasília, DF: Conab.

Dienes, D., Kemény, S., Egyházi, A., & Réczey, K. (2005). Improving the capability of the Schopper-Riegler freeness measurement. Measurement, 38(3), 194–203. https://doi.org/10.1016/j.measurement.2005.07.001

Gharehkhani, S., Sadeghinezhad, E., Kazi, S. N., Yarmand, H., Badarudin, A., Safaei, M. R., & Zubir, M. N. M. (2015). Basic effects of pulp refining on fiber properties—A review. Carbohydrate Polymers, 115, 785–803. https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2014.08.047

Indústria Brasileira de Árvores. (2026). Mosaico Ibá: Dados do setor florestal – Janeiro a dezembro de 2025. São Paulo: Ibá.

International Coffee Organization. (2024). Beyond coffee: Towards a circular economy in coffee – Overview (Coffee Development Report 2022-23). London: ICO.

International Coffee Organization. (2026). Annual review 2024/25: Advancing global cooperation to strengthen a sustainable and resilient coffee sector. London: ICO.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 5267-1: Pulps – Determination of drainability – Part 1: Schopper-Riegler method. Genebra, 1999.

Joseleau, J.-P., Chevalier-Billosta, V., & Ruel, K. (2012). Interaction between microfibrillar cellulose fines and fibers: Influence on pulp qualities and paper sheet properties. Cellulose, 19(3), 769–777. https://doi.org/10.1007/s10570-012-9689-1

Joutsimo, O., Wathen, R., & Tamminen, T. (2005). Effects of fiber deformations on pulp sheet properties and fiber strength. Papel, 66(1), 38–46.

Loijas, M. (2010). Factors affecting the axial force in low-consistency refining [Final thesis]. Tampere University of Applied Sciences.

Malachowska, E., Przybysz, P., Dubowik, M., Laskowska, A., & Przybysz, K. (2020). Analysis of cellulose pulp characteristics and their influence on paper properties. Materials, 13(17), 3824. https://doi.org/10.3390/ma13173824

Mandlez, D., Koller, S., Eckhart, R., Kulachenko, A., Bauer, W., & Hirn, U. (2022). Quantifying the contribution of fines production during refining to the resulting paper strength. Cellulose, 29(15), 8811–8826. https://doi.org/10.1007/s10570-022-04809-x

Nugroho, D. D. P. (2012). Low consistency refining of mixture of softwood & hardwood [Master's thesis]. Asian Institute of Technology.

Ramezani, O., & Nazhad, M. M. (2004). The effect of refining on paper formation. In African Pulp and Paper Week 2004. TAPPSA.

Rusu, M., Mörseburg, K., Gregersen, Ø., Yamakawa, A., & Liukkonen, S. (2011). Relation between fibre flexibility and cross-sectional properties. BioResources, 6(1), 641–655.

Sadh, P. K., Duhan, S., & Duhan, J. S. (2018). Agro-industrial wastes and their utilization using solid state fermentation: A review. Bioresources and Bioprocessing, 5(1), 1–15. https://doi.org/10.1186/s40643-017-0187-z

Singh, R., Das, R., Sangwan, S., Rohatgi, B., Khanam, R., Peera, S. K. P. G., Das, S., Lyngdoh, Y. A., Langyan, S., Shukla, A., Shrivastava, M., & Misra, S. (2021). Utilisation of agro-industrial waste for sustainable green production: A review. Environmental Sustainability, 4, 619–636. https://doi.org/10.1007/s42398-021-00188-4

Taipale, T., Österberg, M., Nykänen, A., Ruokolainen, J., & Laine, J. (2010). Effect of microfibrillated cellulose and fines on the drainage of kraft pulp suspension and paper strength. Cellulose, 17(5), 1005–1020. https://doi.org/10.1007/s10570-010-9431-6

TAPPI – TECHNICAL ASSOCIATION OF THE PULP AND PAPER INDUSTRY. T 205 om-81: Forming handsheets for physical tests of pulp. Atlanta, 1981.

TAPPI – TECHNICAL ASSOCIATION OF THE PULP AND PAPER INDUSTRY. T 248 sp-08: Laboratory beating of pulp (PFI mill method). Atlanta, 2008.

TAPPI – TECHNICAL ASSOCIATION OF THE PULP AND PAPER INDUSTRY. T 460 om-02: Air resistance of paper (Gurley method). Atlanta, 2002.

TAPPI – TECHNICAL ASSOCIATION OF THE PULP AND PAPER INDUSTRY. T 494 om-06: Tensile breaking properties of paper and paperboard (using constant rate of elongation apparatus). Atlanta, 2006.

Verma, P. K., Bhardwaj, N. K., & Singh, S. P. (2015). Selective hydrolysis of amorphous cellulosic fines for improvement in drainage of recycled pulp based on ratios of cellulase components. Journal of Industrial and Engineering Chemistry, 21, 1290–1296. https://doi.org/10.1016/j.jiec.2014.07.012

Yokoyama, T., Nakai, K., & Odamura, T. (2007). Tensile stress-strain properties of paper and paperboard and their constitutive equations. Journal of the Society for Experimental Mechanics, 47(3), 215–222.

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Avaliação Ultraestrutural da Interação Fungo-Madeira via Microscopia Eletrônica de Varredura em Espécies Amazônicas

Evellyn Cristina Lopes Guerbe[1]; Alexandre Bahia Gontijo[2]; José Roberto Victor de Oliveira[2]; Anna Sofya Vanessa Silvério da Silva [2]

[1] Universidade de Brasília 01

[2] Laboratório de Produtos Florestais/SFB 02

Resumo: Este estudo avaliou a relação entre a perda de massa e os padrões ultraestruturais de biodeterioração em *Virola michelii* e *Qualea dinizii* expostas, por 16 semanas, a *Trametes versicolor*, *Inonotus rickii*, *Gloeophyllum trabeum* e *Gloeophyllum striatum*, em ensaio baseado nas normas ASTM D 2017-05 e AWPA E10-16. Seções transversais e longitudinais tangenciais foram analisadas por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV). *V. michelii* foi classificada como não resistente a *T. versicolor*, apresentando 74,64% de perda de massa, colapso de vasos e fibras e degradação do parênquima radial. *Q. dinizii* foi altamente resistente a *I. rickii*, com 3,34% de perda de massa, baixa colonização e preservação da estrutura celular colonização de pontoações e fraturas compatíveis com o padrão de quebra cúbica. A associação entre a perda de massa e alterações ultraestruturais demonstrou que a resistência da madeira varia em função da interação fungo-madeira. A integração entre MEV e ensaio de apodrecimento acelerado mostrou-se uma abordagem complementar para a avaliação da durabilidade natural de madeiras amazônicas, contribuindo para sua caracterização e seleção para usos que demandem maior resistência à biodeterioração.

Palavras-chave: Biodeterioração; Durabilidade natural; Fungos xilófagos; Microscopia eletrônica de varredura.

Ultrastructural Evaluation of Wood-Fungus Interaction via Scanning Electron Microscopy in Amazonian Species

Abstract: This study evaluated the relationship between mass loss and ultrastructural patterns of biodeterioration in *Virola michelii* and *Qualea dinizii* exposed for 16 weeks to *Trametes versicolor*, *Inonotus rickii*, *Gloeophyllum trabeum*, and *Gloeophyllum striatum* in

a decay test based on ASTM D 2017-05 and AWPA E10-16 standards. Transverse and tangential longitudinal sections were analyzed using Scanning Electron Microscopy (SEM). *V. michelii* was classified as non-resistant to *T. versicolor*, showing 74.64% mass loss, collapse of vessels and fiber, and degradation of radial parenchyma. *Q. dinizii* was highly resistant to *I. rickii*, with 3.34% mass loss, limited colonization, and preserved of the cellular structure. Brown-rot fungi promoted delamination of the secondary cell wall, colonization of pits, and fractures compatible with the cubic fracture pattern. The association between mass loss and ultrastructural changes demonstrated that wood resistance varies according to the fungus-wood interaction. The integration of SEM with accelerated laboratory decay testing proved to be a complementary approach for assessing the natural durability of Amazonian woods, contributing to their characterization and selection for applications requiring greater resistance to biodeterioration.

Keywords: Biodeterioration; Natural durability; Wood-decay fungi; Scanning electron microscopy.

1. Introdução

647. A madeira é um material de origem orgânica, constituído principalmente por celulose, hemiceluloses e lignina. Essa composição, embora proporcione importantes propriedades estruturais, também fornece substrato a para o desenvolvimento de fungos xilófagos, que são os principais agentes de biodeterioração da madeira em condições favoráveis de umidade e temperatura (Goodell, 2020; Schrader et al., 2025).

Fungos de podridão branca removem lignina e polissacarídeos, causando erosão da parede celular, perda da lamela média e alterações na estrutura anatômica. Fungos de podridão parda degradam principalmente os carboidratos da parede celular, por mecanismos oxidativos, preservando relativamente a lignina modificada e produzindo delaminação e quebra cúbica (Schwarze, 2007; Ponzecchi et al., 2024).

A Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) permite observar, em alta resolução, alterações na estrutura da madeira decorrentes da ação fúngica, bem como a presença e as vias de penetração das hifas em elementos anatômicos, como lumens, vasos e pontoações. Dessa forma, a técnica constitui uma importante ferramenta para avaliar a interação entre fungos e madeira e identificar padrões de colonização e degradação (Santos et al., 2011; Schmidt, 2006; Medeiros Neto et al., 2024).

A durabilidade natural corresponde à capacidade da madeira de resistir à biodeterioração sem a aplicação de preservantes e está relacionada a características como densidade, permeabilidade, anatomia, composição química e disponibilidade de água (Medeiros Neto et al., 2024). Compostos fenólicos e outras substâncias presentes na madeira podem restringir o desenvolvimento fúngico, enquanto características anatômicas podem dificultar a penetração e o avanço das hifas. Assim, diferentes espécies de madeira podem apresentar respostas distintas à ação de fungos com diferentes estratégias de degradação (Sundararaj et al., 2015; Zabel & Morrell, 2020; Kirker et al., 2024).

Nesse contexto, a redução do uso de preservantes convencionais, como o arseniato de cobre cromatado (CCA) e o creosoto, reforça a importância da caracterização de espécies nativas quanto à sua resistência natural. A identificação de madeiras naturalmente mais resistentes pode contribuir para o uso racional desses recursos e para o desenvolvimento de alternativas com menor impacto ambiental.

Diante disso, o objetivo deste trabalho foi correlacionar a perda de massa e a resistência natural de *Virola michelii* e *Qualea dinizii* aos padrões de colonização e degradação produzidos por quatro fungos xilófagos, identificando possíveis vias de invasão e características anatômicas associadas à suscetibilidade e à resistência da madeira.

2. Materiais e métodos

O estudo foi conduzido nos Laboratórios de Biodegradação e Preservação da Madeira e de Anatomia da Madeira do Laboratório de Produtos Florestais (LPF/SFB), em Brasília, Distrito Federal. O ensaio de apodrecimento acelerado foi realizado com adaptações das normas AWPA E10-16 e ASTM D 2017-05. Foram utilizados corpos de prova contendo cerne e alburno de *Virola michelii* e *Qualea dinizii*, com dimensões de 14 × 14 × 14 mm. Antes da exposição aos fungos, as amostras foram climatizadas até aproximadamente 12% de teor de umidade.

As culturas fúngicas foram obtidas da Coleção de Culturas de Fungos Xilófagos (CCFX) do LPF. *Trametes versicolor* e *Inonotus rickii* foram utilizados como representantes de fungos de podridão branca, enquanto *Gloeophyllum trabeum* e *Gloeophyllum striatum* representaram fungos de podridão parda.

O substrato utilizado no ensaio foi constituído por Latossolo Vermelho proveniente da Fazenda Água Limpa da Universidade de Brasília, com pH e capacidade de retenção de água ajustados conforme a AWPA E10-16. Placas alimentadoras de *Cecropia sp.* foram empregadas para os fungos de podridão branca e placas de *Pinus sp.* para os fungos de podridão parda. Após a colonização das placas, os corpos de prova foram incubados por 16 semanas em condições controladas.

2.1 Avaliação de durabilidade e análise ultraestrutural

A resistência natural foi determinada pela perda de massa percentual. Após a incubação, os corpos de prova foram cuidadosamente limpos, secos em estufa a 103 ± 2 °C até massa constante e pesados. A perda foi calculada pela diferença entre as massas secas inicial e final, em relação à massa inicial. Conforme a ASTM D 2017-05, as madeiras foram classificadas como altamente resistentes (0-10%), resistentes (11-24%), moderadamente resistentes (25-44%) ou não resistentes (≥45%).

2.2 Análise ultraestrutural por microscopia eletrônica de varredura

As análises qualitativas foram realizadas por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) seguindo procedimentos adotados pelo Laboratório de Anatomia da Madeira do LPF. Foram retiradas lâminas finas das faces transversal e longitudinal tangencial dos corpos de prova, antes e após o ensaio de apodrecimento acelerado, utilizando um micrótono de deslizamento, para preparação das superfícies destinadas à análise microscópica. As amostras foram analisadas em microscópio eletrônico de varredura Hitachi TM4000 Plus, sob vácuo, visando observar a colonização fúngica por meio da presença de hifas e as alterações estruturais dos elementos anatômicos da madeira, como vasos, fibras e parênquimas.

2.3 Análise estatística

Após verificação dos pressupostos da análise e a identificação de possíveis valores discrepantes, os dados foram submetidos à análise de variância (ANOVA). As médias foram comparadas pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade ($p < 0,05$), utilizando o software IBM SPSS Statistics 26.

3. Resultados e discussão

A perda de massa variou em função da combinação fungo-madeira (Tabela 1). *Virola michelii* foi classificada como não resistente a *Trametes versicolor* (74,64%), *Gloeophyllum trabeum* (61,80%) e *Gloeophyllum striatum* (46,67%), e moderadamente resistente a *Inonotus rickii* (29,01%). *Qualea dinizii* foi não resistente a *G. trabeum* (58,43%) e *G. striatum* (46,68%), moderadamente resistente a *T. versicolor* (27,61%) e altamente resistente a *I. rickii* (3,34%).

Observou-se grande variação na perda de massa entre as diferentes combinações fungo-madeira. Enquanto *V. michelii* apresentou elevada perda de massa quando exposta *T. versicolor* (74,64%), *Q. dinizii* apresentou apenas 3,34% de perda quando submetida a *I. rickii*. Essa diferença de 71,30 pontos percentuais evidencia a forte influência da interação entre a espécie de madeira e o fungo sobre a resistência natural, indicando que a resposta da madeira à biodeterioração depende das características de ambos os organismos (Schrader et al., 2025).

A elevada perda de massa de *V. michelii* submetida a *T. versicolor* foi acompanhada, nas imagens de MEV, por alterações estruturais, incluindo colapso de vasos e fibras e a degradação do parênquima radial. Esses resultados são compatíveis com a ação degradativa

de fungos de podridão branca e com alterações descritas em madeiras expostas a T. versicolor (Bari et al., 2015; Bari et al., 2019).

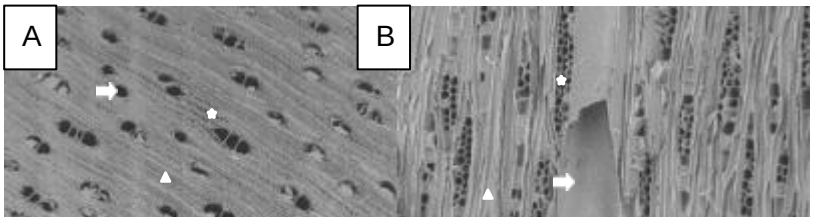
Tabela 1. Perda de massa e classe de resistência de Virola michelii e Qualea dinizii após exposição a diferentes fungos xilófagos

Espécies		Perda de massa (%)	
		Virola michelii	*Qualea dinizii*
Trametes versicolor	Δm	74,64d	27,61b
	Classe	NR	RM
Gloeophyllum trabeum	Δm	61,80c	58,43d
	Classe	NR	NR
Inonotus rickii	Δm	29,01a	3,34a
	Classe	RM	AR
Gloeophyllum striatum	Δm	46,67b	46,68c
	Classe	NR	NR

Letras diferentes na mesma coluna indicam diferença significativa pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.
Δm - Perda de massa; Classe: AR - Altamente Resistente; R - Resistente; RM - Resistência Moderada e NR - Não Resistente.

A MEV permitiu observar alterações anatômicas associadas à deterioração fúngica. Nas amostras de *V. michelii* atacadas por *T. versicolor*, foram observadas hifas nos lumens, coalescência de vasos, perda de definição entre células adjacentes e degradação das fibras (Figura 1). Esses padrões são compatíveis com a ação de fungos de podridão branca, que podem degradar lignina e polissacarídeos da parede celular, comprometendo a integridade do tecido (Schwarze, 2007; Goodell, 2020; Bari et al., 2019).

A presença de hifas em vasos e pontoações sugere a utilização dessas estruturas como vias de colonização da madeira, enquanto as alterações nas paredes celulares evidenciam a intensidade da deterioração. Esses resultados são coerentes com a elevada perda de massa observada para essa combinação fungo-madeira (74,64%), reforçando a contribuição da MEV para a interpretação dos resultados gravimétricos.



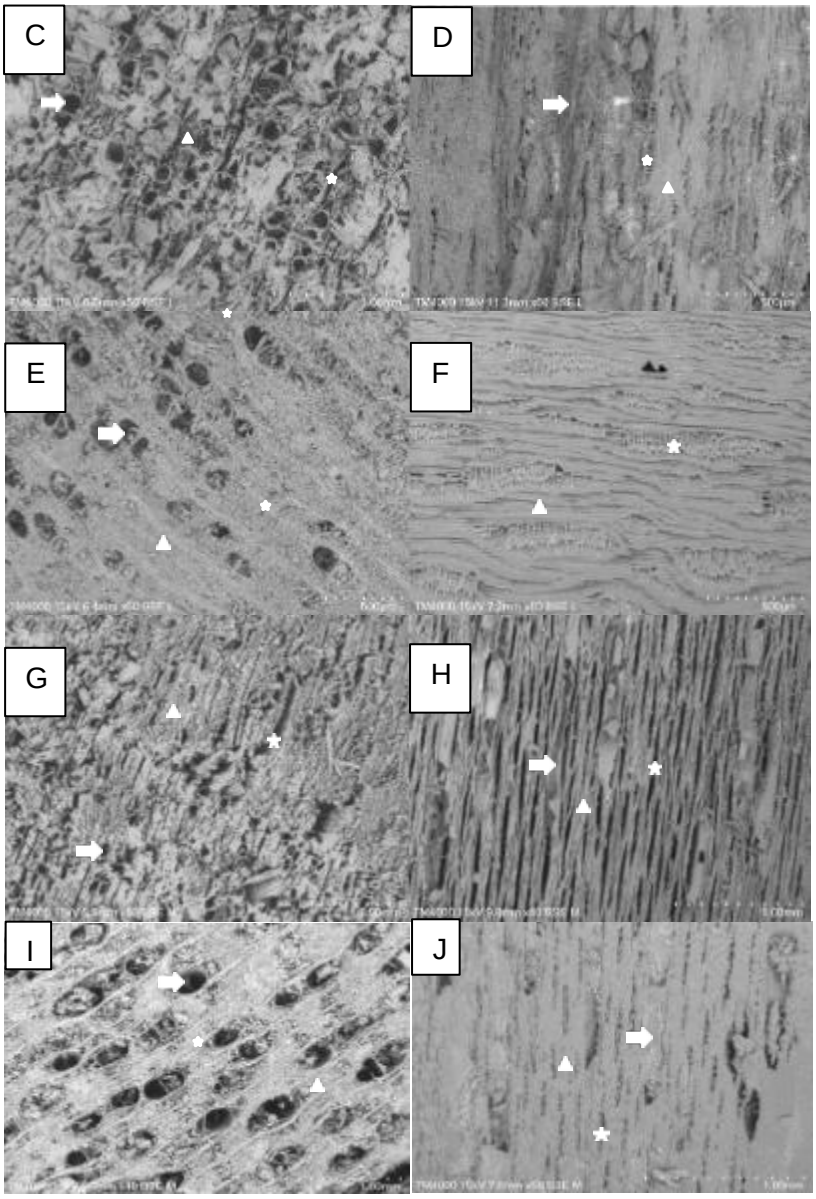

C
D
E
F
G
H
I
J

Figura 1. Micrografias obtidas por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) da espécie madeireira *Virola michelii* nas seções transversais e longitudinais tangenciais. As letras A e B correspondem às faces transversais e longitudinais tangenciais antes do ataque fúngico, respectivamente. As letras A, C, E, G e I correspondem às seções transversais, enquanto B, D, F, H e J representam as seções longitudinais tangenciais. A degradação produzida por ação fúngica: C e D – *Trametes versicolor*; E e F – *Gloeophyllum trabeum*; G e H – *Inonotus rickii*; e I e J – *Gloeophyllum striatum*. Setas indicam vasos e elementos de vaso; triângulos: fibras e estrelas: parênquima radial.

Nos tratamentos com os fungos de podridão parda *G. trabeum* e *G. striatum*, as micrografias evidenciaram alterações características desse tipo de deterioração, incluindo delaminação e fissuração das paredes celulares, além de sinais de colonização das estruturas anatômicas (Figura 2). A podridão parda caracteriza-se pela degradação preferencial de celulose e hemiceluloses, com relativa preservação e modificação da lignina, o que pode resultar na perda de coesão da parede celular e no desenvolvimento da chamada “quebra cúbica”, que traz a redução das propriedades mecânicas da madeira, mesmo em estágios iniciais do ensaio de apodrecimento (Schwarze, 2007; Goodell, 2020; Ponzecchi et al., 2024). A degradação dos polissacarídeos pode ocorrer por mecanismos oxidativos associados à produção de agentes de baixo peso molecular, capazes de despolimerizar celulose e hemiceluloses antes de ampla penetração hifal (Goodell, 2020; Ponzecchi et al., 2024).

Em *Q. dinizii* exposta a *I. rickii*, a baixa perda de massa (3,34%) foi acompanhada por baixa colonização e maior preservação de vasos, fibras e parênquima (Figura 2). Esse resultado é coerente com a classificação da espécie como altamente resistente e indica que a presença de hifas, por si só, não implica necessariamente em intensa degradação da madeira. A resistência pode estar relacionada à interação entre características anatômicas, físicas e químicas da madeira, como densidade, permeabilidade, composição da lignina e presença de extrativos, cuja contribuição específica requer análises complementares (Santos et al., 2011; Sundararaj et al., 2015; Zabel & Morrell, 2020).

A presença de hifas em lumens e pontoações nas diferentes combinações demonstra que essas estruturas podem atuar como vias de colonização da madeira. Entretanto, a intensidade da deterioração parece estar relacionada não apenas à colonização, mas à capacidade do fungo de promover alterações na parede celular. Nesse contexto, características da madeira podem limitar a progressão da deterioração e a ação dos metabólitos fúngicos. A composição e a distribuição da lignina também podem contribuir para essa resistência, uma vez que diferenças estruturais entre os tipos de lignina e sua localização na parede celular podem influenciar a susceptibilidade à degradação (Medeiros Neto et al., 2024; Bari et al., 2018; Goodell, 2020; Tsukida et al., 2024).

De modo geral, as imagens de MEV permitiram identificar três padrões associados às diferentes interações fungo-madeira: erosão e perda de coesão celular na podridão branca intensa; delaminação, fissuração e alterações compatíveis com quebra cúbica na podridão parda; e maior preservação dos tecidos com baixa colonização nas interações resistentes. Esses padrões foram coerentes com os resultados de perda de massa e reforçam a utilidade da MEV na caracterização dos processos de biodeterioração da madeira.

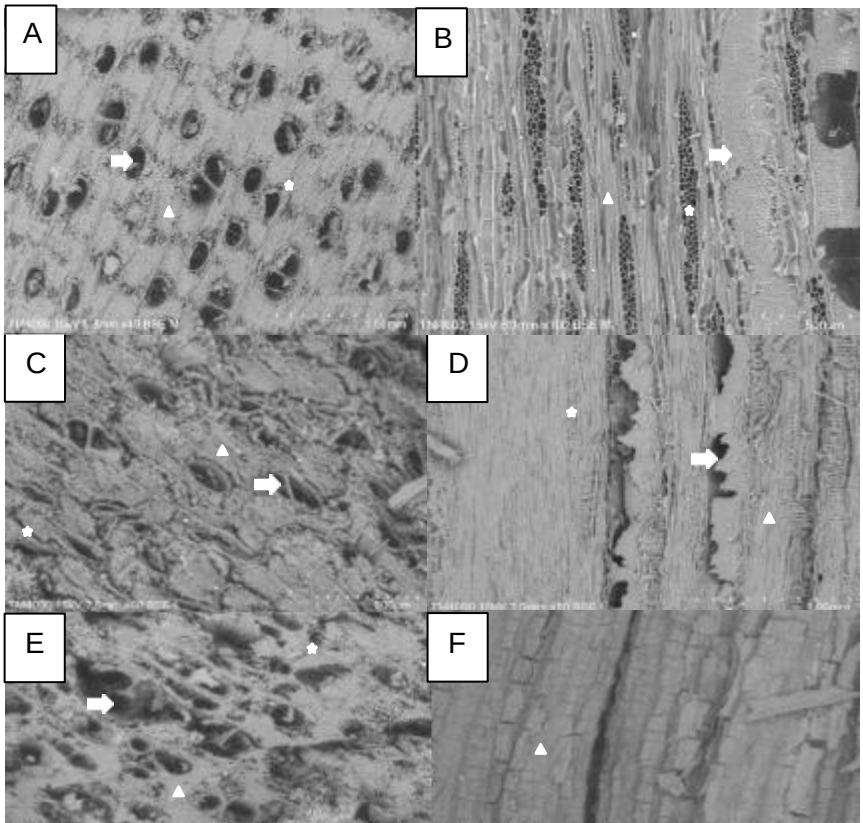


Figura 2. Micrografias obtidas por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) da espécie madeireira *Qualea dinizii* nas faces transversais e longitudinais tangenciais. As letras A e B correspondem às faces transversais e longitudinais tangenciais antes do ataque fúngico, respectivamente. As letras A, C, E, G e I correspondem às seções transversais, enquanto B, D, F, H e J representam as seções longitudinais tangenciais. A degradação produzida por ação fúngica: C e D – *Trametes versicolor*; E e F – *Gloeophyllum trabeum*; G e H – *Inonotus rickii*; e I e J – *Gloeophyllum striatum*. Setas indicam vasos e elementos de vaso; triângulos: fibras e estrelas: parênquima radial.

4. Conclusões

A integração entre perda de massa e as observações em MEV demonstrou que a resistência da madeira variou de acordo com a interação fungo-madeira. *Virola michelii* apresentou maior suscetibilidade a *Trametes versicolor*, com 74,64% de perda de massa e alterações estruturais nos vasos, fibras e parênquima, enquanto *Qualea dinizii* apresentou maior resistência a *Inonotus rickii*, com apenas 3,34% de perda de massa e maior preservação da estrutura celular.

A podridão branca esteve associada à erosão e à perda de coesão dos tecidos, enquanto a podridão parda apresentou delaminação e fissuras compatíveis com os padrões de deterioração característicos desse tipo de fungo. As observações em MEV corroboraram as classes de resistência determinadas pela perda de massa, permitindo caracterizar diferentes padrões de deterioração nas interações fungo-madeira .

Os resultados demonstram o potencial da MEV como ferramenta complementar na avaliação da durabilidade natural de madeiras amazônicas, contribuindo para a compreensão dos padrões de biodeterioração e para o uso mais racional dessas espécies. Estudos futuros envolvendo densidade, permeabilidade, composição da lignina e extrativos, além de ensaios de campo, poderão aprofundar a compreensão dos fatores associados à resistência observada .

5. Agradecimentos

A autora agradece à colaboração de sua orientadora Anna Sofya Vanessa S. da Silva por ter ajudado a esclarecer o caminho para a produção deste estudo, e ao Laboratório de Produtos Florestais do Serviço Florestal Brasileiro (LPF/SFB), à Fundação de Tecnologia Florestal e Geoprocessamento (FUNTEC) e às equipes dos Laboratórios de Biodegradação e Preservação da Madeira e de Anatomia da Madeira pelo apoio técnico e institucional.

6. Referências bibliográficas

American Society for Testing and Materials. (2005). ***ASTM D 2017-05: Standard test method of accelerated laboratory test of natural decay resistance of woods***. West Con-shohocken. ASTM International.

American Wood Protection Association. (2016). ***AWPA E10-16: Laboratory method for evaluating the decay resistance of wood-based materials against pure Basidiomy-cetes cultures: soil/block test***. Birmingham, AWPA.

Bari, E., Nazarnezhad, N., Kazemi, S. M., Tajick Ghanbary, M. A., Mohebby, B., Schmidt, O., & Clausen, C. A. (2015). Comparison between degradation capabilities of the white rot fungi *Pleurotus ostreatus* and *Trametes versicolor* in beech wood. ***Inter-national Biodeterioration & Biodegradation***, 104, 231–237.

Bari, E., Mohebby, B., Naji, H. R., Oladi, R., Yilgor, N., Nazarnezhad, N., Ohno, K. M., & Nicholas, D. D. (2018). Monitoring the cell wall characteristics of degraded beech wood by white-rot fungi: Anatomical, chemical, and photochemical study. ***Maderas. Ciencia y tecnología***, 20(1), 35–56.

Bari, E., Daryaei, M. G., Karim, M., Bahmani, M., Schmidt, O., Woodward, S., Sistani, A., & Tajick Ghanbary, M. A. (2019). Decay of *Carpinus betulus* wood by *Trametes versicolor* – An anatomical and chemical study. ***International Biodeterioration & Biodegradation***, 137, 68–77.

Goodell, B. (2020). Fungi involved in the biodeterioration and bioconversion of ligno-cellulose substrates. Em U. Kuck & D. Hoffmeister (Eds.), ***The Mycota II: Genetics and Biotechnology*** (pp. 369–397). Springer.

Guerbe, E. C. L. (2025). ***Atividade lignocelulolítica de fungos associados às podridões branca e parda na caracterização da durabilidade natural de duas espécies de madeiras da Floresta Nacional do Tapajós/PA*** (Relatório Final PIBIC/SFB). Serviço Florestal Brasileiro.

Kirker, G. T., Blodgett, A. B., Lebow, P. K., Clausen, C. A., & Arango, R. A. (2024). Critical review on the use of extractives of naturally durable woods as natural wood protectants. ***Insects*** 15(1), 69.

Medeiros Neto, P. N., et al. (2024). Resistência biológica e agentes deterioradores da madeira. Em J. K. B. Andrade (Ed.), ***Fundamentos e pesquisas em ciências ambientais e agrárias*** (pp. 73–89). Licuri.

Ponzecchi, A., Alfredsen, G., Fredriksson, M., Thybring, E. E., & Thygesen, L. G. (2024). Localization and characterisation of brown rot in two types of acetylated wood. ***Cellulose***, 31, 1875-1890.

Santos, F. V., et al. (2011). Phytochemical screening and antioxidant activity of *Qualea* species. ***Archives of Biological Sciences***, 65(1), 191–195.

Schrader, L., Brischke, C., Trautner, J., & Tebbe, C. C. (2025). Microbial decay of wooden structures: Actors, activities and means of protection. Applied Microbiology and Biotechnology, 109, 59.

Schwarze, F. W. M. R. (2007). Wood decay under the microscope. ***Fungal Biology Reviews***, 21, 133–170.

Silva, A. S. V. S., et al. (2023). Characterization of white and brown rot fungi applied to the decay of Caatinga biome wood (*Swartzia psilonema* Harms) from Brazil. ***Current Research in Environmental and Applied Mycology***, 13(1), 104–122.

Schmidt, O. Wood and tree fungi: biology, damage, protection, and use. Berlin: Springer-Verlag, 2006.

Sundararaj, R., et al. (2015). Natural durability of timbers under Indian environmental conditions – an overview. ***International Biodeterioration & Biodegradation***, 103, 196–214.

Tsukida, R., et al. (2024). Micromorphological features of brown-rotted wood revealed by scanning electron microscopy. ***Scientific Reports***, 14, 1–10.

Zabel, R. A., & Morrell, J. J. (2020). Wood Microbiology: Decay and Its Prevention (2nd ed.). ***Elsevier***, Academic Press.

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Caracterização anatômica da madeira de *Tectona grandis* L.f. de dois locais de plantio

Ana Rafaelly Jacob da Silva[1]; Francyele dos Santos Correia[1]; Waldelaine Rodrigues Hoffman[2]; Bárbara Luísa Corradi Pereira[1]; Aylson Costa de Oliveira[1]

[1] Laboratório de Tecnologia da Madeira, Faculdade de Engenharia Florestal, Universidade Federal de Mato Grosso, Brasil
[2] Programa de Pós-Graduação em Recursos Florestais, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Brasil.

Resumo: Este estudo avaliou o efeito de dois locais de plantio e da posição radial nas características anatômicas da madeira de *Tectona grandis* L. f. Foram avaliadas árvores clonais de 15 a 16 anos, provenientes de Barra do Bugres–MT e Santa Maria da Barreira–PA. De cada árvore, retirou-se um disco a 2,7 m de altura, obtendo-se amostras radiais representativas das idades de 3 e 13 anos, considerando os anéis de crescimento. Foram mensurados comprimento, largura, diâmetro do lume e espessura da parede celular das fibras. O local de plantio e a posição radial influenciaram o comprimento das fibras e a espessura da parede celular, com maiores valores nas árvores do Pará e aos 13 anos 1040,48 µm e 5,47 µm. A largura das fibras e o diâmetro do lume não diferiram significativamente, apresentando médias gerais de 28,38 e 17,88 µm. Conclui-se que o ambiente e a idade influenciam parte das características anatômicas da madeira de teca, relacionadas à qualidade tecnológica.

Palavras-chave: Teca; Fibras; Clones.

Anatomical characterization of *Tectona grandis* L.f. wood from two planting sites

Abstract: This study evaluated the effect of two planting sites and radial position on the anatomical characteristics of *Tectona grandis* L. f. wood. Clonal trees aged 15–16 years from Barra do Bugres (MT) and Santa Maria da Barreira (PA) were analyzed. A disk was removed from each tree at a height of 2.7 m, yielding radial samples representative of ages 3 and 13 years, based on the growth rings. Fiber length, width, lumen diameter, and cell wall thickness were measured. Planting site and radial position influenced fiber length and cell wall thickness, with higher values in Pará trees at 13 years (1040.48 µm and 5.47 µm). Fiber width and lumen diameter did not differ significantly, showing overall means of 28.38 µm and 17.88 µm. It is concluded that environment and age affect some anatomical traits of teak wood, related to its technological quality.

Keywords: Teak; Fibers; Clones.

1. Introdução

A espécie *Tectona grandis* L. f., conhecida popularmente como teca, é originária das florestas tropicais do Sudeste Asiático. Seu melhor desenvolvimento ocorre em regiões de clima tropical quente e úmido, com precipitação média anual entre 1.200 e 2.500 mm, temperatura média anual entre 22 e 27 ºC, período seco de três a cinco meses e altitudes preferencialmente inferiores a 900 m (Reis et al., 2023a).

Reconhecida internacionalmente pela elevada qualidade e pelo alto valor comercial de sua madeira, a teca destaca-se como uma das principais espécies tropicais de madeira nobre. A espécie vem sendo cultivada em plantios comerciais em sua região de ocorrência natural e outros locais do mundo, com ampla adaptação, em diversas regiões tropicais, como África, América, Ásia e Oceania (Tomaselli; Hirakuri,2023).

A participação brasileira no cultivo de teca se destaca na América Latina (Reis et al., 2023b), refletindo a importância da espécie nas florestas plantadas comerciais. No Brasil, a área plantada com teca, em 2022, foi estimada em aproximadamente 64.000 hectares, posicionando o país entre os maiores produtores de teca fora da Ásia, com destaque para o estado de Mato Grosso, que concentra a maior área de cultivo (Kollert & Sreelakshmy, 2022). Outro estado brasileiro que vem investindo na teca é o Pará, onde os plantios comerciais são, em grande parte, resultado de investimentos estrangeiros e de produtores locais (Behling & Wruck, 2023).

O crescimento e o desenvolvimento da espécie variam conforme as condições edafoclimáticas e o sítio de plantio, com diferenças significativas no desempenho produtivo entre localidades (Vendruscolo et al., 2019). As características da madeira podem variar conforme a idade da árvore, o local de plantio, o material genético e as diferentes posições ao longo do fuste e no sentido radial (Nutto, 2020).

Considerando que fatores genéticos e ambientais influenciam diretamente as propriedades da madeira, mesmo materiais clonais podem apresentar variações e particularidades em função do local de cultivo (De Souza et al., 2024). Assim, a caracterização da madeira torna-se essencial, pois permite compreender a organização de seus elementos constituintes e seu comportamento frente às diferentes aplicações, sendo fundamental para determinar seu potencial de utilização, pois a qualidade da madeira está diretamente associada ao seu uso final e ao tipo de produto a ser obtido

Entre essas propriedades, as análises anatômicas se referem à avaliação das células que compõem os tecidos da madeira e estão diretamente relacionadas às demais características tecnológicas do material (Chagas et al., 2014). A estrutura anatômica da madeira é de grande importância, pois influencia diretamente propriedades como resistência, durabilidade e

comportamento durante a secagem e uso da madeira. Elementos como fibras e vasos apresentam variações dimensionais e quantitativas conforme a idade da árvore e a posição no tronco, afetando o aproveitamento industrial do material. Essas variações interferem no desempenho da madeira e contribuem para a definição de usos mais adequados (Bonduelle et al., 2015).

Diante desse contexto, torna-se fundamental o desenvolvimento de pesquisas que avaliem como os locais de plantio influencia a anatomia da madeira de teca. Assim, este estudo teve como objetivo avaliar o efeito de dois locais de plantio e da posição radial nos parâmetros anatômicos (comprimento, largura, diâmetro do lume e espessura da parede das fibras) da madeira de teca.

2. Material e métodos

Para a realização deste estudo, foram utilizadas árvores clonais de *Tectona grandi*s (Clone B), provenientes de plantios comerciais homogêneos pertencentes à empresa Teak Resources Company (TRC), localizados em duas regiões do Brasil. Os plantios estão situados nos municípios de Barra do Bugres – MT (14°54′21.03″ S, 57°59′35.86″ W), com árvores de aproximadamente 16 anos de idade, e Santa Maria da Barreira – PA (8°42′32.16″ S, 50°25′47.57″ W), com árvores de cerca de 15 anos. Em ambos os locais, o espaçamento inicial adotado foi de 4 × 4 m, sendo aplicadas práticas silviculturais semelhantes, incluindo desrama anual.

Barra do Bugres-MT possui clima Aw (tropical de savana), com estação seca bem definida, enquanto Santa Maria das Barreiras-PA apresenta clima Am (monçônico tropical), em transição para Aw (Beck et al., 2018). Essa diferença climática, junto com a condição edáfica foram os critérios para a escolha dos locais, visando avaliar como ambientes contrastantes influenciam a formação e a qualidade do lenho de teca.

Em cada local, foram selecionadas seis árvores, distribuídas em duas árvores por classe de diâmetro previamente definida, com variação total de 25 a 51 cm. De cada árvore, foi retirado um disco com espessura de 5 cm, na altura de 2,7 m do solo, correspondente ao final da primeira tora comercial (Figura 1). Em seguida, os discos foram submetidos ao lixamento e polimento no plano transversal. Em seguida, foi retirada uma baqueta diametral abrangendo o intervalo radial correspondente às idades de 3 a 13 anos (Figura 1), da qual foram obtidos os corpos de prova. Os segmentos radiais de 3 e 13 anos foram definidos por meio da contagem dos anéis de crescimento, de modo a representar o lenho juvenil (3 anos) e o lenho em transição para adulto

(13 anos). Para realizar os estudos anatômicos, foram obtidas amostras correspondentes a esses segmentos radiais, totalizando 24 amostras.

A caracterização microscópica das fibras foi realizada de acordo com a ABNT NBR 15066 (ABNT, 2004), utilizando material macerado para confecção de lâminas temporárias. Para isso, fragmentos de madeira foram retirados e acondicionados em tubos para maceração, com adição da solução macerante e permanência em estufa a 60 °C por 48 horas (Figura 1). Após a maceração, as amostras foram lavadas, coradas com azul de Astra para montagem de lâminas temporárias e analisadas em microscópio óptico acoplado à câmera, com captura das imagens via software Zen Blue (Figura 1).

Foram realizadas mensurações do comprimento e da largura das fibras em cada seção radial, com a seleção de 15 fibras por amostra, bem como do diâmetro do lume e da espessura da parede celular, também com 15 medições por amostra. Também foram realizadas as mensurações das características anatômicas dos vasos, conforme a metodologia descrita na ABNT NBR 15066 (ABNT, 2004).



Figura 1 – Procedimento metodológico para caracterização dos parâmetros morfológicos das fibras de teca de dois locais de plantio.

Os dados foram submetidos à análise de variância (ANOVA), considerando os fatores local de plantio e posição radial. Antes da aplicação da ANOVA, foram verificados os pressupostos de normalidade dos resíduos pelo teste de Shapiro-Wilk e de homogeneidade de variâncias pelo teste de Levene. Quando constatadas diferenças significativas, as médias dos tratamentos foram comparadas pelo teste de Tukey a 5% de significância. As análises foram realizadas no software R, versão 4.3.3 (R Core Team, 2024).

3. Resultados e discussão

O comprimento das fibras foi influenciado pelo local de plantio e pela posição radial, apresentando maiores valores nas árvores provenientes de Santa Maria da Barreira (PA) e na região correspondente aos 13 anos de crescimento (Figura 2). Para a variável largura das fibras não houve diferença (Figura 2).

Figura 2 – Valores médios do comprimento das fibras (A–B) e largura das fibras (C–D), da madeira de *Tectona grandis*, em função do local de plantio e da posição radial (idade). Médias seguidas por letras distintas diferem entre si pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$).

O comprimento das fibras da madeira de teca variou entre 962 e 1071 µm (Figura 2A–B), sendo maior nas árvores do Pará (1040 µm) e aos 13 anos de crescimento (1071 µm). Esse resultado mostra que tanto o ambiente quanto a idade influenciam o alongamento das fibras, indicando o amadurecimento do lenho. Rodriguez-Anda et al. (2018) observaram que o comprimento das fibras tende a aumentar no sentido medula–casca em madeira de teca, evidenciando a influência da idade e da posição radial. Benedetti (2018) verificou que o aumento do comprimento das fibras está associado à maior densidade e resistência da madeira, como resultado da deposição de parede secundária ao longo do crescimento. Da mesma forma, Canal (2017) descreveu que o desenvolvimento do cerne e o crescimento radial favorecem o aumento das dimensões anatômicas, especialmente do comprimento das fibras, melhorando as propriedades físicas e mecânicas.

O comprimento das fibras acompanha a transição de lenho juvenil para adulto, quando há maior deposição de lignina e melhor organização das células, contribuindo para uma

estrutura mais resistente e estável (Eloy et al., 2024). A ausência de interação significativa entre local e idade indica que o efeito da idade é semelhante nas duas regiões, reforçando o padrão esperado para madeiras de corte final, com fibras mais longas e de melhor qualidade para uso.

A largura das fibras apresentou valores médios estáveis, variando entre 28,0 e 28,6 µm (Figura 2C–D), sem diferença significativa entre locais ou idades. Esse comportamento já foi descrito em estudos anteriores com teca jovem cultivada em diferentes regiões, que também observaram variações discretas e sem tendência definida (Chagas et al., 2014; Benedetti, 2018).

Para o diâmetro do lume, os valores médios ficaram entre 17,6 e 18,2 µm, sem diferenças significativas entre os tratamentos. Já a espessura da parede celular apresentou diferenças significativas em função do local de plantio e da posição radial (Figura 3), com valores médios de 4,99 µm em MT e 5,47 µm no PA, além de maior espessura aos 13 anos (5,52 µm) em comparação aos 3 anos (4,95 µm).

Figura 3 – Valores médios do diâmetro do lume (A–B) e espessura da parede celular (C–D) da madeira de *Tectona grandis*, em função do local de plantio e da posição radial (idade). Médias seguidas por letras distintas diferem entre si pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$).

O diâmetro do lúmen apresentou valores próximos entre os locais e as idades avaliados (Figura 3A–B), sem diferença estatística significativa. Esse comportamento confirma o observado por Rodriguez-Anda et al. (2018), que verificaram variações numéricas entre diferentes sítios, porém sem um padrão definido. De forma semelhante, Souza et al. (2019) também não identificaram diferenças consistentes entre os ambientes avaliados. Dessa forma, o diâmetro do lúmen da madeira de teca tende a permanecer estável, mesmo sob diferentes condições ambientais e em idades próximas.

A espessura da parede celular das fibras foi maior nas amostras provenientes do Pará (5,47 µm) e aos 13 anos de idade (5,52 µm) em comparação ao Mato Grosso (4,99 µm) e aos 3 anos (4,95 µm) (Figura 3C–D), apresentando diferença significativa pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). Rodriguez-Anda et al. (2018) observaram que a espessura da parede das fibras tende a aumentar no sentido medula–casca em madeira de teca, resultado que está de acordo com o maior valor observado na região externa do disco, correspondente aos 13 anos. Esse comportamento também foi descrito por Souza et al. (2019), que relacionaram o aumento da espessura da parede à maturação do lenho, acompanhada por alterações no comprimento das

fibras e no diâmetro do lúmen. Além disso, Souza (2024) destacou que as condições ambientais podem influenciar a formação estrutural da madeira, incluindo características relacionadas à densidade e à resistência mecânica. Como a espessura da parede celular está diretamente associada à densidade básica e às propriedades mecânicas da madeira, os resultados reforçam sua importância como um parâmetro anatômico relacionado à qualidade da madeira de *Tectona grandis*.

4. Conclusões

O local de plantio e a posição radial influenciaram o comprimento das fibras e a espessura da parede celular da madeira de *Tectona grandis* L.f., com maiores valores nas árvores do Pará e aos 13 anos. Essas características estão associadas à maior densidade e resistência, indicando que ambientes favoráveis e maior idade contribuem para a produção de madeira de melhor qualidade, adequada a usos estruturais e de maior durabilidade.

5. Agradecimentos

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela concessão da bolsa de pesquisa. Ao Laboratório de Tecnologia da Madeira da Universidade Federal de Mato Grosso (UFMT) pela infraestrutura e pelo suporte técnico disponibilizados. À empresa Teak Resources Company (TRC) pelo fornecimento do material utilizado na pesquisa.

6. Referências bibliográficas

Beck, H. E., Zimmermann, N. E., McVicar, T. R., Vergopolan, N., Berg, A., & Wood, E. F. (2018). Present and future Köppen-Geiger climate classification maps at 1-km resolution. *Scientific Data*, *5*, 180214. https://doi.org/doi: 10.1038/sdata.2018.214.

Behling, M., & Wruck, F. J. (2023). Sistemas de integração com teca. Em C. A. F. Reis & E. B. Oliveira (Eds.), Teca (*Tectona grandis* L. f. no Brasil) (pp. 381–426). Embrapa Florestas.

Benedetti, V. (2018). *Caracterização da madeira de teca plantada em diferentes idades e regiões para produção de piso* (Dissertação de mestrado). Universidade de São Paulo, Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz".

Bonduelle, G. M., Iwakiri, S., Trianoski, R., Prata, J. G., & Rocha, V. Y. (2015). Análise da massa específica e da retratibilidade da madeira de *Tectona grandis* nos sentidos axial e radial do tronco. *Floresta*, *45*(4). https://doi.org/10.5380/rf.v45i4.31991

Canal, W. D. (2017). *Efeito da idade e da posição radial nas propriedades anatômicas, físicas e químicas da madeira de Tectona grandis* (Dissertação de mestrado). Universidade Federal de Viçosa.

Chagas, S. F., Evangelista, W. V., Silva, J. C., & Carvalho, A. M. M. L. (2014). Propriedades da madeira de teca de diferentes idades e oriundas de desbaste. *Ciência da Madeira (Brazilian Journal of Wood Science)*, *5*(2), 138–150. https:// doi.org/10.12953/2177-6830.v05n02a08

De Souza, L. V. C., Da Silva, J. E. C., Azevedo, T. L. B., Mascarenhas, A. R. P., Ugalde Arias, L. A., Pereira, B. L. C., & Oliveira, A. C. (2024). Wood quality of young *Tectona grandis* L. f. trees and its relationship with genetic material and planting site in Mato Grosso, Brazil. *Forests*, *15*(5), Article 860. https://doi.org/10.3390/f15050860

Eloy, E., Mangini, T. D. S., Nardini, C., Caron, B. O., Trevisan, R., & Santos, A. D. (2024). Correlation of anatomy with physical properties of wood species from an agroforestry system. *Revista Árvore*, *48*(1). https://doi.org/10.53661/1806-9088202448263657

Kollert, W., & Sreelakshmy, S. S. M. P. (2022). *Global teak resources and market assessment 2022*. International Union of Forest Research Organizations (IUFRO).

Nutto, L. (2020). Apresentação. Em G. B. Vidaurre, J. G. M. Silva, & colaboradores (Eds.), *Qualidade da madeira de espécies florestais brasileiras* (p. 221). EDUFES.

Reis, C. A. F., Oliveira, E. B., & Santos, A. M. (Eds.). (2023). *Teca (Tectona grandis* L. f. *no Brasil)*. Embrapa Florestas.

Reis, C. A. F., Santos, A. M., & Rangel, A. D. C. M. (2023). Caracterização da espécie *Tectona grandis* L. f. (teca). Em C. A. F. Reis & E. B. Oliveira (Eds.), *Teca (Tectona grandis* L. f. *no Brasil)* (pp. 15-44). Embrapa Florestas.

Rodriguez-Anda, R., Fuentes-Talavera, F. J., Silva-Guzmán, J. A., Palacios-Juárez, H., & Turrado-Saucedo, J. (2018). Relationship of the cellular structure of teak wood (*Tectona grandis* L. f.) with different ages and growth sites. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, *24*(1), 101–114. https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2017.07.050

Souza, L. V. C. (2024). *Qualidade da madeira de Tectona grandis L. f. produzida em sistema silvipastoril e em monocultura* (Dissertação de mestrado). Universidade Federal de Mato Grosso.

Souza, R. S., Gonçalez, J. C., Ribeiro, E. S., & Gontijo, A. B. (2019). Anatomical characteristics of *Tectona grandis* L. f. from different sites in Mato Grosso State. *Ciência Florestal*, *29*(4), 1528–1537. https://doi.org/10.5902/1980509834563

Tomaselli, I., & Hirakuri, S. R. (2023). Mercado mundial da madeira de teca. In C. A. F. Reis & E. B. de Oliveira (Eds.), *Teca (Tectona grandis L. f.) no Brasil* (Cap. 2, pp. 46–78). Brasília, DF: Embrapa Florestas.

Vendruscolo, D. G. S., Drescher, R., Carvalho, S. P. C. E., Medeiros, R. A., Môra, R., & Soares, A. A. V. (2019). Dominant height growth in *Tectona grandis* plantations in Mato Grosso, Brazil. *Floresta e Ambiente*, *26*(4). https://doi.org/10.1590/2179-8087.070317

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Caracterização cromática de madeiras tropicais e potencial de substituição no setor moveleiro

Karen Tawany de Abreu Viana[1]; Erica Vitoria de Almeida Silva[1]; Iris Izabel da Silva Cavalcante[1]; Shara Dias de Amorim[1]; Vitória Laurinda de Souza[1]; Neila Cristina de Lima Fernandes[1]; Patrícia Gomes Ribeiro[2]

[1,2]Universidade Federal do Acre - UFAC

Resumo: A caracterização da cor da madeira é um atributo importante para sua identificação, classificação e aplicação no setor moveleiro. Este estudo teve como objetivo avaliar a similaridade cromática de 21 espécies tropicais comerciais por meio da colorimetria no sistema CIELAB. As analises foram realizadas por meio da determinação dos parâmetros L*, a* e b*, bem como os derivados C* e h°, foram determinados com espectrofotocolorímetro sob iluminante D65. A estrutura dos dados foi analisada por técnicas multivariadas, incluindo análise de componentes principais (PCA) e agrupamento hierárquico. Os resultados evidenciaram ampla variação cromática entre as espécies, com predominância de tonalidades no quadrante vermelho-amarelo. A PCA explicou 93,8% da variância total, indicando que a diferenciação cromática é governada pela interação entre luminosidade e componentes cromáticos. Conclui-se que a abordagem multivariada aplicada à colorimetria constitui ferramenta eficiente para caracterização cromática e identificação de espécies com potencial de substituição no setor moveleiro, favorecendo a diversificação de espécies.

Palavras-chave: Distância de cor; Variabilidade cromática; Percepção visual.

Chromatic Characterization of Tropical Woods and Their Potential for Substitution in the Furniture Industry

Abstract: Wood color characterization is an important attribute for its identification, classification, and application in the furniture industry. This study aimed to evaluate the chromatic similarity of 21 commercial tropical wood species using colorimetry in the CIELAB system. Analyses were conducted by determining the parameters L, a, and b*, as well as the derived parameters C* and h°, using a spectrophotocolorimeter under D65 illuminant conditions. The data structure was analyzed using multivariate techniques, including Principal Component Analysis (PCA) and hierarchical clustering. The results revealed a wide chromatic variation among species, with a predominance of tones in the red-yellow quadrant. PCA explained 93.8% of the total variance, indicating that chromatic differentiation is governed by the interaction between lightness and chromatic components. It was concluded that the multivariate approach applied to colorimetry is an efficient tool for chromatic characterization and the identification of species with substitution potential in the furniture industry, promoting species diversification.

Keywords: Color measurement; Chromatic variability; Visual perception.

1. Introdução

O Brasil possui uma base florestal ampla e diversificada, que sustenta a produção e o consumo de produtos madeireiros oriundos tanto de florestas plantadas quanto de florestas naturais, incluindo espécies tropicais de elevado valor comercial. Em 2024, a produção florestal brasileira atingiu o valor recorde de R$ 44,3 bilhões, representando um crescimento de 16,7% em relação ao ano anterior. Esse desempenho evidencia o fortalecimento de cadeias produtivas estratégicas, especialmente aquelas relacionadas à madeira de uso industrial e ao extrativismo vegetal (IBGE, 2025; SNIF, 2024; FAO, 2023).

Embora a produção nacional seja dominada por florestas plantadas de Eucalipto e Pinus, a extração de madeiras tropicais nativas ainda apresenta participação significativa, respondendo por cerca de 15,9% do valor total da produção florestal. Esse resultado reforça a permanência de um mercado ativo para espécies tropicais, associado tanto à demanda interna quanto às exportações (IBGE, 2025; IMAZON, 2023; ITTO, 2022).

As madeiras tropicais continuam sendo amplamente demandadas por segmentos industriais que requerem propriedades tecnológicas específicas, como elevada resistência mecânica, durabilidade natural e estabilidade dimensional. Além disso, atributos estéticos, especialmente relacionados à coloração e à textura, ampliam seu uso em produtos de alto valor agregado, como móveis, pisos especiais e revestimentos decorativos (SILVA et al., 2022; BESSA et al., 2023; LIMA et al., 2024).

Nesse contexto, a composição química da madeira está diretamente relacionada às suas características ópticas, influenciando a variação de sua cor, que pode ser quantificada por meio da colorimetria. A cor constitui uma importante variável para a classificação e identificação da madeira, pois permite avaliar as variações naturais entre as espécies. Além disso, resulta da interação entre fatores anatômicos, químicos e ambientais, sendo influenciada pelo teor e composição dos extrativos, pela variabilidade genética, pelas condições de crescimento e por fatores como plano de corte, posição radial no tronco e envelhecimento, que contribuem para as variações cromáticas, especialmente em espécies tropicais (LIMA, 2026; BESSA et al., 2023; LATORRACA et al., 2022; MELO et al., 2024).

A avaliação da cor da madeira pode ser realizada por meio de abordagens qualitativas e quantitativas, ambas fundamentais para a caracterização cromática do material. Em geral, a cor da madeira é definida de forma qualitativa, entretanto, esse tipo de avaliação pode ser subjetivo. De acordo com SOUSA et al. (2019) e SILVA et al. (2019), fatores como a incidência de luminosidade e a percepção do observador podem comprometer a caracterização da cor da

madeira. Nesse contexto, foi desenvolvido o sistema CIELAB, que permite a quantificação numérica da cor da madeira (ISO, 2019). Dessa forma, a colorimetria quantitativa baseada no sistema CIELAB tem se consolidado como uma ferramenta eficiente para a caracterização cromática da madeira, possibilitando análises comparativas mais objetivas entre espécies e materiais (LIMA et al., 2024; IMAZON, 2023).

Assim, o objetivo deste estudo é avaliar a similaridade cromática da madeira de 21 espécies tropicais comerciais por meio da colorimetria no sistema CIELAB, visando contribuir para sua identificação, classificação e potencial substituição de espécies no setor moveleiro.

2. Material e métodos

2.1. Determinação dos parâmetros colorimétricos da madeira

As análises de colorimetria foram realizadas no Laboratório de Tecnologia da Madeira do Departamento de Engenharia Florestal da Universidade de Brasília (EFL/UnB), utilizando um espectrofotocolorímetro ColorEye XTH (X-Rite®, modelo 200d), operando com iluminante padrão D65 e ângulo de observação de 10°.

Foram avaliadas 21 espécies de madeira, provenientes do acervo da xiloteca do CCBN/UFAC e de amostras obtidas em serrarias do estado do Acre. Para cada espécie, foram confeccionados 10 corpos de prova com dimensões de 50 × 10 × 70 mm (largura × espessura × comprimento). Em cada corpo de prova, foram realizadas 20 leituras na face tangencial, totalizando 200 medições por espécie, de forma a representar a variabilidade cromática superficial das amostras.

Os parâmetros colorimétricos foram determinados conforme o sistema CIELAB (CIE, 1976), sendo obtidos os valores de L* (luminosidade), a* (vermelho–verde) e b* (amarelo–azul). A partir desses parâmetros, foram calculados a cromaticidade (C*) e o
ângulo de matiz (h°), conforme procedimentos padronizados e as cores definidas conforme metodologia descrita por CAMARGOS e GONÇALEZ (2001).

2.2. Tratamento estatístico dos dados e Análise da distribuição cromática

Foi realizada análise estatística descritiva dos parâmetros colorimétricos (L*a*b*), incluindo média, desvio padrão e coeficiente de variação. A distribuição cromática das espécies foi analisada no plano a* × b*, com o objetivo de caracterizar a disposição das espécies no espaço cromático e identificar possíveis agrupamentos de tonalidade.

Adicionalmente, foi elaborado um histograma da luminosidade (L*) para avaliar a distribuição dos níveis de brilho entre as espécies. Para representação tridimensional do espaço

de cor, foi construído um diagrama L*a*b*, permitindo a visualização integrada dos parâmetros colorimétricos.

2.3. Análise multivariada

A análise de componentes principais (PCA) foi realizada com base nos parâmetros L*, a*, b*, C* e h°, visando à redução da dimensionalidade dos dados e à identificação dos principais fatores associados à variação cromática entre as espécies. Os dados foram previamente padronizados (z-score) para eliminar efeitos de escala entre as variáveis.

Adicionalmente, foi realizada análise de agrupamento hierárquico pelo método de Ward, utilizando matriz de distância euclidiana, com o objetivo de identificar grupos de espécies com características cromáticas semelhantes.

2.4. Análises computacionais

Todas as análises estatísticas e multivariadas, bem como a elaboração das figuras, foram realizadas no ambiente estatístico R (R Core Team), utilizando rotinas específicas para análise de dados e visualização gráfica.

3. Resultados e discussão

a. Parâmetros colorimétricos das espécies

Os valores médios dos parâmetros colorimétricos L*, a*, b*, C* e h° obtidos para as 21 espécies avaliadas são apresentados na Tabela 1. Observou-se ampla variação nos parâmetros cromáticos entre as espécies, evidenciando diferenças na tonalidade e na luminosidade da madeira.

Tabela 1 – Parâmetros colorimétricos médios, desvio padrão e cor da madeira de 21 espécies florestais amazônicas

Nome Científico	L*	a*	b*	C*	h°	Cor
Simarouba amara	81,54 (1,96)	4,22 (0,75)	24,62 (2,05)	24,99 (2,09)	80,29 (1,54)	Branco acinzentado
Couratari tauari	73,24 (2,29)	4,46 (1,06)	22,32 (2,23)	22,77 (2,35)	78,81 (2,01)	Marrom oliva
Aspidosperma spp.	66,01 (1,23)	9,00 (1,47)	32,09 (1,47)	33,37 (1,09)	74,26 (3,06)	Amarelo claro
Guarea trichilioides	63,86 (1,05)	13,56 (0,61)	26,91 (0,94)	30,14 (1,05)	63,26 (0,75)	Marrom oliva
Hymenolobium petraeum	61,19 (3,31)	13,88 (1,46)	25,68 (1,15)	29,22 (1,29)	61,63 (2,61)	Rosa
Pouteria guianensis	59,52 (1,89)	14,19 (0,93)	25,88 (1,16)	29,52 (1,36)	61,27 (1,17)	Marrom oliva
Goupia glabra	59,06 (3,94)	9,00 (1,64)	26,13 (2,54)	27,67 (2,70)	71,02 (2,87)	Rosa

	57,70	9,01	24,24	26,0	68,81	
Apuleia leiocarpa	(6,43)	(1,75)	(4,73)	(4,18)	(6,2)	Amarelo claro
					65,44	
Cedrelinga	57,54	10,31	22,63	24,94	94,21	
cateniformis	(3,29)	(1,56)	(2,21)	(2,00)	)	Oliva
	57,37	7,19	14,15	15,87	63,05	Rosa
Allantoma lineata	(1,28)	(0,53)	(1,12)	(1,21)	(0,79)	acinzentado
	54,24	9,04	26,96	28,46	71,47	
Ocotea spp.	(3,70)	(1,41)	92,27)	(2,39)	(2,45)	Amarelo Oliva
	54,06	12,40	22,10	25,42	60,82	Rosa
Cedrela odorata	(4,60)	(2,19)	(1,26)	(1,50)	(1,27)	acinzentado
	53,22	16,50	26,73	31,42	58,33	Amarelo
Astronium lecointei	(2,83)	(0,89)	(0,84)	(1,10)	(1,02)	amarronzado
	52,94	12,57	25,00	28,00	63,26	Amarelo
Dipteryx odorata	(2,73)	(1,22)	(2,09)	(2,16)	(2,20)	amarronzado
	51,48	14,08	25,47	29,16	60,79	Amarelo
Machaerium spp.	(3,62)	(0,93)	(3,12)	(2,71)	(3,68)	amarronzado
	51,03	13,73	21,39	25,49	57,47	Marrom
Dinizia excelsa	(4,75)	(2,83)	(3,16)	(3,77)	(4,31)	avermelhado
Hymenaea	50,92	13,86	24,15	27,88	60,05	Marrom
courbaril	(4,77)	(1,35)	(2,29)	(2,15)	(3,23)	avermelhado
Sclerolobium	47,61	9,60	16,11	18,87	61,98	
paniculatum	(3,97)	(1,17)	(3,05)	(2,49)	(2,96	Oliva
	81,54	4,22	22,73	24,81	66,41	
Bowdichia nitida	(1,96)	(0,75)	(1,41)	(1,54)	(1,27)	Marrom oliva
	73,24	4,46	19,13	22,11	62,14	
Handroanthus spp.	(2,29)	(1,06)	(3,69)	(5,16)	(7,61)	Marrom escuro
Machaerium	66,01	9,00	7,89	14,79	31,77	Marrom
scleroxylon	(1,23)	(1,47)	(2,79)	(2,66)	(7,48)	arroxeado

A variação de L* evidencia um gradiente de luminosidade entre espécies claras e escuras. Como pode ser observado na Figura 1, associando a reflectância com o comprimento de onda, as espécies como *Simarouba amara* e *Couratari tauari* apresentaram maiores valores médios de luminosidade, caracterizando madeiras visualmente mais claras. Por outro lado, *Machaerium scleroxylon* apresentou valores mais baixos de L*, indicando madeira de tonalidade mais escura.

Os resultados corroboram os estudos de SILVA et al. (2017), que também identificaram a espécie *Simarouba amara* como uma das madeiras de maior luminosidade (L*) e com menor intensidade de tons avermelhados (a*), evidenciando seu padrão cromático característico. De forma semelhante, os valores obtidos para *Couratari tauari* foram consistentes com os relatados por SILVA et al. (2017) e ZAQUE et al. (2019), confirmando a estabilidade dos parâmetros colorimétricos e a manutenção das características cromáticas típicas dessas madeiras tropicais.

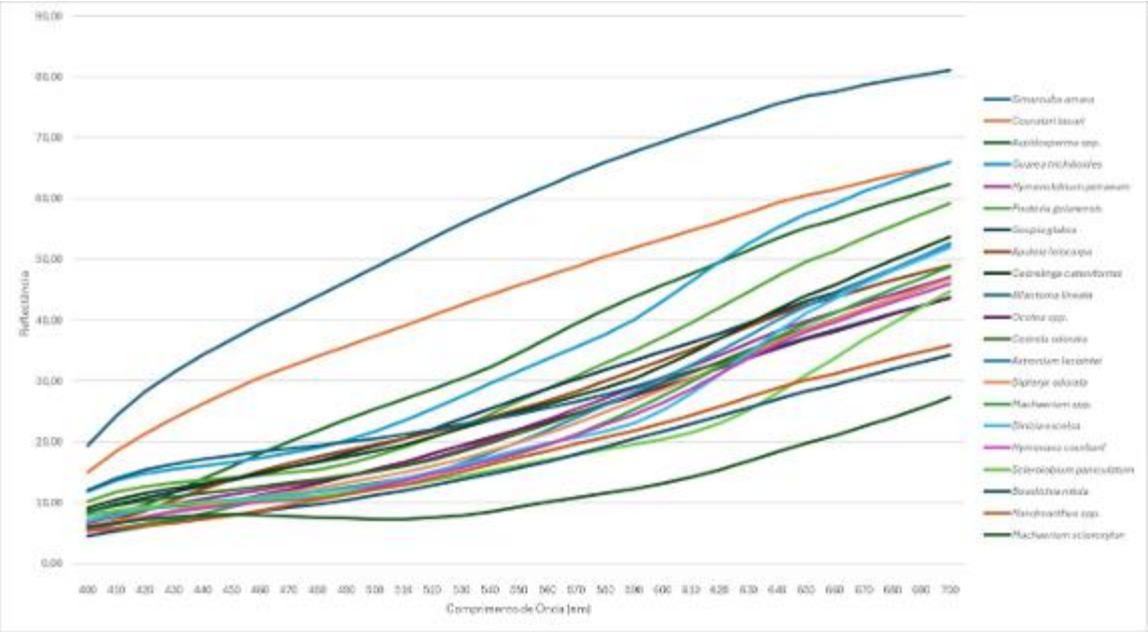


Figura 1 – Curvas de reflectância colorimétrica para as madeiras amazônicas.

Diante disso, o conhecimento sobre a cor da madeira poderá fornecer informações capazes de subsidiar uma pré-classificação das madeiras para a combinação de cores em tons variados, considerando-se a preferência de mercado, o que agregaria valor a elas. A determinação dos parâmetros das cores de madeiras poderá também fomentar um banco de dados de cores, para a padronização de uma paleta de cores de madeiras nativas, facilitando assim a comercialização e utilização dessas madeiras (ZAQUE et al., 2019).

b. Distribuição cromática no plano a* × b*

O mapa cromático construído no plano a* × b* (Figura 2) mostrou que todas as espécies se concentram no quadrante vermelho-amarelo do espaço cromático, indicando predominância dessas tonalidades na coloração das madeiras avaliadas.

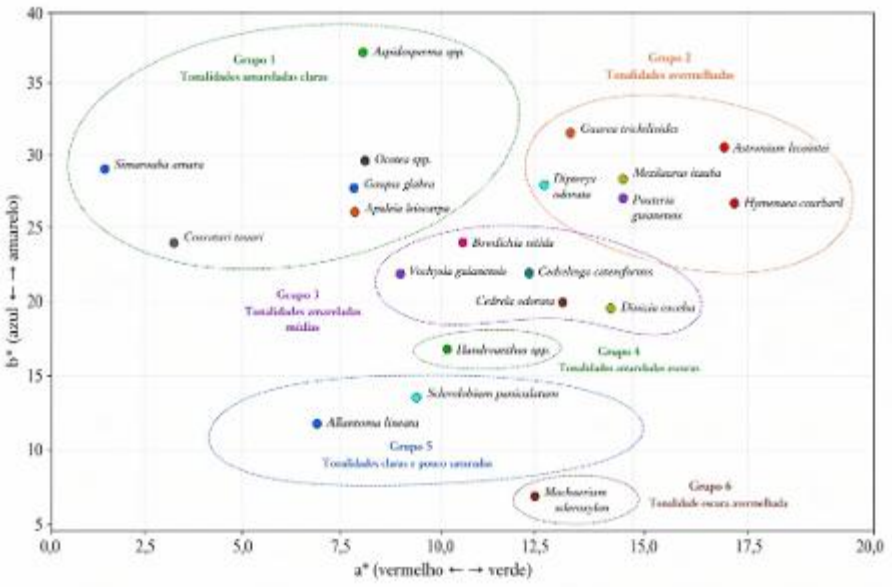


Figura 2 – Distribuição das espécies madeireiras amazônicas no espaço cromático definido pelas coordenadas a (eixo verde–vermelho) e b (eixo azul–amarelo) do sistema CIELAB.

O mapa cromático também evidenciou a formação de agrupamentos naturais de espécies com características cromáticas semelhantes.

c. Análise de Componentes Principais

A Análise de Componentes Principais (PCA), revelou que os dois primeiros componentes principais explicaram aproximadamente 93,8% da variabilidade total dos dados, indicando elevada representatividade da análise bidimensional.

O primeiro componente principal (PC1) explicou 56,6% da variância e apresentou forte associação com o parâmetro L* (0,734), além de contribuições relevantes dos parâmetros a* (−0,500) e b* (0,460), caracterizando um eixo que integra luminosidade e cromaticidade global.

O segundo componente principal (PC2), responsável por 37,2% da variância, esteve associado principalmente aos parâmetros b* (−0,728) e a* (−0,685), indicando que a variação cromática ao longo desse eixo está relacionada à interação entre as tonalidades amarela e avermelhada.

Esses resultados demonstram que a diferenciação cromática entre as espécies não é controlada por um único parâmetro, mas resulta da interação entre luminosidade e

componentes cromáticos, com destaque para o papel combinado dos parâmetros a* e b* na separação das espécies no espaço multivariado.

Segundo SOUSA et al. (2019), a variação conjunta dos parâmetros a* e b* constitui um dos principais fatores responsáveis pela diferenciação cromática de madeiras tropicais, permitindo identificar padrões colorimétricos característicos entre espécies amazônicas. Os padrões observados na PCA são consistentes com os agrupamentos hierárquicos, evidenciando convergência entre as abordagens multivariadas.

d. Agrupamento cromático das espécies

A concordância entre a distribuição das espécies na PCA e os grupos formados no agrupamento hierárquico indica robustez na estruturação multivariada dos dados cromáticos. O agrupamento hierárquico identificou grupos de espécies com características cromáticas semelhantes e o dendrograma gerado (Figura 3) evidenciou a formação de diferentes grupos cromáticos, refletindo a similaridade entre as espécies com base nos parâmetros colorimétricos avaliados.

Esses agrupamentos demonstram o potencial da colorimetria como ferramenta para a padronização e classificação tecnológica da madeira. Segundo STANGERLIN et al. (2013), a colorimetria é importante para a obtenção de lotes uniformes de madeira serrada, atendendo às exigências do mercado e influenciando diretamente a qualidade dos produtos obtidos a partir do processamento da madeira.

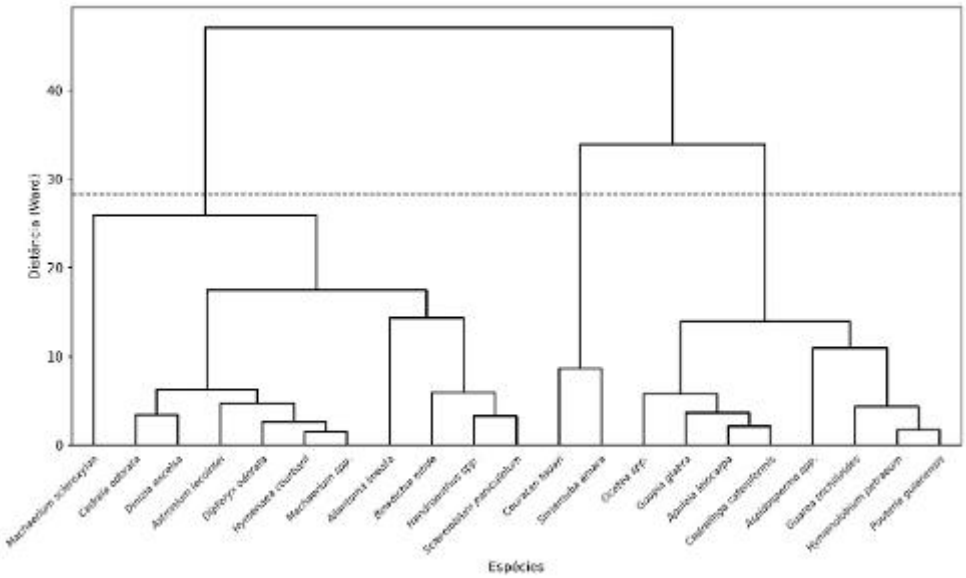


Figura 3 – Dendrograma de agrupamento hierárquico das espécies madeireiras amazônicas com base nos parâmetros colorimétricos L*a*b*, utilizando o método de Ward.

De modo geral, as espécies foram organizadas em grupos que refletem diferenças na luminosidade e na intensidade dos componentes cromáticos vermelho e amarelo.

4. Conclusões

A caracterização colorimétrica das 21 espécies tropicais evidenciou ampla variabilidade cromática, com predominância de tonalidades no quadrante vermelho-amarelo do espaço CIELAB. A análise multivariada mostrou elevada eficiência, sendo que os dois primeiros componentes principais explicaram 93,8% da variabilidade total. A concordância entre a Análise de Componentes Principais e o agrupamento hierárquico permitiu identificar grupos de espécies com características cromáticas semelhantes, indicando que a diferenciação das madeiras é determinada pela interação entre luminosidade e os parâmetros a* e b*.

A colorimetria associada às técnicas multivariadas mostrou-se eficaz para a caracterização, identificação e classificação de madeiras tropicais, contribuindo para bancos de dados cromáticos e auxiliando a indústria moveleira na seleção de espécies alternativas, favorecendo a diversificação do uso de madeiras, o aproveitamento sustentável dos recursos florestais e reduzindo a pressão sobre as madeiras mais exploradas comercialmente.

5. Agradecimentos

Os autores agradecem à Universidade Federal do Acre (UFAC) pelo suporte institucional e pelas condições oferecidas para a realização da pesquisa, bem como a todos os colaboradores que contribuíram para o desenvolvimento deste trabalho.

6. Referências bibliográficas

Bessa, F., Sousa, V., Quilhó, T., & Pereira, H. (2023). Diversity of wood colour in tropical timber species and its relationship with wood density and anatomical features. *IAWA Journal*, *45*(3), 335–357. https://doi.org/10.1163/22941932-bja10148.

Camargos, J. A. A., & Gonçalez, J. C. (2001). A colorimetria aplicada como instrumento na elaboração de uma tabela de cores de madeira. *Brasil Florestal*, *71*, 30–41.

Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2023). *Sustainable wood value chains: Guidelines for quality and traceability*. FAO.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. (2025). *Produção da extração vegetal e da silvicultura 2024*. IBGE. https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/agricultura-e-pecuaria/9105-producao-da-extracao-vegetal-e-da-silvicultura.html.

Instituto do Homem e Meio Ambiente da Amazônia. (2023). *Mercado de madeiras tropicais no Brasil: Desafios e oportunidades*. Imazon.

International Organization for Standardization. (2019). *ISO/CIE 11664-4: Colorimetry — Part 4: CIE 1976 L*a*b* colour space*. ISO. https://www.iso.org/standard/74166.html.

International Tropical Timber Organization. (2022). *Annual review and assessment of the world timber situation 2022*. ITTO.

Latorraca, J. V. F., Costa, A. F., Gonçalez, J. C., Silva, J. R. M., & Tomazello Filho, M. (2022). Variability of wood color in tropical species and its technological implications. *Floresta e Ambiente*, *29*, e20220115. https://doi.org/10.1590/2179-8087-FLORAM-2022-0115.

Lima, C. K., Santos, P., Cardoso, L., & Dias, A. M. P. G. (2024). Wood color as a quality attribute for tropical timber products. *European Journal of Wood and Wood Products*, *82*(1), 45–58. https://doi.org/10.1007/s00107-023-01989-5.

Lima, A. C. B., Brito, F. M. S., Paes, J. B., Batista, D. C., Pinto, J. A., & Ferreira, G. (2026). Relações entre cor, composição química, resistência biológica e propriedades mecânicas da madeira: Uma revisão integrativa. Avanços em Ciências Agrárias: Pesquisas em Educação, Produção e Sustentabilidade (Vol. 1, pp. 147–162). *Científica Digital*. https://dx.doi.org/10.37885/260221221.

Melo, R. R., Medeiros, D. T., Batista, F. G., Souza, J. B., Rusch, F., Mascarenhas, A. R. P., Pimenta, A. S., Santos, M. E. C., Moura, J., & Paula, E. A. O. (2024). Characterization and grouping of various tropical kinds of wood species by density and colourimetric parameters. *Wood Material Science and Engineering*, *21*(1), 623–632. https://doi.org/10.1080/17480272.2024.2440550.

Silva, R. A., Oliveira, J. T. S., Souza, M. R., Lima, C. K., Cardoso, L., & Dias, A. M. P. G. (2022). Caracterização tecnológica de madeiras tropicais brasileiras visando à agregação de valor. *Revista Árvore*, *46*, e4601. https://doi.org/10.1590/1806-90882022000004601.

Silva, R. A. F., Setter, C., Mazette, S. S., Melo, R. R., & Stangerlin, D. M. (2017). Colorimetria da madeira de trinta espécies tropicais. *Revista Ciência da Madeira*, *8*(1), 36–41. https://doi.org/10.12953/2177-6830/rcm.v8n1p36-41.

Silva, S. B. da et al. Color variability and relationship with basic density and extractive content of Calycophyllum spruceanum wood. *Floresta*, v. 49, n. 4, p. 803–812, 2019. ISSN 19824688. https://doi.org/10.5380/rf.v49i4.59374.

Sistema Nacional de Informações Florestais. (2024). *Boletim do setor florestal brasileiro*. SNIF. https://snif.florestal.gov.br/pt-br/publicacoes.

Sousa, W. C. S. E. Barbosa, L. J. Soares, A. A. V. Goulart, S. L. Protásio, T. P. Wood colorimetry for the characterization of Amazonian tree species: A subsidy for a more efficient

classification. *Cerne*, v. 25, n. 4, p. 451–462, 2019. ISSN 01047760. https://doi.org/10.1590/01047760201925042650.

Stangerlin, D. M.; Costa, A. F.; Gonçalez, J. C.; Pastore, T. C. M.; Garlet, A. Monitoramento da biodeterioração da madeira de três espécies amazônicas pela técnica da colorimetria. *Acta Amazonica*, Manaus, v. 43, n. 4, p. 429-438, 2013. https://doi.org/10.1590/S0044-59672013000400004.

Zaque, L. A. M., Melo, R. R., Souza, E. C., & Serenine Junior, L. (2019). Caracterização colorimétrica e da massa específica das madeiras comercializadas no Mato Grosso. *Revista Ciência da Madeira*, *10*(3), 236–246. https://doi.org/10.12953/2177-6830/rcm.v10n3p236-246.

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Caracterização de painéis aglomerados de *Pinus* sp. colados com PVA e poliuretano de mamona

Jefferson Araújo da Silva[1]; Felipe Loan Barreto de Araújo[1];
Leandro Rodrigues da Silva[1], Márcia Ellen Chagas dos Santos Couto[1],
Juliana de Moura[1], Talita Dantas Pedrosa[1], Prosper Mensah[2], Rafael Rodolfo de Melo[1]

[1] Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Mossoró, RN, Brasil
[2] Forest Research Institute of Ghana, Kumasi, Ashanti, Ghana.

Resumo: O objetivo deste estudo foi comparar as propriedades físicas de painéis aglomerados produzidos com resíduos de *Pinus* sp. utilizando resina de acetato de polivinila (PVA) e poliuretano à base de óleo de mamona. Os painéis foram confeccionados em escala laboratorial seguindo os parâmetros propostos pela ABNT NBR 14810-2. Para caracterização dos painéis, foram avaliadas as seguintes propriedades: densidade aparente, umidade, absorção de água e inchamento em espessura. Os painéis produzidos com poliuretano de mamona apresentaram menor absorção de água e menor inchamento em espessura em comparação aos produzidos com PVA, demonstrando maior estabilidade dimensional. Conclui-se que o poliuretano à base de óleo de mamona apresentou melhor desempenho nas propriedades físicas avaliadas, mostrando potencial para a produção de painéis aglomerados.
Palavras-chave: Estabilidade dimensional; Propriedades físicas; Matéria-prima renovável.

Characterization of *Pinus* sp. particleboards bonded with PVA and castor oil-based polyurethane

Abstract: This study compares the physical properties of particleboards made from *Pinus* sp. residues using either polyvinyl acetate (PVA) resin or castor oil-based polyurethane. The panels were manufactured on a laboratory scale in accordance with the parameters established by the ABNT NBR 14810-2 standard. To characterize the panels, the following properties were evaluated: apparent density, moisture content, water absorption, and thickness swelling. Panels produced with castor oil-based polyurethane exhibited lower water absorption and reduced thickness swelling compared to those made with PVA, demonstrating superior dimensional stability. It is concluded that the castor oil-based polyurethane performed better regarding the physical properties evaluated, showing potential for use in particleboard production.
Keywords: Dimensional stability; Physical properties; Renewable raw material.

1. Introdução

Os painéis de madeira surgiram como uma alternativa à escassez de matéria-prima, além de reduzir os impactos sobre as florestas nativas. Entre os tipos de painéis que mais se destacam no movimento da economia nacional e internacional, estão os painéis de partículas (Freire et al., 2015). Estes painéis são produzidos a partir da sua prensagem, sendo aglutinados com uso de adesivos.

O adesivo a base de acetato de polivinila (PVA) apresenta vantagens relacionadas à segurança e à sustentabilidade, por ser um material inodoro, não inflamável e menos prejudicial à saúde humana e ao meio ambiente. Além disso, destaca-se pelo baixo custo, facilidade de aplicação e rápida secagem quando empregado em condições adequadas. Entretanto, devido à sua limitada resistência à umidade, seu uso é recomendado principalmente para aplicações em ambientes internos (Campos et al., 2014).

Como alternativa renovável aos adesivos de origem fóssil utilizados na união das partículas, destaca-se o poliuretano à base de óleo de mamona (Castor Oil-Based Polyurethane), o qual apresenta baixa toxicidade, além de possuir elevada resistência à umidade (Silveira et al., 2021).

Assim, o objetivo deste trabalho foi produzir e caracterizar painéis de aglomerado utilizando resíduo da madeira de *Pinus* sp. e colados com resinas a base de PVA e poliuretano de mamona.

2. Material e métodos

2.1. Material de Estudo

As partículas utilizadas na produção dos painéis foram originadas a partir de resíduos do processamento da madeira de *Pinus* sp. Os painéis produzidos tiveram suas partículas aglutinadas com uso de dois diferentes adesivos: Poliacetato de Vinila (PVA); e Poliuretano à base de óleo de mamona.

2.2. Produção dos Painéis de Aglomerado

Os painéis de aglomerado foram produzidos seguindo os parâmetros de referência da Norma Brasileira NBR 14810-2 (ABNT, 2018), que estabelece os requisitos e os métodos de ensaio para painéis de partículas de média densidade.

Os painéis foram produzidos a partir da homogeneização da resina com as partículas. A quantidade de adesivo empregada foi de cerca de 20% do peso das partículas para ambas as resinas avaliadas

Após a mistura ser homogeneizada a massa de partículas foi colocada em uma forma de madeira com as dimensões de 40 cm × 26 cm × 20 mm. Os painéis foram prensados em uma prensa manual com pressão de 9 toneladas. O tempo de prensagem foi de 24 horas a temperatura ambiente.

2.3. Produção de Amostras e Avaliações de Qualidade

Após a produção dos painéis aglomerados, foram produzidos corpos-de-prova para caracterização das suas propriedades físicas. Os testes foram realizados seguindo a normativa NBR 14810-2 (ABNT, 2013).

2.4. Ensaios Físicos

2.4.1. Densidade Aparente

Os ensaios de densidade aparente foram realizados conforme a norma NBR 14810-2 (ABNT, 2018), com 5 repetições para cada adesivo (PVA e Poliuretano). Os corpos-de-prova foram secos em estufa com circulação de ar forçada por 24 h a temperatura de 105 ± 2 °C. A pesagem foi realizada utilizando balança analítica (precisão ± 0,01 g) e as dimensões de comprimento, largura e espessura (antes da secagem) foram medidas com paquímetro digital (precisão 0,01 mm). A densidade aparente ao teor de umidade de equilíbrio foi calculada pela divisão da massa pelo volume das amostras (Equação 1)

$$Da = \frac{Ma}{Va} \qquad \text{(Equação 1)}$$

Em que:

Da = densidade aparente, em g/cm^3;

Ma = massa atual aumidade de equilíbrio, em g;

Va = volume atual ao teor de umidade de equilíbrio, em cm^3.

2.4.2. Umidade dos Painéis

O ensaio de umidade seguiu a norma NBR 14810-2 (ABNT, 2018), com 5 repetições para cada tratamento. As amostras foram mantidas em sala climatizada com temperatura a 21 ± 2 °C e 65 ± 2% de umidade relativa por 10 dias. Posteriormente, foram pesados em balança analítica para obtenção da massa na condição de equilíbrio. Em seguida, estas amostras foram secas em estufa com circulação de ar forçada por 24 h a temperatura de 105 ± 2 °C e pesados novamente para obtenção da massa seca. A determinação da umidade foi realizada utilizando a Equação 2.

$$TU = \frac{Ma - Ms}{Ma} \times 100 \qquad \text{(Equação 2)}$$

Em que:
TU = teor de umidade, em %;
Ma = massa atual a umidade de equilíbrio, em g;
Ms = massa seca, em g.

2.4.3. Absorção de Água e Inchamento em Espessura

Os ensaios de absorção de água e inchamento em espessura foram realizados conforme a norma NBR 14810-2 (ABNT, 2018), com adaptação nas dimensões dos corpos de prova, que foram confeccionados com 40 × 40 mm. Os corpos de prova foram secos em estufa de secagem e esterilização com circulação de ar forçada por 24 h à temperatura de 105 ± 2 °C. Em seguida, foram dispostos em dessecador por 30 min para atingir a temperatura ambiente. Após a climatização, foram pesados para obtenção da massa seca, utilizando balança analítica, e a espessura foi medida com paquímetro digital. Posteriormente, os corpos de prova foram imersos em água destilada a 30 ± 2 °C, sendo reavaliados após 2 h e 24 h de imersão em água. Com estas informações, foram determinadas o percentual de absorção de água e inchamento em espessura utilizando as Equações 3 e 4, respectivamente.

$$AA = \frac{Mu - Ms}{Ms} \times 100 \qquad \text{(Equação 3)}$$

$$IE = \frac{Du - Ds}{Ds} \times 100 \qquad \text{(Equação 4)}$$

Em que:

AA = absorção de água, em %;

Mu = massa úmida, em g;

Ms = massa seca, em g;

IE = inchamento em espessura, em %;

Du = dimensão umidade, em cm;

Ds = dimensão seca, em cm.

3. Resultados e discussão

3.1. Densidade Aparente e Umidade dos Painéis de Madeira

A Tabela 1 apresenta os valores médios e respectivos desvios padrão da densidade aparente e umidade para os painéis produzidos com resíduo de *Pinus* e adesivos PVA e Poliuretano de Mamona.

Tabela 1 - Valores médios (± desvio padrão) de densidade aparente e teor de umidade dos painéis aglomerados de *Pinus* sp. colados com PVA e poliuretano de mamona.

Tratamento	PVA	Poliuretano de Mamona
Densidade Aparente ($g \cdot cm^{-3}$)	0,41 ± 0,03	0,38 ± 0,04
Umidade (%)	11,02 ± 0,81	9,54 ± 0,91

Os valores de densidade aparente obtidos para ambos os tratamentos (0,41 $g \cdot cm^{-3}$ para PVA e 0,38 $g \cdot cm^{-3}$ para o poliuretano) estão abaixo do intervalo recomendado pela norma NBR 14810-2 (ABNT, 2018), que estabelece para painéis de partículas de média densidade valores entre 0,55 e 0,70 $g \cdot cm^{-3}$. Essa baixa densidade pode ser atribuída, prioritariamente, às condições de processamento adotadas em escala laboratorial. Diferentemente do processo industrial, que utiliza prensagem a quente com temperaturas entre 150 °C e 200 °C e pressões específicas de 2 a 5 MPa. Conforme destacado por Melo et al. (2022), a ativação térmica dos adesivos e a maior compactação mecânica são fatores determinantes para a obtenção de painéis com densidade dentro dos padrões normativos, pois favorecem o espalhamento do adesivo, a aproximação das partículas e a redução dos vazios internos.

Em relação a umidade, ambos os tratamentos atenderam ao limite máximo de 12% estipulado pela NBR 14810-2 (ABNT, 2018). O painel com PVA apresentou teor de umidade ligeiramente superior (11,02%) em comparação ao Poliuretano (9,54%). Esse comportamento é

coerente com a natureza química dos adesivos: o acetato de polivinila (PVA) é um polímero hidrofílico, que contém grupos hidroxila (-OH) em sua estrutura capazes de formar ligações de hidrogênio com moléculas de água, resultando em maior retenção de umidade mesmo após a secagem em estufa (Campos et al., 2014). Em contrapartida, o poliuretano à base de óleo de mamona, por apresentar cadeias hidrofóbicas provenientes do óleo vegetal, possui menor afinidade por água, o que justifica sua menor umidade de equilíbrio (Souza et al., 2023).

3.2. Absorção de Água e Inchamento em Espessura

Os ensaios de absorção de água e inchamento em espessura evidenciaram diferenças marcantes entre os dois adesivos (Tabela 2).

Tabela 2 - Valores médios (± desvio padrão) de absorção de água (AA) e inchamento em espessura (IE) após 2 h e 24 h de imersão para os painéis aglomerados de *Pinus* sp. colados com PVA e poliuretano de mamona.

Tratamento	AA 2h (%)	AA 24h (%)	IE 2h (%)	IE 24h (%)
PVA	330,8 ± 15,5	362,6 ± 15,5	96,3 ± 22,3	113,8 ± 22,3
Poliuretano de mamona	129,6 ± 13,9	139,6 ± 13,9	10,9 ± 1,2	11,8 ± 1,2

Os painéis produzidos com 20% de PVA apresentaram desempenho extremamente insatisfatório quanto à estabilidade dimensional, com absorção de água superior a 360% e inchamento em espessura de 113,8% após 24 h. Esse comportamento já era esperado, uma vez que o adesivo PVA é termoplástico, solúvel em água e forma ligações físicas que são facilmente rompidas na presença de água (maior umidade). Conforme salientam Campos et al. (2014), o PVA não é recomendado para aplicações externas ou ambientes com umidade elevada, justamente devido à sua baixa resistência à água e à sua capacidade de reversão do filme adesivo em meio aquoso, o que inviabiliza seu uso em painéis aglomerados para fins estruturais ou mesmo para mobiliário sujeito a variações higroscópicas. Além disso, a alta porosidade intrínseca dos painéis de baixa densidade facilita a penetração capilar da água, potencializando o inchamento das partículas de madeira e a degradação da interface adesivo-partícula.

Em contraste, os painéis produzidos com poliuretano de mamona exibiram notável estabilidade dimensional, com absorção de água de 139,6% e inchamento em espessura médio de apenas 11,8% após 24 h. Este último valor enquadra-se no limite máximo de 15% exigido

pela NBR 14810-2 (ABNT, 2018) para painéis de uso interno. Esse comportamento pode ser atribuído à sua estrutura química reticulada: o poliuretano derivado do óleo de mamona forma, durante a cura, uma rede tridimensional com ligações uretânicas (-NH-CO-O-) que conferem hidrofobicidade e alta resistência à penetração de água (Wechsler et al., 2013). Essa barreira física e química reduz tanto a absorção por capilaridade quanto o inchamento das partículas de madeira (Souza et al., 2023). Os autores demonstraram que painéis aglomerados com resíduo de *Pinus* sp. e adesivos poliuretânicos apresentam melhor desempenho frente à umidade, especialmente quando comparados a adesivos convencionais como a ureia-formaldeído ou o PVA, corroborando os achados do presente estudo.

É importante ressaltar que a diferença no inchamento entre os tratamentos é superior à diferença de densidade, indicando que o fator químico do adesivo prevalece sobre o fator físico (compactação) na estabilidade dimensional. Mesmo que o painel com PVA tivesse densidade mais alta, sua natureza hidrofílica ainda o tornaria vulnerável à umidade, como demonstrado por Campos et al. (2014).

4. Conclusão

Os resultados obtidos demonstraram que o adesivo utilizado influencia diretamente as propriedades físicas dos painéis aglomerados produzidos com resíduo de *Pinus*. Embora ambos os tratamentos tenham apresentado baixa densidade aparente, os painéis produzidos com poliuretano à base de óleo de mamona apresentaram melhor desempenho em relação à absorção de água e ao inchamento em espessura quando comparados aos painéis produzidos com PVA.

Assim, o poliuretano de mamona mostrou-se uma alternativa mais adequada para a produção de painéis aglomerados, principalmente por proporcionar maior estabilidade dimensional e utilizar uma matéria-prima de origem renovável. Dessa forma, seu emprego representa uma opção promissora para fabricação de painéis.

5. Referências bibliográficas

Campos, C. I. de, Ferreira, B. S., Prates, G. A., Goveia, D., & Valentina, L. V. O. D. (2014). Utilização de adesivo PVA em compensados de *Pinus* sp. e *Eucalyptus* sp. *Brazilian Journal of Biosystems Engineering*, *8*(1), 59–64. https://doi.org/10.18011/bioeng2014v8n1p59-64

Freire, A. L. F., Figueirêdo, M. C. B., Rosa, M. F., & Araújo Júnior, C. P. (2015). Impactos ambientais de painéis de madeira e derivados: Uma revisão de literatura. *Revista Espacios*, *36*(10), 3.

Melo, S. F., Silva, R. C., Sousa, T. O., Oliveira, A. S. D., Silva, M. A., Mendes, J. G. N., Moraes, T. P. E., Reis, G. M. F., Aguiar, B. A. C., & Marchesan, R. (2022). Utilização de adesivo PVA com reforço de lignina para a produção de painéis de *Eucalyptus* spp. tratado termicamente. In *Engenharia florestal: Contribuições, análises e práticas em pesquisa* (pp. 274–290). https://doi.org/10.37885/220308306

Silveira, V. S., Bianchi, O., Fiorio, R., & Zattera, A. J. (2021). Mechanical properties of composites of castor oil-based polyurethane and wood flour. *Materials Research*, *19*(3), 651–657. https://doi.org/10.1590/1980-5373-MR-2021-0287

Souza, M. V. de, Silva, S. A. M. da, Cazella, P. H. da S., Rodrigues, F. R., Carneiro, T. E. B., Pinto, E. M., Martins, A. R., Aouada, M. R. de M., & Christoforo, A. L. (2023). Painéis aglomerados com resíduo de *Pinus caribaea* var. *caribaea* com adesivo bicomponente sustentável. *Ambiente Construído*, *23*(3), 263–276. http://dx.doi.org/10.1590/s1678-86212023000300686

Shirosaki, R. K., Almeida, T. H. de, Panzera, T. H., Christoforo, A. L., & Lahr, F. A. R. (2019). Caracterização de painéis de partículas de média densidade feitos com resina poliuretana monocomponente à base de mamona. *Ambiente Construído*, *19*(1), 37–43. https://doi.org/10.1590/S1678-86212019000100291

Wechsler, A., Zaharia, W., Crosky, A., Janes, H., Ramírez, M., Ballerini, A., Nuñez, M. & Sahajwalla, V. (2013). *Macadamia (Macadamia integrifolia) shell and castor (Ricinus communis) oil based sustainable particleboard: A comparison of its properties with conventional wood based particleboard*. *Materials & Design*, *50*, 117–123. https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.03.008

Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2018). *ABNT NBR 14810-2:2018: Painéis de partículas de média densidade – Parte 2: Requisitos e métodos de ensaio*. ABNT.

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Caracterização de painéis compensados de *Pinus* colados com PVA

Hadassa Atna Rodrigues Bezerra[1]; Kleber Jackson Oliveira Rodrigues[1];
Leandro Rodrigues da Silva[1]; Cesar Pinheiro Alves[1]; Talita Dantas Pedrosa[1];
Márcia Ellen Chagas dos Santos Couto[1], Fernando Rusch[2]; Rafael Rodolfo de Melo[1]

[1] Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA), Mossoró, Rio Grande do Norte, Brasil.
[2] Universidade Federal do Oeste do Pará (UFOPA), Santarém, Pará, Brasil

Resumo: Este estudo teve como objetivo avaliar a influência da gramatura do adesivo poliacetato de vinila (PVA) nas propriedades físico-mecânicas de painéis compensados produzidos com lâminas da madeira de *Pinus* sp. Foram avaliados quatro tratamentos, utilizando diferentes gramaturas do adesivo PVA – 50, 100, 150 e 200 g/m². Para cada tratamento foram avaliadas a densidade aparente, a resistência à flexão estática e a resistência ao cisalhamento da linha de cola. A gramatura do adesivo influenciou na densidade aparente dos painéis. Já a resistência a flexão não apresentou diferenças estatisticamente significativas entre os tratamentos, evidenciando que a menor gramatura avaliada (50 g/m²) foi suficiente para garantir desempenho satisfatório em flexão. Em contrapartida, a resistência ao cisalhamento foi significativamente influenciada pela quantidade de adesivo, com os maiores valores observados para as gramaturas de 150 e 200 g/m². Conclui-se que a gramatura de 150 g/m² foi a mais adequada, proporcionando uma maior resistência da linha de cola.
Palavras-chave: Painel laminado; Gramatura da cola; Resistência ao cisalhamento.

Characterization of Pine plywood bonded with PVA

Abstract: This study evaluated the influence of polyvinyl acetate (PVA) adhesive spread rate on the physical-mechanical properties of plywood panels produced from *Pinus* sp. veneers. Four treatments were evaluated at PVA adhesive rates – 50, 100, 150 and 200 g/m². For each treatment, apparent density, static bending strength, and glue-line shear strength were assessed. The adhesive spread rate influenced the apparent density of the panels. However, bending strength showed no statistically significant differences among treatments, indicating that the lowest evaluated spread rate (50 g/m²) was sufficient to ensure satisfactory bending performance. In contrast, shear strength was significantly influenced by the amount of adhesive, with the highest values observed at spread rates of 150 and 200 g/m². The 150 g/m² spread rate was the most suitable, providing superior glue-line strength.
Keywords: Laminated panel; Adhesive rate; Shear strength.

1. Introdução

A expansão do consumo de madeira e de seus derivados industrializados reforça a importância do desenvolvimento de materiais com elevada qualidade, estabilidade dimensional e resistência mecânica, aliados a custos acessíveis e a práticas ambientalmente equilibradas (Iwakiri et al., 2021). Paralelamente, o crescimento da demanda por produtos sustentáveis, tem estimulado o aproveitamento de resíduos madeireiros e a utilização de adesivos de menor

toxicidade, o que de pesquisas que investiguem soluções inovadoras e ambientalmente responsáveis para a produção desses materiais, de modo a ampliar a competitividade e a eficiência do setor madeireiro.

Com o avanço da indústria madeireira, as pesquisas têm se concentrado no desenvolvimento de produtos que utilizem madeiras de reflorestamento, em razão do rápido crescimento, da boa trabalhabilidade e do elevado potencial de laminação dessas espécies (Mańkowski et al., 2025). Entretanto, a qualidade final dos painéis de madeira depende de múltiplos fatores, entre os quais se destacam a quantidade aplicada e o tipo de adesivo, bem como os parâmetros de prensagem e os procedimentos empregados na colagem das lâminas, os quais exercem influência direta no desempenho físico e mecânico dos painéis (Modes et al., 2025). Dessa forma, o estudo dos parâmetros de colagem torna-se essencial para garantir um desempenho mecânico satisfatório e o uso racional de materiais.

Diante disso, o presente trabalho objetivou avaliar as resistências mecânicas de compensados produzidos com madeira de *Pinus* sp. e colados com adesivo PVA. Foram investigadas quatro gramaturas de adesivo – 50, 100, 150 e 200 g/m² de adesivo PVA. A análise da influência da gramatura nas propriedades mecânicas visa compreender como a quantidade de adesivo influencia o desempenho do painel, contribuindo para o aprimoramento dos processos de fabricação de produtos de madeira colada.

2. Material e métodos

A matéria-prima utilizada para a produção dos painéis foram lâminas da madeira de *Pinus* sp. com 2,0 mm de espessura. Já o adesivo utilizado foi o poliacetato de vinila (PVA) da marca CASCOLA®, do tipo Cascorez. Antes da manufatura dos painéis foi realizada a avaliação visual das lâminas de *Pinus* sp., selecionando os materiais sem a presença de defeitos aparentes, como rachaduras, nós e deformações. Em seguida, estas lâminas foram seccionadas com o auxílio de uma serra fita.

Antes do processo de montagem e prensagem dos painéis, determinou-se as gramaturas de adesivo PVA a serem utilizadas na produção. Para uma melhor avaliação e compreensão dos resultados a serem obtidos na pesquisa, os materiais foram divididos em quatro grupos considerando as gramaturas de 50, 100, 150 e 200 g/m² de adesivo. O processo de fabricação dos painéis iniciou-se com a pesagem do adesivo em uma balança analítica. As lâminas da madeira de *Pinus* sp. já cortadas na dimensão do painel, foi posicionada uniformemente sobre uma superfície plana e, posteriormente, foi adicionado o adesivo de PVA. Foi assegurado que

cada lâmina recebesse a quantidade adequada para uma aplicação uniforme, que foi espalhado com auxílio de uma espátula. Foram produzidos quatro painéis compensados com dimensões de 22 x 22 x 0,85 cm. A prensagem foi realizada em prensa hidráulica manual, sendo aplicada uma carga de 10 toneladas. O tempo de prensagem adotado para os painéis foi de 72 h, permitindo que o adesivo curasse por completo e garantisse a resistência necessária.

Após o processo de fabricação, os painéis foram cortados com uma serra de fita para a produção das amostras referentes aos ensaios físicos e mecânicos. Foram realizados testes para a determinação da densidade, resistência a flexão estática e de resistência ao cisalhamento.

Para a determinação da densidade aparente, foram obtidos 16 corpos de prova, sendo quatro para cada tratamento do painel compensado, com 50 x 50 x 8,5 mm de comprimento, largura e espessura. Nos ensaios de resistência a flexão foram confeccionados 12 corpos de prova, sendo três para cada tratamento, com dimensões de 50 x 8,5 x 200 mm, conforme a recomendações da NBR 7190 (ABNT, 2022). Já para o ensaio de cisalhamento, os corpos de prova foram confeccionados conforme as orientações da norma europeia EN 314 (2005), no caso, com dimensões de 90 x 8,5 x 25 mm, além da espessura relativa a cada tipo de painel. Neste caso, foram produzidos 12 corpos de prova do painel compensado, sendo três de cada tratamento.

Os testes de resistência mecânica foram realizados em uma máquina universal EMIC, com velocidade de ensaio de 5 mm/min, até a ruptura das amostras. Durante os ensaios a máquina registrou continuamente a força aplicada e o deslocamento até o ponto de ruptura (Figura 5). Nos ensaios de flexão estática, a força máxima foi utilizada para calcular o módulo de ruptura (Equação 1). Já as variações de carga e deformações das amostras ocorridas ao longo dos ensaios foram utilizadas para estimativa do módulo de elasticidade (Equação 2), considerando o trecho linear da curva tensão x deformação.

$$MOR = \frac{F_{max}}{A} \qquad \text{(Equação 1)}$$

$$MOE = \frac{1}{4} \times \frac{(p2 - p1)}{(L2 - L1)} \times \frac{L^3}{b * h^3} \qquad \text{(Equação 2)}$$

Em que: Fmáx = força máxima aplicada até a ruptura, em N; P1 e P2= cargas dentro da região elástica, em N; L1 e L2= deslocamentos, em mm; L = vão entre apoios, em mm; b = largura, em mm; h= altura, em mm.

Para o ensaio de cisalhamento, a carga foi aplicada paralelamente a linha de cola, registrando-se a força máxima no momento da ruptura. Por meio da Equação 3 foram estimados os valores de resistência ao cisalhamento.

$$\tau = \frac{F_{max}}{A} \qquad \text{(Equação 1)}$$

τ = tensão de cisalhamento (N/mm²); Fmáx = força máxima aplicada até a ruptura, em N; A = Área do cisalhamento (mm²).

Os dados foram submetidos ao teste de Shapiro–Wilk para normalidade e ao teste de Levene para homogeneidade de variâncias. Em seguida, realizou-se a análise de variância (ANOVA) e, quando identificadas diferenças significativas entre as médias, aplicou-se o teste de Skott-Knott, adotando-se o nível de significância de 5% ($p < 0,05$).

3. Resultados e discussão

A variação da densidade aparente dos painéis laminados produzidos a partir de madeira de *Pinus* sp. pode ser observada na Figura 1. De acordo com o teste de Scott-Knott, ao nível de 5% de significância ($p < 0,05$), as menores densidades foram registradas para as gramaturas de 50 g/m² (0,579 g/cm³) e 150 g/m² (0,600 g/cm³). As gramaturas de 100 g/m² e 200 g/m² apresentaram densidades aparentes superiores, de 0,677 g/cm³ e 0,645 g/cm³, respectivamente, formando um grupo estatisticamente distinto dos tratamentos de menor gramatura.

A densidade aparente constitui um dos principais parâmetros utilizados na caracterização física de painéis à base de madeira, por refletir a interação entre a densidade da matéria-prima, a quantidade de adesivo aplicada e as condições de processamento, além de apresentar uma elevada correlação com as propriedades mecânicas e, consequentemente, com desempenho do produto final (Iwakiri et al., 2021). Estudos recentes indicam que variações na gramatura do adesivo podem influenciar a densidade aparente dos painéis, especialmente

quando comparadas gramaturas mais baixas, embora essa relação não seja necessariamente linear, em função da variabilidade da madeira e da distribuição do adesivo na linha de colagem (Fortunel et al., 2014).

Figura 1 - Variação na densidade aparente das amostras de compensado produzidas com diferentes gramaturas de adesivo PVA.

No contexto normativo, a ABNT NBR 17002 estabelece requisitos e métodos de ensaio para painéis compensados, incluindo a determinação da densidade aparente como critério de avaliação da qualidade do material (ABNT, 2021). Os valores obtidos neste estudo encontram-se dentro da faixa usualmente reportada para painéis compensados produzidos com *Pinus* sp., estando em conformidade com os resultados apresentados em normas técnicas e em estudos recentes sobre painéis de madeira (CEN, 2015).

Na Figura 2 é apresentado o diagrama força x deformação obtido no ensaio de flexão estática dos painéis compensados. Observa-se que todos os tratamentos apresentaram comportamento mecânico semelhante, caracterizado por um trecho inicial aproximadamente linear, correspondente à região elástica, seguido de uma região não linear até a ruptura, padrão amplamente reportado para painéis à base de madeira submetidos a esforços de flexão. Esse tipo de comportamento é típico de materiais lignocelulósicos colados, nos quais a resposta mecânica resulta da interação entre as lâminas de madeira e a linha de colagem, conforme descrito por Silva et al. (2023) em estudos com painéis compensados e laminados estruturais.

A avaliação do módulo de ruptura (MOR) indicou que a variação da gramatura do adesivo PVA não resultou em diferenças estatisticamente significativas entre os tratamentos avaliados ($p > 0,05$). Os valores médios de MOR variaram de 7,38 MPa para a gramatura de 50 g/m² a 6,89 MPa para a gramatura de 200 g/m², evidenciando que os painéis apresentaram desempenho mecânico semelhante, independentemente da quantidade de adesivo aplicada (Figura 3).

Figura 2 - Avaliação do comportamento dos painéis compensados colados com diferentes gramaturas de adesivo PVA, submetidos ao ensaio de flexão estática.

Figura 3- Variação do Módulo de Ruptura (MOR) e do Módulo de Elasticidade (MOE) de painéis compensados submetidos ao ensaio de flexão estática, colados com diferentes gramaturas de adesivo PVA.

Esse comportamento indica que, na faixa de gramaturas estudadas, a quantidade de adesivo utilizada foi suficiente para garantir a integridade da linha de colagem à resistência ao ensaio de flexão estática. Resultados semelhantes são reportados por Iwakiri et al. (2021), que observaram que incrementos na gramatura do adesivo, após atingido um nível mínimo adequado, tendem a não promover aumentos significativos no MOR de painéis compensados, uma vez que outros fatores, como as características da madeira, a qualidade da colagem e as condições de prensagem, passam a exercer maior influência sobre o desempenho mecânico.

A determinação das características mecânicas da madeira e dos produtos de madeira é fundamental para a compreensão do seu comportamento estrutural, uma vez que parâmetros como resistência e elasticidade permitem avaliar o desempenho do material sob diferentes condições de carregamento. Esses parâmetros são amplamente utilizados na caracterização de materiais e constituem a base para sua classificação quanto à qualidade e ao potencial de uso estrutural (Silva et al., 2023; Mańkowski et al., 2025). No presente estudo, a análise desses parâmetros permitiu interpretar com mais precisão os efeitos da gramatura do adesivo sobre o desempenho mecânico dos painéis avaliados.

A análise das curvas força x deformação para os ensaios de cisalhamento permitiu observar que o aumento da gramatura de adesivo influenciou de forma distinta o comportamento mecânico dos painéis. As menores gramaturas, 50 e 100 g/m², apresentaram picos de força mais baixos e rupturas mais abruptas, indicando uma linha de cola mais frágil e menor capacidade de transferência de tensões (Figura 4). Já os painéis colados com 150 g/m² exibiram os maiores valores de força antes da ruptura, com trajetórias mais estáveis, caracterizando o melhor desempenho mecânico entre as condições avaliadas. Para 200 g/m², embora alguns corpos de prova tenham atingido valores elevados de força e maior deformação, observou-se maior variabilidade entre as curvas, sugerindo comportamento menos uniforme e possível influência de excesso de adesivo.

Essas observações são corroboradas pelos resultados médios apresentados na Figura 5, que reforçam essa tendência. As gramaturas 50 e 100 g/m² apresentaram resistências médias ao cisalhamento de 1,40 e 1,42 MPa, respectivamente, sem diferença estatisticamente significativa entre si (letra b). Por outro lado, as gramaturas de 150 g/m² (2,14 MPa) e 200 g/m² (1,96 MPa)

formaram o grupo estatisticamente superior, evidenciando que quantidades maiores de adesivo resultam em juntas coladas mais resistentes. No entanto, o aumento para 200 g/m² não resultou em ganho adicional significativo em comparação a 150 g/m², além de apresentar maior dispersão nos resultados.

O aumento da quantidade de adesivo proporcionou uma melhoria na resistência ao cisalhamento dos painéis compensados, indicando que, até determinado limite, a maior disponibilidade de material adesivo favorece a formação de uma linha de colagem mais contínua e eficiente. A literatura reforça essa interpretação ao destacar que o desempenho das juntas coladas está diretamente relacionado ao equilíbrio entre a penetração do adesivo no substrato, a ancoragem mecânica e a espessura da linha de cola. Frihart e Hunt (2010) enfatizam que camadas excessivamente espessas tendem a reduzir a coesão interna do adesivo e a eficiência da transferência de tensões entre as lâminas, podendo comprometer o desempenho mecânico da junta.

Figura 4 - Comportamento individual da resistência ao cisalhamento na linha de cola de corpos de prova de painéis compensados colados com diferentes gramaturas de adesivo PVA.

Figura 5 - Resistência ao cisalhamento na linha de cola de painéis compensados colados com diferentes gramaturas de adesivo PVA.

Resultados semelhantes são discutidos por Ejaz et al. (2025), que, em uma revisão abrangente sobre métodos de melhoria e otimização da resistência de juntas coladas, ressaltam que o controle da quantidade de adesivo é um dos fatores mais críticos para o desempenho estrutural. Segundo os autores, tanto a insuficiência quanto o excesso de adesivo podem gerar defeitos na interface adesiva, como zonas de baixa resistência e distribuição não uniforme de tensões, reforçando a necessidade de estabelecer uma faixa ótima de aplicação. Assim, os resultados deste estudo corroboram a literatura ao evidenciar que o aumento da gramatura contribui para a resistência ao cisalhamento apenas até o ponto em que o equilíbrio entre penetração, coesão e ancoragem seja mantido.

Os resultados observados indicam que, em painéis laminados, a eficiência da colagem depende mais da distribuição uniforme do adesivo do que da quantidade aplicada, sugerindo que gramaturas excessivas podem formar camadas espessas e menos coesas, comprometendo a resistência final. A variação da densidade nesses compensados não apresentou relação linear

com a gramatura, evidenciando a predominância das características naturais da madeira e do comportamento de absorção do adesivo. Em síntese, o ajuste preciso da gramatura do PVA é um fator essencial para a otimização do desempenho mecânico e da eficiência produtiva.

4. Conclusões

A gramatura do adesivo PVA influenciou a resistência ao cisalhamento dos painéis compensados de *Pinus* sp., com os melhores resultados obtidos para as gramaturas de 150 e 200 g/m². Em contrapartida, não foram observadas diferenças significativas no módulo de ruptura entre os tratamentos avaliados.

Considerando o desempenho mecânico e o consumo de adesivo, a gramatura de 150 g/m² mostrou-se a mais adequada para a produção dos painéis, contribuindo para a otimização do processo de colagem e o uso racional de materiais.

5. Referências bibliográficas

Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2021). *NBR 17002: Painéis de madeira compensada: Requisitos e métodos de ensaio*. ABNT.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2022). *NBR 7190-1: Projeto de estruturas de madeira: Parte 1: Critérios de dimensionamento*. ABNT.

European Committee for Standardization. (2005). *EN 314-1: Plywood—Bonding quality—Part 1: Test methods*. CEN.

European Committee for Standardization. (2015). *EN 323: Wood-based panels—Determination of density*. CEN.

Ejaz, H., Awan, M. A., Muzzammil, H. M., Ullah, M., Akhavan-Safar, A., da Silva, L. F. M., & Tanveer, A. (2025). Methods for improvement/optimization of strength in adhesive joints: A comprehensive review of past and present techniques. *Mechanics of Advanced Materials and Structures, 32*(17), 4078–4106. https://doi.org/10.1080/15376494.2024.2400610

Fortunel, C., *et al.* (2014). Wood specific gravity and anatomy of branches and roots in Amazonian tree species. *New Phytologist, 202*(1), 79–94. https://doi.org/10.1111/nph.12632

Frihart, C. R., & Hunt, C. G. (2010). Adhesives with wood materials: Bond formation and performance. In *Wood handbook: Wood as an engineering material* (Chap. 10). USDA Forest Service.

Iwakiri, S., *et al.* (2021). Avaliação dos efeitos do adesivo, gramatura e pressão na qualidade de painéis EGP de *Eucalyptus badjensis*. *Scientia Forestalis, 49*(129), e3437. https://doi.org/10.18671/scifor.v49n129.20

Mańkowski, P., Karwat, Z., & Laskowska, A. (2025). Assessment of the modulus of rupture and modulus of elasticity in static bending of yellow pine. *Forests*, *16*(2), 265. https://doi.org/10.3390/f16020265

Modes, K. S., Cozer, V., Cunha, A. B., Dobner Júnior, M., & Vivian, M. A. (2025). Bonding quality of plywood with *Cupressus lusitanica* Mill. Wood. *Revista de Ciências Agroveterinárias*, *24*(3), 681–687. https://doi.org/10.5965/223811712432025681

Silva, L. S. Z. R. S., *et al.* (2023). Propriedades físico-mecânicas da madeira de cajueiro estimadas por métodos não destrutivos. *Ciência Florestal*, *33*(4), e66096. https://doi.org/10.5902/1980509866096

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Caracterização de painéis de madeira do tipo EGP (Edge Glued Panel)

Kleber Jackson Oliveira Rodrigues[1]; Hadassa Atna Rodrigues Bezerra[1]; Leandro Rodrigues da Silva[1]; Cesar Pinheiro Alves[1]; Talita Dantas Pedrosa[1]; Juliana de Moura[1], Fernando Rusch[2]; Rafael Rodolfo de Melo[1]

[1] Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA), Mossoró, Rio Grande do Norte, Brasil.
[2] Universidade Federal do Oeste do Pará (UFOPA), Santarém, Pará, Brasil

Resumo: O Edge Glued Panel (EGP) constitui uma alternativa tecnológica para o aproveitamento de peças curtas de madeira, agregando valor a resíduos e contribuindo para a sustentabilidade da cadeia produtiva. A qualidade desses painéis está diretamente relacionada à eficiência da colagem, sendo a gramatura do adesivo um dos principais fatores que influenciam seu desempenho mecânico. Neste estudo, avaliou-se a influência de duas gramaturas de adesivo à base de PVA (100 e 150 g/m²) nas propriedades físicas e mecânicas de painéis EGP produzidos com madeira de *Pinus* sp. Os painéis foram confeccionados em laboratório e submetidos à determinação da densidade aparente e da resistência ao cisalhamento da linha de cola. A densidade aparente não apresentou diferença significativa entre os tratamentos, variando de 0,753 a 0,768 g/cm³. Em contrapartida, a resistência ao cisalhamento foi significativamente superior para os painéis produzidos com 150 g/m², alcançando valor médio de 3,49 MPa, enquanto a gramatura de 100 g/m² apresentou média de 1,54 MPa. Os resultados demonstram que o aumento da gramatura do adesivo promoveu uma maior integridade da linha de cola e melhora o desempenho mecânico dos painéis EGP, evidenciando a importância da otimização desse parâmetro para a produção destes painéis.
Palavras-chave: PVA, gramatura de cola, resistência ao cisalhamento.

Characterization of Edge-Glued Panel (EGP)

Abstract: Edge-Glued Panels (EGP) represent a technological alternative for utilizing short wood pieces, adding value to waste materials and contributing to the sustainability of the production chain. The quality of these panels is directly linked to bonding efficiency, with adhesive spread rate being a key factor influencing mechanical performance. This study evaluated the effect of two spread rates of PVA-based adhesive (100 and 150 g/m²) on the physical and mechanical properties of EGP panels made from *Pinus* sp. wood. The panels were manufactured in the laboratory and tested for apparent density and glue-line shear strength. Apparent density showed no significant difference between treatments, ranging from 0.753 to 0.768 g/cm³. In contrast, shear strength was significantly higher for panels produced at a spread rate of 150 g/m², with a mean of 3.49 MPa, whereas the 100 g/m² rate yielded a mean of 1.54 MPa. The results demonstrate that increasing the adhesive spread rate enhances glue-line integrity and improves the mechanical performance of the EGP panels, highlighting the importance of optimizing this parameter for their production.
Keywords: PVA, adhesive rate; shear strength.

1. Introdução

O *Edge Glued Panel* (EGP), também conhecido no Brasil como painel colado lateralmente, é formado pela colagem de sarrafos ou ripas de madeira lado a lado, com ou sem juntas do tipo *finger-joint*. De acordo com Iwakiri et al. (2013), essa tecnologia foi uma alternativa encontrada para aproveitar as peças curtas de madeira, considerando também a redução do desperdício e do rendimento. Em termos práticos, sua utilização é ampla em tampos de mesas, portas, prateleiras e em componentes estruturais leves.

A qualidade do EGP está totalmente relacionada ao tipo de adesivo utilizado, à gramatura e às condições de prensagem, todos esses detalhes influenciando a resistência ao cisalhamento e à flexão. Bianche et al. (2022) destacam que o excesso, por exemplo, pode diminuir a qualidade ao formar linhas de cola espessas e frágeis, enquanto o contrário pode comprometer a adesão das superfícies.

Iwakiri et al. (2021) destacam que o PVA figura entre os principais adesivos utilizados na produção dos painéis EGP. Esta resina apresenta uma alta resistência em ambientes seco (uso interno), apesar de apresentar limitações em condições de elevadas temperaturas e umidade relativa. Bila et al. (2021) relatam que sua utilização eficiente, seja na colagem como na prensagem, faz com que o PVA apresente desempenho satisfatório para manufatura de painéis EGP. Contudo, quando utilizado, suas aplicações limitam-se a aplicações internas devido à sensibilidade à umidade.

Além do tipo de adesivo, outro aspecto fundamental para o bom desempenho de peças coladas de madeira é quantidade de cola utilizada (gramatura). Fonte e Trianoski (2015) destacam que quando a gramatura está abaixo ou acima da ideal, a resistência do painel é significativamente afetada. Quantidades de adesivo acima do ideal, formam uma linha de cola faminta, reduzindo as zonas de ancoragem. Já quando há excesso, além do desperdício da resina que é um dos componentes mais caros do processo, pode ocorrer ainda a formação de uma linha de cola espessa que dificulta o íntimo contato entre as peças, reduzindo a qualidade da ligação.

Neste estudo, avaliou-se a influência de duas gramaturas de adesivo à base de PVA (100 e 150 g/m²) nas propriedades físicas e mecânicas de painéis EGP produzidos com madeira de *Pinus* sp. Foram investigadas duas condições de gramatura (mínima e máxima) para os painéis de EGP. A análise da influência da gramatura nas propriedades mecânicas visa compreender como a quantidade de adesivo influencia o desempenho do painel, contribuindo para o aprimoramento dos processos de fabricação de produtos de madeira colada.

2. Material e métodos

A matéria-prima utilizada para a produção dos painéis foi a madeira de *Pinus* sp., proveniente de embalagens de transporte de equipamentos, descartadas no laboratório de propriedades mecânicas do Centro de Engenharia da Universidade Federal Rural do Semi-Árido – UFERSA. Destas embalagens foram aproveitados sarrafos de 15 mm de espessura para manufatura dos painéis Edge Gued Panel (EGP).

O adesivo utilizado foi o poliacetato de vinila (PVA) da marca CASCOLA®, do tipo Cascorez. Os painéis foram confeccionados na Oficina de marcenaria do curso de Engenharia Florestal, e os ensaios físicos e mecânicos foram executados no laboratório de propriedades mecânicas do Centro de Engenharia.

O processo de manufatura foi iniciado com a avaliação visual dos sarrafos de *Pinus* sp., selecionando os materiais sem a presença de defeitos aparentes, como rachaduras, nós e deformações. Em seguida, estes materiais foram serrados com o auxílio de uma serra fita. Os painéis foram colados com duas gramaturas diferentes de adesivo PVA (100 g/m^2 e 150 g/m^2).

O processo de fabricação dos painéis iniciou-se com a pesagem do adesivo em uma balança analítica. O adesivo foi pesado diretamente sob a superfície dos sarrafos e espalhados com o auxílio de uma espátula. Foram produzidos dois painéis com dimensões de 15 x 20 x 1,8 cm, utilizando os sarrafos de madeira. Após a montagem e a colagem, os sarrafos de madeira foram unidos e prensados com sargentos de aço. Esse procedimento foi realizado com o objetivo de promover maior adesão entre os constituintes. O tempo de prensagem adotado foi de 72h, permitindo que o adesivo curasse por completo e garantisse a resistência necessária (Figura 1).

Após o processo de fabricação, os painéis foram cortados com uma serra de fita para a produção das amostras referentes aos ensaios físicos e mecânicos. Foram realizados testes de determinação da densidade e de resistência ao cisalhamento. Para a determinação da densidade aparente, foram produzidas 12 amostras, sendo 6 por tratamento, com 20 x 18 x 8 mm de comprimento, largura e espessura. Para o ensaio de cisalhamento, os corpos de prova foram confeccionados conforme as orientações da norma europeia EN 314 (2005). Foram confeccionados oito corpos de prova, sendo quatro para cada tratamento. O teste de resistência ao cisalhamento foi realizado em uma máquina universal EMIC, com velocidade de ensaio de 5 mm/min, até a ruptura das amostras (Figura 2).



Figura 1 - Processo de manufatura dos painéis EGP em laboratório.

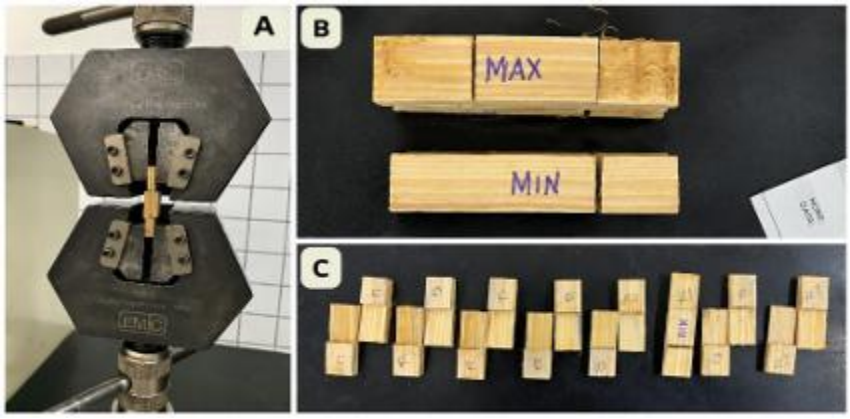


Figura 2 - Amostras de painéis de madeira durante a realização do ensaio de cisalhamento: (a) equipamento universal de ensaios EMIC durante a execução do ensaio; (b) e (c) corpos de prova de painéis colados lateralmente (EGP).

Os dados foram submetidos ao teste de Shapiro–Wilk para normalidade e ao teste de Levene para homogeneidade de variâncias. Em seguida, realizou-se a análise de variância (ANOVA) e, quando identificadas diferenças significativas entre as médias, aplicou-se o teste de Skott-Konott, adotando-se o nível de significância de 5% ($p < 0,05$).

3. Resultados e discussão

A avaliação da densidade aparente dos EGPs evidencia estabilidade relativa entre as duas gramaturas de adesivo PVA (Figura 3). A gramatura de 100 g/m² apresentou densidade média de 0,768 g/cm³, enquanto a gramatura de 150 g/m² apresentou densidade média de 0,753 g/cm³. Apesar da pequena diferença numérica, ambas as médias não diferiram estatisticamente,

indicando ausência de efeito significativo da quantidade de adesivo sobre essa propriedade. Esse resultado pode ser explicado pela própria natureza estrutural desses painéis, nos quais a colagem ocorre predominantemente lateralmente entre peças maciças de madeira. Diferentemente dos painéis laminados ou compensados, em que as lâminas são sobrepostas e a linha de cola participa de forma mais intensa da formação da estrutura, nos painéis EGP, a contribuição do adesivo para a massa total do painel é limitada (Iwakiri et al., 2021). Dessa forma, a densidade aparente tende a ser influenciada majoritariamente pela densidade da madeira de base e pela geometria das peças coladas, e não pela quantidade de adesivo aplicada, uma vez que a massa de cola representa apenas uma fração relativamente pequena da massa total do produto (Silva et al., 2023).

Figura 3 - Variação na densidade aparente das amostras de EGP produzidas com gramaturas de adesivo PVA distintas. Teste de Scott-Knott ($p < 0,05$).

Os resultados do ensaio de resistência ao cisalhamento na linha de cola evidenciam que a quantidade de adesivo aplicada influenciou diretamente o desempenho mecânico dos painéis EGP (Figura 4). Avaliando a variação de carga deformação é possível notar o melhor desempenho para os painéis que utilizaram uma maior quantidade de adesivo em sua produção. Esse comportamento evidencia o papel da gramatura do adesivo na formação, continuidade e integridade da linha de cola, uma vez que quantidades insuficientes podem resultar em regiões com falhas de adesão, enquanto aplicações adequadas favorecem melhor ancoragem mecânica, molhabilidade e interação entre as superfícies de madeira (Iwakiri et al., 2021; Silva et al., 2023).

Figura 4 - Avaliação do comportamento dos painéis EGP colados com diferentes gramaturas de adesivo PVA, submetidos ao ensaio de cisalhamento

Estudos recentes indicam que a resistência de produtos de madeira colada depende fortemente do equilíbrio entre a penetração do adesivo, a coesão interna e a espessura da linha

de cola, sendo a gramatura um dos fatores determinantes para a eficiência da colagem lateral em painéis EGP (Silva et al., 2023; Ejaz et al., 2025).

No ensaio de resistência ao cisalhamento observou-se que a gramatura de 150 g/m² resultou em maior resistência ao cisalhamento, com valor médio de 3,49 MPa, enquanto a gramatura de 100 g/m² apresentou resistência inferior, de 1,54 MPa, indicando uma melhoria significativa no desempenho da colagem com o aumento da gramatura (Figura 5). Fonte e Trianoski (2015), ao avaliarem painéis colados lateralmente produzidos com *Tectona grantis* utilizando diferentes gramaturas de PVA, observaram valores médios de resistência ao cisalhamento que chegaram a cerca de 1,35 MPa.

Figura 5 - Valores de resistência o cisalhamento de painéis EGP colados com diferentes gramaturas de adesivo PVA.

Estudos reforçam essa interpretação ao demonstrar que a resistência ao cisalhamento em painéis EGP é fortemente influenciada pela gramatura do adesivo e pelas condições de prensagem. Iwakiri et al. (2021) observaram que, em painéis EGP produzidos com *Eucalyptus badjensis*, incrementos controlados na quantidade de adesivo resultaram em melhoria significativa da eficiência da linha de cola, especialmente quando associados a parâmetros adequados de pressão e tempo de prensagem. Resultados semelhantes são relatados por Silva et al. (2023), que destacam a importância da aplicação homogênea do adesivo para a obtenção de colagens mais resistentes e estáveis.

Por outro lado, um aumento excessivo da gramatura pode prejudicar o desempenho mecânico. Ejaz et al. (2025) ressaltam que linhas de cola excessivamente espessas tendem a apresentar maior probabilidade de defeitos internos, como zonas frágeis e distribuição não uniforme de tensões, reduzindo a eficiência da transferência de esforços entre as peças coladas. Esse efeito é especialmente relevante em colagens laterais, nas quais a interação direta madeira–madeira desempenha papel fundamental na resistência ao cisalhamento.

Dessa forma, os resultados do presente estudo indicam que a gramatura de 150 g/m² melhorou o desempenho da colagem em painéis EGP, quando comparada à gramatura de 100 g/m². Esse comportamento sugere que a gramatura de 150 g/m² se aproxima de uma condição ótima de colagem, conciliando a adequada formação da linha de cola, a boa ancoragem mecânica e a eficiência na transferência de tensões.

Em síntese, o ajuste preciso da gramatura do PVA é um fator essencial para a otimização do desempenho mecânico e da eficiência produtiva. Os resultados oferecem subsídios relevantes para a indústria de painéis, indicando que a escolha da gramatura deve ser diferenciada e baseada no tipo de painel, na geometria da peça e no esforço mecânico ao qual o painel será submetido.

4. Conclusões

A gramatura do adesivo PVA influenciou significativamente o desempenho mecânico dos painéis EGP produzidos com madeira de *Pinus* sp. A aplicação de 150 g/m² proporcionou maior resistência ao cisalhamento da linha de cola em comparação à gramatura de 100 g/m², evidenciando melhor qualidade de adesão entre os sarrafos. Por outro lado, a variação da gramatura não alterou significativamente a densidade aparente dos painéis, indicando que essa propriedade é predominantemente determinada pelas características da madeira utilizada.

Assim, os resultados indicaram que a utilização de 150 g/m² de adesivo PVA representa a condição mais adequada entre as avaliadas, contribuindo para o aprimoramento do desempenho mecânico dos painéis EGP produzidos a partir de madeira reaproveitada e fornecendo subsídios para a otimização dos processos de fabricação desse produto.

5. Referências bibliográficas

Bianche, J. J., Carneiro, A. C. O., Vital, B. R., Andrade, B. G., Gomes, R. M., Araújo, S. O., & Souza, E. C. (2022). *Improving the understanding of wood bonding: Behavior of different adhesives on the surface of eucalyptus and pine wood*. *International Journal of Adhesion and Adhesives, 112*, 102987. https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2021.102987

Bila, N. F., et al. (2021). *Bonding quality of two lesser-used wood species Brachystegia spiciformis and Julbernardia globiflora from Mozambique*. *Maderas. Ciencia y Tecnología, 23*, 41. https://doi.org/10.4067/S0718-221X2021000100441

Ejaz, H., Awan, M. A., Muzzammil, H. M., Ullah, M., Akhavan-Safar, A., Da Silva, L. F. M., & Tanveer, A. (2025). Methods for improvement/optimization of strength in adhesive joints: A comprehensive review of past and present techniques. *Mechanics of Advanced Materials and Structures, 32*(17), 4078–4106. https://doi.org/10.1080/15376494.2024.2400610

European Committee for Standardization. (2005). *EN 314-1: Plywood—Bonding quality—Part 1: Test methods*. CEN.

Fonte, A. P. N., & Trianoski, R. (2015). Efeito da gramatura sobre a qualidade de colagem lateral da madeira de *Tectona grandis*. *Revista de Ciências Agroveterinárias, 14*(3), 224–233. https://doi.org/10.5965/223811711432015224

Fortunel, C., et al. (2014). Wood specific gravity and anatomy of branches and roots in Amazonian tree species. *New Phytologist, 202*(1), 79–94. https://doi.org/10.1111/nph.12632

Indústria Brasileira de Árvores. (2025). *Relatório anual 2025*. https://iba.org/wp-content/uploads/2025/10/relatorioAnual2025.pdf

Iwakiri, S., Mendes, L., & Trianoski, R. (2013). *Painéis de madeira reconstituída: Fundamentos, produção e aplicações*. UFPR.

Iwakiri, S., et al. (2021). Avaliação dos efeitos do adesivo, gramatura e pressão na qualidade de painéis EGP de *Eucalyptus badjensis*. *Scientia Forestalis, 49*(129), e3437. https://doi.org/10.18671/scifor.v49n129.20

Silva, L. S. Z. R. S., et al. (2023). Propriedades físico-mecânicas da madeira de cajueiro estimadas por métodos não destrutivos com base na densidade aparente e frequência natural de vibração. *Ciência Florestal, 33*(4), e66096. https://doi.org/10.5902/1980509866096

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Caracterização físico-mecânica de painéis lignocelulósicos produzidos com resíduo de *Coffea arabica* L.

Lizbeth Rosario Meza Sanabria[1]; Chris Stephanie Larco Chávez[1]; Maria Dolores Meza Sanabria[1]; Mariane Silva[1]; Lucia Maria Joaquim Assane[1]; Jackelyn Arascely Navarro Chavez1; José Benedito Guimarães Junior[1]; Lourival Marin Mendes[1]

[1] Universidade Federal de Lavras (UFLA), Lavras/MG, Brasil.

Resumo: O aproveitamento da casca de *Coffea arabica* L. (café arábica) para produção de painéis lignocelulósicos representa uma alternativa sustentável para a valorização de resíduos agroindustriais. Este estudo avaliou as propriedades físicas e mecânicas de painéis produzidos com 100% de casca de café e resina ureia-formaldeído. Foram fabricados três painéis experimentais e determinados a densidade aparente, a absorção de água, o inchamento em espessura, o módulo de elasticidade (MoE), o módulo de ruptura (MoR) e a ligação interna. Os painéis apresentaram densidade média de 0,577 g/cm³, próxima da nominal, absorção de água de 33,16% para 55,98% e inchamento de 7,54% para 15,76% após 24 h. O MoE médio foi de 4.799,84 MPa, enquanto MoR e ligação interna indicaram necessidade de otimização. Conclui-se que a casca de *Coffea arabica* L. apresenta potencial para a produção de painéis lignocelulósicos de uso não estrutural, desde que sejam aprimoradas a formulação e as condições de fabricação.

Palavras-chave: Agroindústria; Biomassa Residual; Aproveitamento de Resíduos.

Physical and Mechanical Characterization of Lignocellulosic Particleboards Produced from

Coffea arabica L. Residue

Abstract: The use of *Coffea arabica* L. (Arabica coffee) husk for lignocellulosic particleboard production represents a sustainable alternative for the valorization of agro-industrial residues. This study evaluated the physical and mechanical properties of particleboards manufactured with 100% coffee husk and urea-formaldehyde resin. Three experimental panels were produced and tested for apparent density, water absorption, thickness swelling, modulus of elasticity (MoE), modulus of rupture (MoR), and internal bond strength. The panels showed an average density of 0.577 g/cm³, close to the target density, while water absorption increased from 33.16% to 55.98% and thickness swelling from 7.54% to 15.76% after 24 h of immersion. The average MoE was 4,799.84 MPa, whereas MoR and internal bond strength indicated limitations for structural applications. These results demonstrate that *Coffea arabica* L. husk is a promising

raw material for non-structural lignocellulosic particleboards, provid (that panel formulation and manufacturing conditions are further optimized.

Keywords: Residual Biomass; Sustainability; Waste Valorization.

1. Introdução

A crescente demanda por materiais sustentáveis tem impulsionado a busca por matérias-primas alternativas para a produção de painéis lignocelulósicos, visando reduzir a pressão sobre os recursos florestais e promover o aproveitamento de resíduos agroindustriais. Nesse contexto, o uso de biomassas residuais tem se destacado como uma estratégia para agregar valor aos resíduos, minimizar impactos ambientais e fortalecer os princípios da economia circular (Ikubanni et al., 2025; Papadopoulou et al., 2025).

Entre esses resíduos, os provenientes da cadeia produtiva do café apresentam elevado potencial devido à sua disponibilidade e composição lignocelulósica. Estudos recentes demonstram a viabilidade do emprego da casca de café na produção de painéis de partículas, isoladamente ou associada à madeira (Martins et al., 2021; Scatolino et al., 2017). Entretanto, o desempenho físico-mecânico depende da composição da biomassa, da granulometria, do sistema adesivo, da densidade e das condições de processamento (Barasa et al., 2025; Papadopoulou et al., 2025).

Dessa forma, a avaliação das propriedades físicas e mecânicas é fundamental para determinar a qualidade e a viabilidade de aplicação desses painéis. Entre as propriedades físicas destacam-se a densidade aparente, a absorção de água e o inchamento em espessura, enquanto o módulo de elasticidade (MOE), o módulo de ruptura (MOR) e a ligação interna representam os principais parâmetros mecânicos utilizados para verificar o desempenho e o atendimento às exigências normativas (Papadopoulou et al., 2025; Ikubanni et al., 2025). Diante desse contexto, o objetivo deste trabalho foi avaliar as propriedades físicas e mecânicas de painéis lignocelulósicos produzidos com resíduo de café.

2. Material e métodos

2.1 Local de execução e materiais

Os painéis experimentais foram produzidos na Universidade Federal de Lavras (UFLA), utilizando casca de *Coffea arabica* L. (café arábica) como matéria-prima lignocelulósica. A

formulação experimental foi composta por 100% de casca de café, resina ureia-formaldeído (UF) correspondente a 25% de sólidos em relação à massa seca da casca e emulsão de parafina equivalente a 1% de sólidos, empregada como agente hidrofugante. A matéria-prima foi utilizada com umidade em aproximadamente 8%, enquanto o acondicionamento dos painéis foi realizado em ambiente climatizado a 20 ± 2 °C e 65 ± 5% de umidade relativa, antes da realização dos ensaios físicos e mecânicos. Foram confeccionados três painéis experimentais (P1, P2 e P3), com dimensões nominais de 480 mm x 480 mm x 15 mm e densidade nominal de 600 kg m^{-3}, mantendo-se a mesma composição e condições de fabricação para todas as unidades experimentais.

1.1. Delineamento experimental

O experimento foi conduzido utilizando um delineamento inteiramente casualizado (DIC), sendo produzidos três painéis experimentais independentes (P1, P2 e P3), todos fabricados sob as mesmas condições de processamento e com composição nominal idêntica. Cada painel constituiu uma unidade experimental independente, permitindo a avaliação da variabilidade entre as repetições.

Após o acondicionamento, os painéis foram seccionados para obtenção dos corpos de prova destinados aos ensaios físicos e mecânicos. Para cada painel foram retirados três corpos de prova para determinação da densidade aparente, três para absorção de água (AA) e inchamento em espessura (IE), três para flexão estática (MOE e MOR) e três para ligação interna (LI), totalizando 36 corpos de prova. As dimensões dos corpos de prova e os procedimentos de ensaio seguiram as recomendações das normas técnicas específicas para painéis de partículas.

1.1. Fabricação dos painéis

Para a fabricação dos painéis, a casca de café foi preparada visando à obtenção de uma distribuição homogênea das partículas e acondicionada até atingir a umidade de processamento. Em seguida, a resina ureia-formaldeído e a emulsão de parafina foram aplicadas de modo a promover distribuição uniforme sobre as partículas lignocelulósicas (Tabela 1).

Tabela 1 – Parâmetros empregados na fabricação dos painéis

Parâmetro	Valor
Matéria-prima	100% casca de café
Resina UF	25% de sólidos (base massa seca da casca)
Emulsão de parafina	1% de sólidos
Umidade da matéria-prima	8%
Dimensões dos painéis	480 mm x 480 mm x 15 mm
Densidade nominal	600 kg m^{-3}
Temperatura de prensagem	140 °C
Pressão específica	2,61 MPa
Tempo de prensagem	8 min
Número de painéis	3 (P1, P2 e P3)

Após a homogeneização da mistura, o material foi distribuído no molde para formação do colchão de partículas e submetido à prensagem a quente conforme os parâmetros apresentados na Tabela 1. Após a prensagem, os painéis foram identificados como P1, P2 e P3 e acondicionados nas condições descritas na Seção 2.1.

1.1. Corte e identificação dos corpos de prova

Após o acondicionamento, os painéis foram seccionados para obtenção dos corpos de prova destinados à caracterização física e mecânica. O plano de corte foi elaborado de forma a garantir a distribuição homogênea das amostras ao longo da superfície dos painéis, minimizando possíveis efeitos decorrentes da posição de retirada.

Os corpos de prova foram identificados conforme o painel de origem (P1, P2 e P3), o tipo de ensaio e o número sequencial da amostra. Essa codificação permitiu assegurar a rastreabilidade de todas as determinações experimentais durante a execução dos ensaios laboratoriais e da análise dos resultados.

1.1. Caracterização física

A caracterização física compreendeu a determinação da densidade aparente, da absorção de água após 2 h e 24 h e do inchamento em espessura após 2 h e 24 h, de acordo com as normas da International Organization for Standardization (ISO, 2003b, 2003d), da ASTM International (2012) e da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT, 2018)(Tabela 2). A densidade aparente foi determinada pela relação entre a massa e o volume dos corpos de prova. A absorção de água e o inchamento em espessura foram calculados a partir das variações relativas de massa e espessura, respectivamente, em relação aos valores iniciais.

Tabela 2 – Ensaios de caracterização física realizados nos painéis

Propriedade	Corpos de prova por painel	Total	Norma utilizada
Densidade aparente	3	9	(ISO, 2003d; ABNT, 2018)
Absorção de água (2 e 24 h)	3	9	(ASTM International, 2012; ABNT, 2018)
Inchamento em espessura (2 e 24 h)	3	9	(ISO, 2003b; ABNT, 2018)

Nota: os mesmos corpos de prova foram utilizados para a determinação de AA e IE; o total considera os três painéis.

1.1. Caracterização mecânica dos painéis

A caracterização mecânica compreendeu a determinação do módulo de elasticidade (MoE), do módulo de ruptura (MoR) e da ligação interna (LI) (Tabela 3). Para cada painel, foram utilizados três corpos de prova no ensaio de flexão estática, a partir do qual foram determinados o MoE e o MoR, e três corpos de prova no ensaio de ligação interna.

Tabela 3 – Ensaios de caracterização mecânica dos painéis

Propriedade	Corpos de prova por painéis	Total	Norma utilizada
MoE e MoR	3	9	(ISO, 2003a; ABNT, 2018)
Ligação interna	3	9	(ISO, 2003c; ABNT, 2018)

1.1. Análise estatística

Para cada propriedade, o valor representativo de cada painel foi obtido pela média aritmética de três corpos de prova. Os painéis P1, P2 e P3 foram considerados unidades experimentais independentes. As médias dos três painéis foram submetidas à análise estatística descritiva, calculando-se a média geral, o desvio-padrão e o coeficiente de variação. Os resultados foram apresentados na forma de média ± desvio-padrão, considerando-se n=3 painéis. Os gráficos foram elaborados no Microsoft Excel a partir dos valores médios obtidos para cada painéis.

3. Resultados e discussão

3.1 Propriedades físicas

A densidade média foi de 0,577 ± 0,006 g/cm³ (CV = 1,00%), correspondendo a 96,1% da densidade nominal de 0,60 g/cm³. A baixa dispersão indica uniformidade de massa e volume entre os painéis. Essa uniformidade é relevante, pois a densidade está associada ao grau de compactação e ao desempenho físico-mecânico dos painéis (Rachtanapun et al., 2012). A pequena diferença em relação ao valor nominal indica que a densidade obtida permaneceu próxima à estabelecida para a fabricação dos painéis.

A absorção de água aumentou de 33,16 ± 2,23% após 2 h para 55,98 ± 4,27% após 24 h, enquanto o inchamento em espessura passou de 7,54 ± 2,40% para 15,76 ± 1,94% no mesmo período (Figura 1). Esses resultados demonstram a continuidade da entrada de água nos painéis e indicam sensibilidade do material à umidade. Esse comportamento é compatível com a natureza hidrofílica dos constituintes lignocelulósicos e com a estrutura porosa dos painéis, fatores que favorecem a absorção de água (Papadopoulou et al., 2025). Embora maiores teores de resina possam melhorar a ligação entre as partículas e reduzir a penetração de água (Barasa et al., 2025), esse efeito não foi avaliado diretamente no presente estudo.

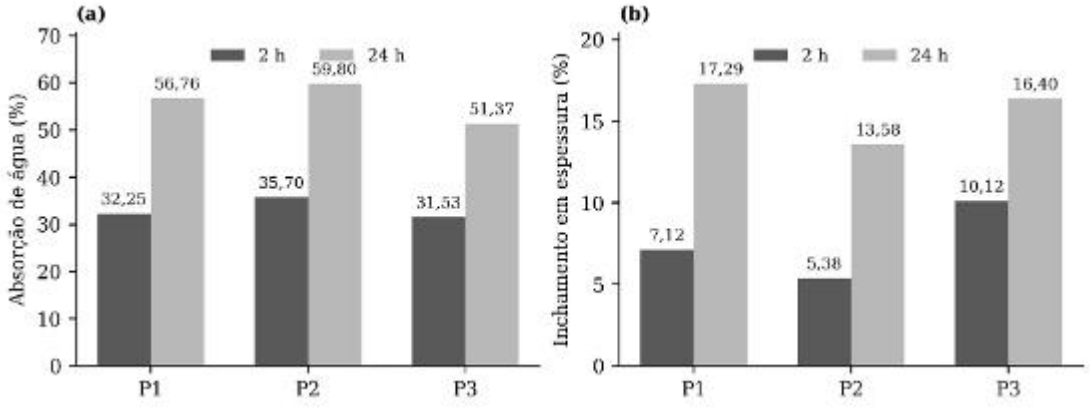


Figura 1 – Propriedades físicas dos painéis: (a) absorção de água; e (b) inchamento em espessura após 2 e 24 h de imersão.

Mesmo com a presença de emulsão de parafina, a formulação permaneceu permeável à água após 24 h. Em painéis de bagaço aglutinados com pMDI, Xu et al. (2009) observaram redução da absorção de água e do inchamento em espessura com o uso de emulsão de cera, destacando a interação entre os teores de cera e adesivo. Em escala industrial, Çamlıbel e Aydın

(2025) verificaram que a resposta à parafina também depende da densidade e da interação com o sistema adesivo. No presente estudo, P2 apresentou a maior AA em 24 h (59,80%), mas o menor IE (13,58%), indicando que a quantidade de água absorvida não foi diretamente proporcional à expansão em espessura, provavelmente devido a diferenças locais de porosidade, compactação e distribuição do adesivo e da parafina.

3.2 Propriedades mecânicas

O MoE apresentou média de 4.799,84 ± 2.256,78 MPa e o maior coeficiente de variação (47,02%). P1 e P3 atingiram 6.232,67 e 5.968,45 MPa, enquanto P2 apresentou 2.198,41 MPa. Como P1 e P2 possuíam a mesma densidade média, a diferença de rigidez sugere influência de heterogeneidades internas, como gradiente de densidade, geometria das partículas, distribuição do adesivo e compactação localizada.

O MoR médio foi de 3,26 ± 1,00 MPa (CV = 30,63%), com maior valor em P3 (4,40 MPa). A LI foi mais uniforme, com média de 0,27 ± 0,01 MPa e CV de 3,70% (Figura 2). A combinação de MoE relativamente elevado em P1 e P3 com MoR reduzido indica que a rigidez inicial não foi acompanhada por resistência proporcional até a ruptura.

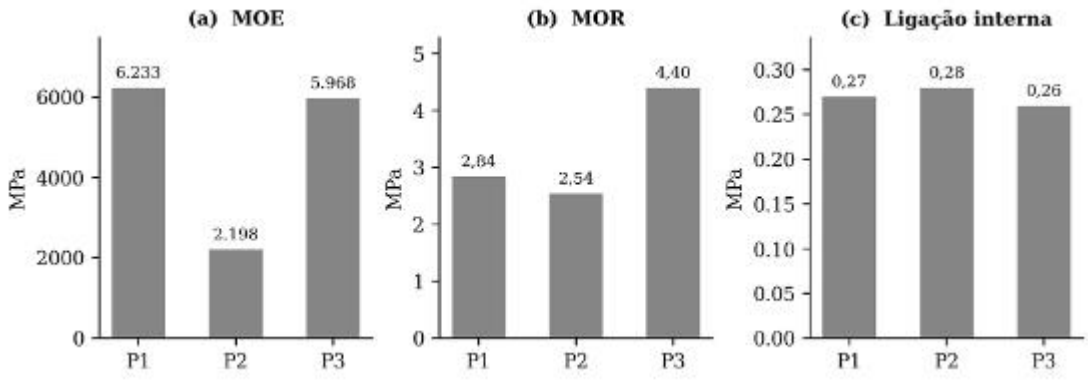


Figura 2 – Propriedades mecânicas dos painéis: (a) módulo de elasticidade; (b) de ruptura; e (c) ligação interna.

O MoE médio situou-se na faixa relatada para painéis produzidos exclusivamente com casca de café e UF, enquanto MoR e LI permaneceram na porção inferior dos valores publicados (Barasa et al., 2025). Em painéis híbridos contendo casca de café, partículas de eucalipto e adesivo tanino-UF, Martins et al. (2021) observaram maior MoR e LI, reforçando que a combinação de matérias-primas e o sistema adesivo afetam de forma distinta rigidez, ruptura e coesão interna.

De forma integrada, a formulação apresentou densidade homogênea e LI pouco variável, mas elevada AA, inchamento progressivo e baixa resistência à ruptura. A maior variabilidade de

MoE, MoR e IE após 2 h indica sensibilidade à heterogeneidade do colchão. O desempenho de painéis derivados de resíduos resulta da interação entre composição, granulometria, densificação, teor de adesivo e regime térmico (Papadopoulou et al., 2025). Portanto, devem ser aprimorados a distribuição do adesivo e das partículas, a hidrofugação e o ciclo de prensagem.

4. Conclusões

Os painéis produzidos com casca de café apresentaram densidade uniforme e próxima ao valor nominal estabelecido. A absorção de água e o inchamento em espessura aumentaram entre 2 e 24 h de imersão, indicando menor estabilidade dimensional após exposição prolongada à água. O módulo de elasticidade médio apresentou valores compatíveis com os relatados para painéis produzidos com casca de café, embora tenha sido observada variabilidade entre os painéis. Os resultados de módulo de ruptura e ligação interna indicam que ajustes na formulação e no processo de fabricação podem contribuir para o aumento da resistência mecânica.

De forma geral, os resultados confirmam o potencial da casca de café como matéria-prima lignocelulósica para a produção de painéis de partículas. A otimização da granulometria, do teor e da distribuição do adesivo, da hidrofugação e das condições de prensagem poderá melhorar o desempenho físico-mecânico e ampliar as possibilidades de aplicação do material.

5. Agradecimentos

À Universidade Federal de Lavras (UFLA) e à Unidade Experimental de Produção de Painéis de Madeira (UEPAM) pela infraestrutura laboratorial. Agradecemos, de forma especial, ao Prof. José Benedito Guimarães Junior, pela orientação, pelos ensinamentos e pelo apoio científico ao longo da realização deste trabalho. Também agradecemos à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) pelo apoio à formação e à pesquisa.

6. Referências bibliográficas

Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2018). *ABNT NBR 14810-2: Painéis de partículas de média densidade — Parte 2: Requisitos e métodos de ensaio*.

ASTM International. (2012). *ASTM D1037-12: Standard test methods for evaluating properties of wood-base fiber and particle panel materials*.

Barasa, N. W., Mbuya, T. O., Jalalvand, M., & Sanadi, A. R. (2025). Exploring sustainable upcycled composite materials from agro-industrial food waste: Physical and mechanical properties analysis. *MRS Advances*, *10*, 1109–1116. https://doi.org/10.1557/s43580-025-01285-w

Çamlıbel, O., & Aydın, M. (2025). Influence of paraffin on MDF properties at industrial scale. *Wood Research*, *70*(1), 127–138. https://doi.org/10.37763/wr.1336-4561/70.1.127138

Ikubanni, P. P., Adeleke, A. A., Adekanye, T. A., Aladegboye, O. J., Agboola, O. O., & Ogunsemi, B. T. (2025). Particleboard from biomass wastes: A review of production techniques, properties, and future trends. *Research on Engineering Structures and Materials*, *11*(2), 713–740. https://doi.org/10.17515/resm2024.265ma0502rv

International Organization for Standardization. (2003a). *ISO 16978:2003: Wood-based panels — Determination of modulus of elasticity in bending and of bending strength*. https://www.iso.org/standard/32836.html

International Organization for Standardization. (2003b). *ISO 16983:2003: Wood-based panels — Determination of swelling in thickness after immersion in water*. https://www.iso.org/standard/32840.html

International Organization for Standardization. (2003c). *ISO 16984:2003: Wood-based panels — Determination of tensile strength perpendicular to the plane of the panel*. https://www.iso.org/standard/32841.html

International Organization for Standardization. (2003d). *ISO 9427:2003: Wood-based panels — Determination of density*. https://www.iso.org/standard/32853.html

Martins, R. S. F., Gonçalves, F. G., Segundinho, P. G. A., Lelis, R. C. C., Paes, J. B., Lopez, Y. M., Chaves, I. L. S., & Oliveira, R. G. E. (2021). Investigation of agro-industrial lignocellulosic wastes in fabrication of particleboard for construction use. *Journal of Building Engineering*, *43*, 102903. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.102903

Papadopoulou, E., Moutousidis, D., Achelonoudis, C., Tsompanidis, S., Kyriakou-Tziamtzi, C., Chrissafis, K., & Bikiaris, D. N. (2025). Particleboards with various biomass residues. *Materials*, *18*(11), 2632. https://doi.org/10.3390/ma18112632

Rachtanapun, P., Sattayarak, T., & Ketsamak, N. (2012). Correlation of density and properties of particleboard from coffee waste with urea–formaldehyde and polymeric methylene diphenyl diisocyanates. *Journal of Composite Materials*, *46*(15), 1839–1850. https://doi.org/10.1177/0021998311426624

Scatolino, M. V., Costa, A. de O., Guimarães Júnior, J. B., Protásio, T. de P., Mendes, R. F., & Mendes, L. M. (2017). Eucalyptus wood and coffee parchment for particleboard production: Physical and mechanical properties. *Ciência e Agrotecnologia*, *41*(2), 139–146. https://doi.org/10.1590/1413-70542017412038616

Xu, X., Yao, F., Wu, Q., & Zhou, D. (2009). The influence of wax-sizing on dimension stability and mechanical properties of bagasse particleboard. *Industrial Crops and Products*, *29*(1), 80–85. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2008.04.008

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Casca de mamona como matéria-prima alternativa para painéis aglomerados

Lúcia Maria Joaquim Assane[1]; Bettina Pádua Nogueira Betzel Lemke[1];
Ana Carolina Corrêa Furtini[1]; Lorran de Sousa Arantes[1], Maria Dolores Meza Sanabria[1],
Lizbeth Rosario Meza Sanabria[1], José Benedito Guimarães Júnior[1], Lourival Marin Mendes[1]

[1] Universidade Federal de Lavras (UFLA), Lavras, Minas Gerais, Brasil

Resumo: Este estudo avaliou painéis aglomerados de *Pinus oocarpa* com incorporação de casca de mamona nas proporções de 0, 25, 50, 75 e 100%, utilizando 12% de adesivo ureia-formaldeído. Foram analisadas a composição química da madeira e do resíduo, além das propriedades físicas e mecânicas dos painéis, por meio da comparação dos valores obtidos entre os tratamentos. A casca de mamona apresentou menor teor de holocelulose e maiores teores de extrativos e cinzas em relação à madeira de pinus, indicando composição química menos favorável à adesão entre partículas. As propriedades físicas mantiveram-se adequadas, especialmente quanto à densidade aparente, razão de compactação e teor de umidade. Entretanto, o aumento da casca reduziu o módulo de elasticidade e o módulo de ruptura. Conclui-se que o resíduo apresenta potencial físico para produção de painéis aglomerados, porém sua incorporação deve ser limitada devido à redução do desempenho mecânico para aplicações que exijam elevada resistência estrutural.
Palavras-chave: Resíduos lignocelulósicos; Ureia-formaldeído; Propriedades físico-mecânicas.

Castor bean husk as an alternative raw material for particleboard

Abstract: This study evaluated particleboards produced with *Pinus oocarpa* and castor bean husk incorporation at proportions of 0, 25, 50, 75, and 100%, using 12% urea-formaldehyde adhesive. The chemical composition of the wood and residue was analyzed, along with the physical and mechanical properties of the panels, through comparison of values obtained among treatments. Castor bean husk showed lower holocellulose content and higher extractives and ash contents compared with pine wood, indicating a chemical composition less favorable to particle bonding. The physical properties remained adequate, especially apparent density, compaction ratio, and moisture content. However, increasing castor bean husk content reduced the modulus of elasticity and modulus of rupture. It is concluded that this residue has physical potential for particleboard production; however, its incorporation should be limited due to reduced mechanical performance in applications requiring high structural resistance and should be combined with process optimization strategies in future studies for better performance.
Keywords: Lignocellulosic residues; Urea-formaldehyde; Physical-mechanical properties.

1. Introdução

A crescente demanda por materiais derivados da madeira, especialmente na indústria de painéis reconstituídos, tem impulsionado a busca por alternativas sustentáveis e economicamente viáveis (Dukarska et al., 2025). Nesse contexto, os painéis aglomerados destacam-se por sua ampla utilização na construção civil e no setor moveleiro, sendo

tradicionalmente produzidos a partir de partículas de madeira unidas por resinas sob pressão e temperatura elevadas (Brito et al., 2023). No entanto, o aumento da demanda global, aliado à limitação de recursos florestais, tem incentivado o desenvolvimento de materiais alternativos, como resíduos lignocelulósicos de origem agrícola (Lee et al., 2022).

Nesse sentido, a utilização de biomassas agrícolas surge como estratégia promissora, uma vez que esses resíduos são abundantes, renováveis e apresentam composição química semelhante à madeira, sendo constituídos principalmente por celulose, hemicelulose e lignina (Furtini et al., 2023).

O aproveitamento desses resíduos também se relaciona aos princípios da economia circular, ao contribuir para a valorização de subprodutos agrícolas e redução da dependência da madeira (Lee et al., 2022; Dukarska et al., 2025). Diversos resíduos lignocelulósicos vêm sendo investigados para essa finalidade, incluindo resíduos de sorgo, feijão, miriti e trigo, com desempenho variável em função da composição química, densidade, granulometria e compatibilidade com o adesivo utilizado (Guimarães Júnior et al., 2016; Furtini et al., 2023; Miranda et al., 2023; Villarruel et al., 2023). Dentre as diversas matérias-primas renováveis disponíveis, destaca-se a casca de mamona (*Ricinus communis* L.), subproduto associado à cadeia produtiva da mamona (Brito et al., 2023).

Nesse cenário, uma alternativa de aproveitamento desse resíduo é sua utilização na produção de materiais compósitos, como painéis de partículas, agregando valor ao material e contribuindo para a redução de custos industriais (Mendes et al., 2012; Silva et al., 2018). Embora diversas pesquisas apresentem resultados satisfatórios quanto ao uso de resíduos em painéis, a avaliação das propriedades mecânicas ainda demanda estudos adicionais, uma vez que cada matéria-prima possui características específicas que influenciam diretamente na qualidade final do produto (Brito et al., 2023).

Diante do exposto, o objetivo deste estudo é avaliar as propriedades de painéis aglomerados produzidos com a incorporação da casca de mamona, em substituição parcial ao *Pinus oocarpa*, madeira amplamente utilizada na indústria moveleira.

2. Material e métodos

2.1 Origem e colheita dos materiais

As cascas de mamona foram coletadas no Departamento de Engenharia, no setor de Biodiesel da Universidade Federal de Lavras (UFLA). A madeira de pinus foi obtida de plantios experimentais da mesma universidade, localizados em Lavras–MG. Para o estudo, foram

selecionadas três árvores de *Pinus oocarpa*, com idade aproximada de 28 anos, cultivadas no campus da UFLA (21º 14’ 45” S; 44º 59’ 59” W; altitude de 920 m).

Após a coleta, as árvores foram seccionadas em toretes de 58 cm. Além disso, foram retirados cinco discos de cada árvore em alturas correspondentes a 0, 25, 50, 75 e 100% da altura comercial, destinados à caracterização química e à determinação da densidade básica. Estes foram encaminhados à Unidade Experimental de Produção de Painéis de Madeira (UEPAM) da UFLA.

Posteriormente, os discos foram divididos em quatro partes, obtendo-se duas cunhas opostas destinadas à análise química e outras duas à determinação da densidade básica na sequência, os toretes foram imersos em água a 85 ºC por 48 horas, com o objetivo de promover o cozimento e o amolecimento da madeira, facilitando o processo de laminação.

As lâminas foram então produzidas em torno laminador, com espessura nominal de 2 mm, sendo posteriormente secas ao ar e em estufa até atingirem teor de umidade de aproximadamente 8%. Em seguida, tanto as lâminas quanto as cascas de mamona foram moídas em moinho de martelos, utilizando peneira com abertura de 2 mm.

O material obtido foi classificado, sendo selecionada a fração retida na malha 40 (0,420 mm), com o objetivo de garantir maior uniformidade das partículas. Por fim**,** as partículas foram novamente secas em estufa a 90 ºC, até atingirem teor de umidade próximo de 5%.

2.2 Produção dos painéis aglomerados

Os painéis foram produzidos com densidade nominal de 700 $kg \cdot m^{-3}$ e dimensões de 250 × 250 × 15 mm, com substituição parcial das partículas de *pinus* por partículas de casca de mamona, em porcentagem de massa. Foram avaliados cinco tratamentos, correspondentes à substituição das partículas de *Pinus oocarpa* por casca de mamona nas proporções de 0, 25, 50, 75 e 100%.

Para a produção, as partículas de pinus e casca de mamona foram misturadas ao adesivo ureia-formaldeído (UF), na proporção de 12% em relação à massa seca das partículas. Em seguida, o colchão formado foi submetido à pré-prensagem em prensa manual, à temperatura

ambiente, sob pressão de 0,5 MPa, com o objetivo de retirar o ar e promover a pré-consolidação. Posteriormente, os painéis foram prensados a 160 ºC, sob pressão específica de 4 MPa, durante 15 minutos, resultando em painéis homogêneos. Para cada tratamento**,** foram produzidos três painéis.

Após a prensagem, os painéis foram acondicionados em ambiente com temperatura de 20 ± 3 °C e umidade relativa de 65 ± 5% até atingirem massa constante. Na sequência, foram submetidos ao processo de esquadrejamento, para remoção dos efeitos de borda e, posteriormente, foram cortados em corpos de prova com auxílio de serra circular.

2.3 Caracterização física e química dos materiais lignocelulósicos

A densidade básica da madeira de *pinus oocarpa* foi determinada de acordo com a norma NBR 11941 (ABNT, 2003). Já a densidade das cascas de mamona foi determinada com adaptações no método de medição de volume (método de deslocamento), conforme descrito por Silva et al. (2015).

Para a caracterização química dos materiais, foram determinados os teores de extrativos, lignina e cinzas, utilizando-se, respectivamente, as normas NBR 14853 (ABNT, 2010), NBR 7989 (ABNT, 2010) e NBR 13999 (ABNT, 2017). A porcentagem de holocelulose foi obtida pelo método de diferença H (%) = 100 - (% Extrativos totais + % Lignina insolúvel + % Cinzas).

2.4 Análises físico-mecânicas dos painéis

Os ensaios físico-mecânicos foram realizados de acordo com os procedimentos estabelecidos pela norma brasileira ABNT NBR 14810-2 (ABNT, 2018). Foram avaliadas as seguintes propriedades: densidade aparente (DA), teor de umidade, razão de compactação, módulo de ruptura (MOR) e módulo de elasticidade (MOE).

2.5 Análises Estatísticas

Para a produção dos painéis de partículas com 5 tratamentos, adotou-se um delineamento inteiramente casualizado (DIC). Para a composição química e as propriedades mecânicas dos painéis, utilizou-se o teste de Scott-Knott com nível de confiança de 95% e desvio padrão. Para caracterizar as propriedades físicas dos painéis, foram utilizadas análises de variância e regressão, ambas com nível de significância de 5%, exceto para a densidade

aparente e a umidade, avaliadas pelo teste F na análise de variância (ANOVA).

3. Resultados e discussão

3.1 Caracterização dos materiais lignocelulósicos

A Tabela 1 apresenta os valores médios da densidade básica e da caracterização química da madeira de *pinus* e do resíduo de casca de mamona.

Tabela 1– Caracterização física e química dos materiais lignocelulósicos

Materiais	**Densidade Básica (g/cm³)**	**Extrativos (%)**	**Lignina (%)**	**Cinzas (%)**	**Holocelulose (%)**
Pinus Oocarpa	0,48	6,18	29,28	1,25	63,29
Casca de Mamona	0,30	34,98	22,78	6,50	34,70

A madeira de *Pinus oocarpa* e a casca de mamona apresentaram baixa densidade básica, característica favorável à produção de painéis aglomerados, por possibilitar maior razão de compactação e adequada consolidação do colchão durante a prensagem (Iwakiri & Trianoski, 2020; Bufalino et al., 2012). A casca de mamona apresentou maior teor de extrativos e cinzas e menor teor de holocelulose em relação à madeira, indicando composição química menos favorável à adesão entre partículas. Esse comportamento pode influenciar negativamente a eficiência de colagem e o desempenho mecânico dos painéis, conforme também observado em estudos com resíduos lignocelulósicos incorporados a painéis aglomerados (Silva et al., 2018; Villarruel et al., 2023). Por outro lado, os valores de lignina foram próximos entre os materiais, aspecto que pode favorecer parcialmente a coesão das partículas.

3.2 Propriedades físicas dos painéis

Na Tabela 2 estão apresentados os valores médios encontrados para densidade aparente e razão de compactação. Verifica-se que os painéis apresentaram densidade média

inferior à densidade nominal prevista (0,70 g/cm³) e não houve efeito estatisticamente significativo da adição do resíduo de mamona na densidade aparente dos painéis de partículas. Esse comportamento é comum em experimentos laboratoriais e pode estar relacionado à perda de materiais ao longo da produção dos colchões, durante a pré-prensagem, na etapa de prensagem a quente e após a retirada dos painéis da prensa. Nessa última fase, pode ocorrer aumento do volume dos painéis, resultando na redução da densidade final (Guimarães Júnior et al., 2016; Bazzetto et al., 2019). Todos os painéis podem ser classificados como de média densidade, conforme a NBR 14810-2 (ABNT, 2018), pois os valores obtidos foram entre 551 g/cm³ e 750 g/cm³.

Tabela 2 – Densidade aparente e razão de compactação dos painéis aglomerados

Resíduo mamona (%)	Densidade aparente (g/cm3)	Razão de compactação
0	0.61 ± 0.02 A	1.32 ± 0.03 A
25	0.63 ± 0.03 A	1.34 ± 0.04 A
50	0.63 ± 0.02 A	1.35 ± 0.03 A
75	0.62 ± 0.02 A	1.39± 0.03 A
100	0.64 ± 0.02 A	1.36± 0.03 A

Os valores da razão de compactação dos painéis estão apresentados na (Tabela 2). Observa-se que os valores de razão de compactação foram semelhantes entre os tratamentos, não indicando tendência clara de variação em função do teor de resíduo. Destaca-se ainda que todos os valores obtidos se encontram dentro da faixa recomendada por Maloney (1993), entre 1,3 e 1,6, indicando adequada densificação e consolidação dos painéis na espessura final especificada.

O teor de umidade apresentou valores dentro da faixa estabelecida pela ABNT NBR 14810-2 (ABNT, 2018), entre 5 e 11%. Observou-se leve aumento com a incorporação da casca de mamona, porém os valores permaneceram próximos aos obtidos para os painéis produzidos exclusivamente com *Pinus oocarpa*.

A norma brasileira NBR 14810 (ABNT, 2018) estipula valores de umidade entre 5 e 11%, portanto todos os tratamentos estão dentro do padrão mencionado, indicando assim um bom comportamento do resíduo de mamona, já que apresentaram teores próximos aos da madeira de pinho. A baixa variação no teor de umidade pode ser explicada pela composição da

casca de mamona, que apresenta menor teor de holocelulose (menos grupos hidrofílicos). Esse fator reduz a absorção de água, mantendo os valores de umidade próximos aos do *Pinus oocarpa*, mesmo com o aumento do resíduo.

3.3 Propriedades mecânicas dos painéis

Na Figura 3 são apresentados os valores de módulo de elasticidade (MOE), observa-se que o acréscimo do resíduo de mamona proporciona um decréscimo, sendo que a cada 1% de inserção do resíduo, ocorreu uma redução de ordem de 6,03 MPa.

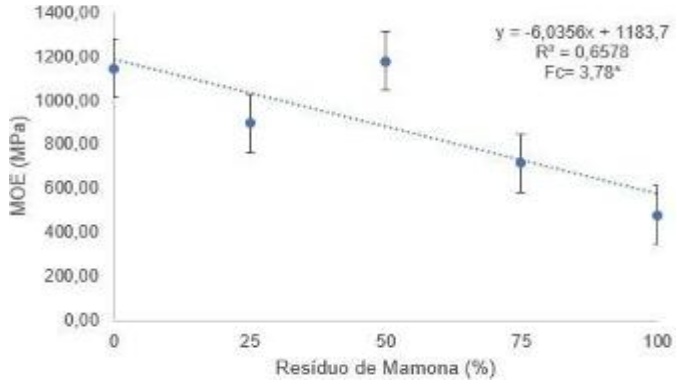


Figura 1 : Módulo de Elasticidade (MOE)

A redução do MOE com o aumento do teor de resíduo de mamona pode ser explicada pela sua composição química. A casca de mamona apresenta menor teor de holocelulose e lignina em comparação ao *Pinus oocarpa*, componentes diretamente relacionados à rigidez e resistência do material. Além disso, o alto teor de extrativos e cinzas pode prejudicar a adesão entre partículas e a eficiência da colagem (Iwakiri & Trianoski, 2020). Como resultado, há redução na rigidez dos painéis, refletindo em menores valores de MOE com o aumento do resíduo.

A norma brasileira ABNT NBR 14810-2 (ABNT, 2018), estabelece como requisito mínimo o valor de 1.800 MPa para o MOE, sendo que nenhum dos tratamentos atendeu a esse limite. Esse resultado pode estar associado não apenas à incorporação do resíduo de mamona, mas também a possíveis fatores relacionados ao processo experimental. Mesmo os painéis produzidos apenas com *Pinus oocarpa* apresentaram valores inferiores ao exigido, o que sugere influência de condições laboratoriais, como distribuição, adesão e umidade das partículas. Esses

fatores podem comprometer a formação de ligações eficientes entre as partículas, reduzindo a rigidez dos painéis.

Comportamento semelhante foi observado em estudos com diferentes resíduos agrícolas incorporados a painéis aglomerados, nos quais a redução do desempenho mecânico foi atribuída à menor compatibilidade entre partículas, à composição química dos resíduos e à interferência na eficiência de colagem (Silva et al., 2018; Miranda et al., 2023; Villarruel et al., 2023).

Na Figura 4 estão apresentados os valores de módulo de ruptura (MOR), observa-se que o acréscimo do resíduo de mamona proporciona um decréscimo, sendo que a cada 1% de inserção do resíduo, ocorreu uma redução de ordem de 0,09 MPa.

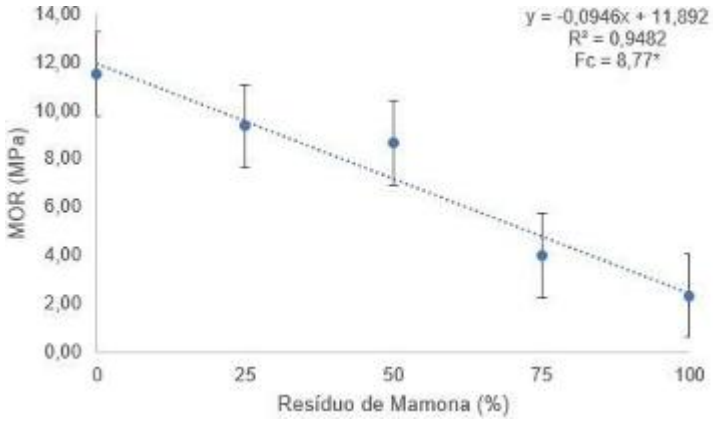


Figura 2: Módulo de Ruptura (MOR)

A norma brasileira ABNT NBR 14810-2 (ABNT, 2018) estipula como requisito mínimo para o MOR um valor de 11,00 MPa. Observa-se que, apenas a madeira de pinus atingiu o mínimo estabelecido por norma. O MOR diminuiu com o aumento do resíduo de mamona, indicando menor resistência à flexão dos painéis. Isso ocorre devido ao menor teor de componentes estruturais e ao maior teor de extrativos e cinzas, que prejudicam a adesão entre partículas (Iwakiri & Trianoski, 2020).

4 Conclusões

Conclui-se que a casca de mamona apresenta potencial de uso como matéria-prima alternativa na produção de painéis aglomerados, principalmente quanto às propriedades físicas avaliadas. Os painéis apresentaram densidade aparente dentro da faixa de média densidade, razão de compactação adequada e teor de umidade dentro dos limites normativos. Entretanto, a

incorporação da casca de mamona reduziu o desempenho mecânico dos painéis, com decréscimo dos valores de módulo de elasticidade e módulo de ruptura. Nenhum tratamento atendeu ao requisito mínimo de MOE, e apenas o painel controle atingiu o valor mínimo de MOR. Assim, o resíduo é promissor do ponto de vista físico, porém sua utilização deve ser limitada ou associada a estratégias de melhoria, como tratamento prévio das partículas, ajuste do teor de adesivo e otimização da prensagem.

5 Agradecimentos

Os autores agradecem à Universidade Federal de Lavras (UFLA) e à Unidade Experimental de Produção de Painéis de Madeira (UEPAM) pelo apoio técnico e estrutural.

6 Referências bibliográficas

Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2003). *Madeira: Determinação da densidade básica* (ABNT NBR 11941). ABNT.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2010). *Madeira: Determinação do material solúvel em etanol-tolueno, diclorometano e acetona* (ABNT NBR 14853). ABNT.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2010). *Pasta celulósica e madeira: Determinação de lignina insolúvel em ácido* (ABNT NBR 7989). ABNT.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2017). *Papel, cartão, pastas celulósicas e madeira: Determinação do resíduo (cinza) após incineração a 525 °C* (ABNT NBR 13999). ABNT.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2018). *Painéis de partículas de média densidade: Parte 2: Requisitos e métodos de ensaio* (ABNT NBR 14810-2). ABNT.

Bazzetto, J. T. L., Bortoletto Junior, G., & Brito, F. M. S. (2019). Effect of particle size on bamboo particle board properties. *Floresta e Ambiente, 26*(2), e20170125. https://doi.org/10.1590/2179-8087.012517

Brito, F. M. S., et al. (2023a). Aproveitamento de talos de mamona (*Ricinus communis*) para produção de painéis aglomerados. Em J. K. B. Andrade (Org.), *Estudos e tendências atuais em Ciências Ambientais e Agrárias* (pp. 9–21). Licuri. https://doi.org/10.58203/Licuri.21882

Brito, F. M. S., et al. (2023b). Painéis aglomerados: Um referencial teórico. Em J. K. B. Andrade (Org.), *Estudos e tendências atuais em Ciências Ambientais e Agrárias* (pp. 90–104). Licuri. https://doi.org/10.58203/Licuri.21889

Bufalino, L., Protásio, T. P., Couto, A. M., Nassur, O. A. C., Sá, V. A., Trugilho, P. F., & Mendes, L. M. (2012). Caracterização química e energética para aproveitamento da madeira de costaneira e desbaste de cedro australiano. *Pesquisa Florestal Brasileira, 32*(70), 129–137.

Dukarska, D., Kawalerczyk, J., Sedliačik, J., Antov, P., & Unisa, M. (2025). Alternative wood raw material sources in particleboard and OSB production: Challenges and perspectives. *Polymers, 17*(13), 1760. https://doi.org/10.3390/polym17131760

Faria, D. L., Scatolino, M. V., Oliveira, J. E. de, Gonçalves, F. G., Soriano, J., Protásio, T. P., Lelis, R. C. C., Carvalho, L. M. H., Mendes, L. M., & Guimarães Júnior, J. B. (2023). Cardanol-based adhesive with reduced formaldehyde emission to produce particleboards with waste from bean crops. *Environmental Science and Pollution Research, 30*(16), 48270–48287.

Furtini, A. C. C., Santos, C. A. D., Miranda, E. H. N., Villarruel, D. C. V., Gomes, D. A. C., Ferreira, G. C., Silva, M. G., Mendes, L. M., & Guimarães Júnior, J. B. (2023). Using miriti petiole to produce particleboards. *Ambiente Construído, 23*(2), 149–162. https://doi.org/10.1590/s1678-86212023000200668

Guimarães Júnior, J. B., Xavier, M. M., Santos, T. S., Protásio, T. P., Mendes, R. F., & Mendes, L. M. (2016). Inclusão de resíduo da cultura de sorgo em painéis aglomerados de eucalipto. *Pesquisa Florestal Brasileira, 36*(88), 435–442. https://doi.org/10.4336/2016.pfb.36.88.1036

Iwakiri, S., & Trianoski, R. (2020). *Painéis de madeira reconstituída*. Ajir Gráfica e Editora.

Lee, S. H., Lum, W. C., Boon, J. G., Kristak, L., Antov, P., Pędzik, M., Rogoziński, T., Taghiyari, H. R., Lubis, M. A. R., Fatriasari, W., Yadav, S. M., Chotikhun, A., & Pizzi, A. (2022). Particleboard from agricultural biomass and recycled wood waste: A review. *Journal of Materials Research and Technology, 20*, 4630–4658. https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.08.166

Maloney, T. M. (1993). *Modern particleboard and dry-process fiberboard manufacturing*. Miller Freeman.

Mendes, R. F., Mendes, L. M., Guimarães Júnior, J. B., Santos, R. C., & César, A. A. S. (2012). Efeito da associação de bagaço de cana, do tipo e do teor de adesivo na produção de painéis aglomerados. *Ciência Florestal, 22*(1), 161–170. https://doi.org/10.5902/198050985088

Miranda, E. H. N., Gomes, D. A. C., Furtini, A. C. C., Villarruel, D. C. V., Santos, C. A., Mendes, L. M., & Guimarães Júnior, J. B. (2023). Evaluation of bean residues in the production of agglomerated panels. *Maderas. Ciencia y Tecnología, 25*, 1–10. https://doi.org/10.4067/S0718-221X2023000100432

Silva, D. W., Scatolino, M. V., Prado, N. R. T., Mendes, R. F., Mendes, L. M., & Guimarães Júnior, J. B. (2015). MDP com partículas de eucalipto e palha de milho. *Scientia Forestalis, 43*(108), 853–862.

Silva, D. W., Scatolino, M. V., Prado, N. R. T., Mendes, R. F., & Mendes, L. M. (2018). Addition of different proportions of castor husk and pine wood in particleboards. *Waste and Biomass Valorization, 9*, 139–145. https://doi.org/10.1007/s12649-016-9742-7

Villarruel, D. C. V., Miranda, E. H. N., Gomes, D. A. C., Furtini, A. C. C., Santos, C. A., Mendes, L. M., & Guimarães Júnior, J. B. (2023). Evaluation of the addition of wheat residues in the production of *Pinus oocarpa* agglomerated panels. *Clean Technologies and Environmental Policy*.

Compostos bioativos vegetais na preservação da madeira: alternativas sustentáveis aos preservantes sintéticos

José Fellip Catique Marinho[1]; Thâmara dos Santos Osaki[1]; Natalia Durigon Melo[1]; Lucas da Costa Fonseca[2]; Camila Alves Corrêa[1]; Tarcisio Francisco de Camargo[1]; Alexsandro Bayestorff da Cunha[1]; Polliana D'Angelo Rios[1]

[1] Centro de Ciências Agroveterinarias – CAV. Universidade do Estado de Santa Catarina – UDESC.
[2] Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro – UFRRJ.

Resumo: A madeira é amplamente utilizada em diferentes setores devido às suas propriedades mecânicas, renovabilidade e menor impacto ambiental. Entretanto, sua natureza orgânica a torna suscetível à deterioração causada por fungos, cupins e outros organismos xilófagos, tornando necessária a adoção de tratamentos preservativos. Nesse contexto, este trabalho teve como objetivo realizar uma revisão bibliográfica sobre o potencial de compostos bioativos de origem vegetal como alternativa aos preservantes sintéticos da madeira. A pesquisa foi conduzida por meio de levantamento bibliográfico em publicações disponibilizadas entre 2010 e 2025, obtidas nas bases SciELO, Google Acadêmico e Portal de Periódicos CAPES. Após a aplicação dos critérios de seleção, foram analisadas 32 publicações relacionadas ao uso de extrativos vegetais, óleos essenciais, óleos vegetais e taninos. Os estudos avaliados demonstraram que esses compostos apresentam atividade antifúngica e inseticida significativa, contribuindo para a redução da biodeterioração da madeira. Além disso, estratégias como modificação química, encapsulamento por nanotecnologia e associação com compostos à base de boro ou geopolímeros mostraram potencial para aumentar a estabilidade e a eficiência dos tratamentos. Conclui-se que os compostos bioativos de origem vegetal representam alternativas promissoras para a preservação da madeira, associando eficiência biológica, menor impacto ambiental e aproveitamento de recursos renováveis.

Palavras-chave: Biodeterioração; Sustentabilidade; Durabilidade da madeira.

Plant-derived bioactive compounds for wood preservation: sustainable alternatives to synthetic preservatives

Abstract: Wood is widely used due to its mechanical properties, renewability, and lower environmental impact compared to conventional materials. However, as a biological material, it is susceptible to deterioration caused by fungi, termites, and other xylophagous organisms, which reduces its durability and service life. Although synthetic preservatives are highly effective, their use has been associated with environmental impacts and potential risks to human health, encouraging the search for more sustainable alternatives. In this context, this study aimed to conduct a literature review on the potential of plant-derived bioactive compounds for wood preservation. The research was based on a bibliographic survey of publications published between 2010 and 2025 and indexed in the SciELO, Google Scholar, and CAPES Periodicals databases. After applying the selection criteria, 32 publications addressing the use of plant extracts, essential oils, vegetable oils, and tannins as wood preservatives were analyzed. The

reviewed studies demonstrated that these compounds exhibit significant antifungal and insecticidal activity, reducing the action of biodegrading agents and increasing wood durability. Furthermore, strategies such as chemical modification, nanotechnology-based encapsulation, and combinations with boron- and geopolymer-based compounds were shown to improve treatment stability and effectiveness. Overall, the results indicate that plant-derived bioactive compounds represent promising alternatives to conventional synthetic wood preservatives, combining technical potential, reduced environmental impact, and opportunities for the valorization of forestry residues.

Keywords: Biodeterioration; Sustainability; Wood durability.

1. Introdução

A madeira é um dos materiais mais utilizados pela humanidade devido à sua versatilidade, disponibilidade e caráter renovável. Além de apresentar elevada relação resistência-peso, bom desempenho térmico e menor impacto ambiental quando comparada à materiais como aço e concreto, sua utilização tem se expandido em diversos setores, incluindo a construção civil, a fabricação de móveis e a produção de materiais industrializados (Menezes e Daminelli, 2024; Santos et al., 2022). Essas características reforçam sua relevância econômica e ambiental, especialmente em um cenário marcado pela busca por materiais sustentáveis.

Apesar de suas inúmeras vantagens, a madeira apresenta limitações decorrentes de sua natureza biológica. Por ser constituída principalmente por compostos orgânicos, está sujeita à deterioração causada por fungos, cupins e outros organismos xilófagos, os quais podem comprometer suas propriedades físicas, mecânicas e estéticas, reduzindo sua vida útil e restringindo suas possibilidades de aplicação (Baldin et al., 2022; Megna e Liotta, 2017). A intensidade dessa degradação está diretamente relacionada às condições ambientais de exposição, sendo mais acentuada em ambientes úmidos e favoráveis ao desenvolvimento de agentes biodegradadores.

Nesse contexto, a preservação da madeira desempenha papel fundamental para aumentar sua durabilidade e garantir o desempenho adequado durante o uso. Entre os métodos tradicionalmente empregados destacam-se os preservantes hidrossolúveis à base de metais, como o arseniato de cobre cromatado (CCA) e o borato de cobre cromatado (CCB), amplamente reconhecidos pela elevada eficiência no controle de fungos e insetos xilófagos (Militão et al., 2021; Ferrarini et al., 2012). Entretanto, a presença de elementos potencialmente tóxicos, especialmente o arsênio, tem gerado preocupações relacionadas aos

impactos ambientais, à saúde humana e ao descarte de resíduos tratados (Gosselin e Zagury, 2020). Além disso, a crescente demanda por tecnologias ambientalmente responsáveis tem impulsionado a busca por alternativas menos agressivas ao meio ambiente.

Dentre as alternativas estudadas, os compostos bioativos de origem vegetal têm se destacado pelo potencial de proteção da madeira associado à baixa toxicidade e à origem renovável. Extratos vegetais, óleos essenciais, óleos vegetais, taninos e resinas naturais apresentam propriedades antifúngicas e inseticidas capazes de reduzir a ação de organismos deterioradores, constituindo uma alternativa promissora aos preservantes convencionais (Baldin et al., 2022; Poyer et al., 2015). Além disso, muitos desses compostos podem ser obtidos a partir de resíduos e subprodutos da indústria florestal, agregando valor a materiais frequentemente descartados e contribuindo para o desenvolvimento de sistemas produtivos mais sustentáveis (Soares et al., 2018; Brocco, 2019).

Os mecanismos de ação desses compostos variam de acordo com sua composição química. Resinas e extrativos vegetais ricos em compostos fenólicos e terpênicos atuam na inibição do crescimento de fungos e insetos, enquanto os taninos, amplamente distribuídos em diferentes espécies vegetais, apresentam reconhecida atividade biológica e capacidade de atuar como agentes fixadores em sistemas preservantes (Silveira, 2019; Poyer et al., 2015). Paralelamente, avanços recentes envolvendo modificação química, encapsulamento por nanotecnologia e combinações entre compostos naturais e materiais inorgânicos têm ampliado a estabilidade e a eficiência desses biopreservantes, favorecendo sua aplicação prática na proteção da madeira.

Diante desse cenário, observa-se um crescente interesse científico pelo desenvolvimento de tecnologias capazes de conciliar eficiência preservativa e sustentabilidade ambiental. Assim, este trabalho teve como objetivo realizar uma revisão bibliográfica sobre o potencial de compostos bioativos de origem vegetal na preservação da madeira, destacando seus mecanismos de ação, principais aplicações e perspectivas como alternativa sustentável aos preservantes sintéticos tradicionalmente empregados.

2. Material e métodos

O presente estudo consistiu em uma revisão bibliográfica de caráter exploratório e abordagem qualitativa, com o objetivo de reunir e analisar informações sobre a utilização de compostos bioativos de origem vegetal na preservação da madeira como alternativa aos preservantes sintéticos convencionalmente empregados.

O levantamento bibliográfico foi realizado entre os meses de junho e agosto de 2025, por meio de consultas às bases de dados SciELO, Google Acadêmico e Portal de Periódicos CAPES. Para a busca das publicações, foram utilizados os descritores, em português e inglês, relacionados ao tema de estudo, incluindo os termos “preservação da madeira”, “compostos naturais”, “extratos vegetais”, “óleos essenciais”, “óleos vegetais”, “taninos”, “resinas vegetais” e “biopreservantes”, combinados de diferentes formas para ampliar a recuperação de trabalhos relevantes.

Foram considerados como critérios de inclusão publicações disponibilizadas entre 2010 e 2025 que abordassem o uso de compostos naturais na preservação da madeira, contemplando artigos científicos, dissertações, teses e capítulos de livros com resultados experimentais ou revisões críticas relacionadas ao tema. Foram excluídos estudos que tratavam exclusivamente de métodos físicos de preservação ou que não apresentavam informações suficientes sobre os compostos avaliados e seus mecanismos de ação.

A seleção das publicações ocorreu em duas etapas. Inicialmente, foram analisados os títulos, resumos e palavras-chave para verificar a aderência ao tema proposto. Posteriormente, os trabalhos selecionados foram submetidos à leitura integral, sendo extraídas informações referentes aos compostos utilizados, métodos de aplicação, organismos-alvo, mecanismos de ação e desempenho preservativo observado.

Ao final do processo de triagem, foram selecionadas 32 publicações consideradas relevantes para a discussão da temática, sendo compostas por 23 artigos científicos, seis dissertações e três capítulos de livros. As informações obtidas foram organizadas e analisadas de forma descritiva, buscando identificar tendências de pesquisa, principais resultados reportados na literatura e perspectivas para a utilização de compostos bioativos de origem vegetal na preservação sustentável da madeira.

3. Resultados e discussão

A utilização de compostos de origem natural para a preservação da madeira tem recebido crescente atenção da comunidade científica, refletindo a busca por alternativas ambientalmente mais seguras aos preservantes sintéticos convencionais. A análise da literatura evidenciou que aproximadamente 70% dos estudos selecionados foram publicados a partir de 2016, demonstrando o avanço recente das pesquisas relacionadas ao aproveitamento de substâncias bioativas de origem vegetal. Entre os compostos mais investigados destacam-

se os extrativos vegetais, os óleos essenciais e os taninos, os quais apresentam potencial para aumentar a resistência da madeira frente a fungos e organismos xilófagos.

Os extrativos da madeira constituem uma importante linha de pesquisa devido à presença de compostos fenólicos, flavonoides e terpenos naturalmente envolvidos nos mecanismos de defesa das árvores. Esses metabólitos secundários podem atuar por diferentes mecanismos, incluindo a inibição de enzimas, a desorganização de membranas celulares e a redução da atividade metabólica de fungos deterioradores. Nesse contexto, Brocco et al. (2024) avaliaram extratos obtidos de resíduos industriais de espécies amazônicas e verificaram elevada atividade antifúngica e antitérmica em diferentes materiais vegetais. Os resultados demonstraram que extratos provenientes de espécies como *Roupala montana* e *Hymenolobium flavum* reduziram significativamente o crescimento de fungos deterioradores e aumentaram a resistência da madeira ao ataque de cupins, evidenciando o potencial de aproveitamento de resíduos florestais como fonte de biopreservantes.

Resultados semelhantes foram observados por Alonso-Hurtado et al. (2024), que testaram extratos aquosos do cerne de *Enterolobium cyclocarpum* aplicados em madeira de *Pinus*. As amostras tratadas apresentaram menor perda de massa e maior resistência ao ataque de térmitas subterrâneas quando comparadas às não tratadas. Segundo os autores, a elevada concentração de compostos fenólicos contribuiu tanto para a atividade inseticida quanto para a redução da fotodegradação da madeira. Em conjunto, esses estudos demonstram que espécies tropicais podem representar fontes promissoras de compostos com potencial preservativo.

Além da utilização isolada dos extrativos, pesquisas recentes têm explorado sua combinação com outros produtos naturais. Honhwan et al. (2020) observaram que a associação entre extratos vegetais e óleo de linhaça promoveu elevada mortalidade de cupins e redução das perdas de massa em madeiras menos duráveis. Em condições de campo, algumas formulações praticamente eliminaram os danos causados pelos insetos, evidenciando que combinações de compostos naturais podem potencializar a ação preservante e ampliar a durabilidade da madeira.

Outro grupo de substâncias amplamente estudado corresponde aos óleos vegetais e essenciais. Esses produtos apresentam compostos bioativos capazes de exercer ação fungicida e inseticida, além de contribuírem para a redução da absorção de umidade pela madeira. Sousa et al. (2024) verificaram que os óleos de andiroba, copaíba e pinhão-manso apresentaram eficiência no controle de térmitas subterrâneas, com destaque para o óleo de

copaíba, que proporcionou elevada mortalidade dos insetos e reduzidas perdas de massa da madeira. Esses resultados reforçam o potencial de espécies vegetais nativas como fonte de insumos sustentáveis para a preservação do material lenhoso.

Da mesma forma, Bahmani e Schmidt (2018) relataram que óleos essenciais de lavanda, tomilho e capim-limão reduziram significativamente o desenvolvimento de fungos de bolor e podridão em diferentes espécies de madeira. Os autores associaram esse efeito à ação direta dos compostos voláteis presentes nos óleos, além da redução da disponibilidade de água nas células da madeira. Esses achados demonstram que os óleos essenciais podem atuar simultaneamente como barreiras químicas e físicas contra a biodeterioração.

Nos últimos anos, abordagens mais avançadas têm sido incorporadas ao desenvolvimento de biopreservantes. Rosu et al. (2020), por exemplo, demonstraram que óleos vegetais epoxidados formam revestimentos capazes de proteger a superfície da madeira contra fungos deterioradores. Paralelamente, Zikeli et al. (2019) verificaram que a encapsulação de óleos essenciais em nanopartículas aumentou sua estabilidade e prolongou sua ação protetora, reduzindo problemas relacionados à volatilização e degradação dos compostos ativos. Esses avanços evidenciam o potencial da nanotecnologia para ampliar a eficiência dos preservantes naturais.

Os taninos constituem outro grupo de compostos amplamente investigado para a preservação da madeira. Além da atividade biológica intrínseca, essas substâncias apresentam elevada capacidade de interação química com outros agentes preservantes, favorecendo a fixação dos compostos ativos e reduzindo sua lixiviação. López-Gómez et al. (2025) observaram que formulações combinando taninos e geopolímeros aumentaram significativamente a resistência da madeira à degradação fúngica, mesmo após ensaios de lixiviação, sem comprometer suas propriedades mecânicas.

Resultados semelhantes foram relatados por Verly Lopes et al. (2020) e Tondi et al. (2012), que avaliaram a associação de taninos com compostos à base de boro. Os autores verificaram que os taninos atuaram como agentes fixadores naturais, reduzindo a perda do preservante durante a exposição à água e aumentando a resistência da madeira frente a fungos e cupins. Esses resultados indicam que a combinação entre compostos naturais e agentes preservantes já consolidados pode representar uma alternativa viável para aumentar a durabilidade dos tratamentos.

Além da função preservante, os taninos também apresentam potencial para modificar as propriedades superficiais da madeira. Jorbandian et al. (2025) verificaram que tratamentos

envolvendo taninos e vapores de amônia proporcionaram aumento da hidrofobicidade e alterações estéticas desejáveis, além de contribuírem para a proteção contra umidade e degradação biológica. Dessa forma, o uso desses compostos amplia as possibilidades de aplicação dos biopreservantes, agregando valor tecnológico e comercial aos produtos de madeira.

De maneira geral, os estudos analisados convergem ao demonstrar que compostos bioativos de origem vegetal constituem alternativas promissoras aos preservantes sintéticos tradicionalmente utilizados. Extrativos vegetais, óleos essenciais e taninos apresentaram resultados consistentes na redução da deterioração causada por fungos e organismos xilófagos, além de apresentarem menor impacto ambiental e potencial para aproveitamento de resíduos florestais. Entretanto, ainda existem desafios relacionados à padronização dos métodos de obtenção, à estabilidade dos compostos em longo prazo e à validação de sua viabilidade econômica em escala industrial. Nesse sentido, o desenvolvimento de tecnologias de formulação, como sistemas de encapsulamento e combinações com materiais inorgânicos, surge como uma estratégia promissora para ampliar a eficácia e a aplicabilidade dos biopreservantes no setor madeireiro.

4. Conclusões

Os estudos analisados demonstram que compostos bioativos de origem vegetal, como extrativos, óleos essenciais, óleos vegetais e taninos, apresentam potencial para a preservação da madeira, atuando de forma eficiente contra fungos e organismos xilófagos. Além de contribuírem para o aumento da durabilidade do material, essas substâncias representam alternativas mais sustentáveis aos preservantes sintéticos convencionais.

Os resultados também evidenciam que estratégias como encapsulamento por nanotecnologia, modificação química e associação com compostos à base de boro ou geopolímeros podem ampliar a eficiência e a estabilidade dos tratamentos. Entre os compostos avaliados, os taninos destacam-se pela capacidade de atuar como agentes fixadores naturais, reduzindo a lixiviação e aumentando a permanência dos princípios ativos na madeira.

De modo geral, os biopreservantes vegetais apresentam potencial para o desenvolvimento de tecnologias de preservação mais sustentáveis e ambientalmente seguras. Entretanto, ainda são necessários estudos que avaliem sua estabilidade em longo prazo, padronização e viabilidade para aplicação em escala comercial.

5. Referências bibliográficas

Alonso-Hurtado, K. L., Méndez-Pérez, T., Flores-García, A., Martínez-Pacheco, M. M., Raya-González, D., & Velázquez-Becerra, C. (2024). Pinewood preserved with *Enterolobium cyclocarpum* (Jacq.) Griseb. heartwood aqueous extract. ***Revista Árvore***, *48*(1), 1–14. https://doi.org/10.53661/1806-9088202448263683

Bahmani, M., & Schmidt, O. (2018). Plant essential oils for environment-friendly protection of wood objects against fungi. Maderas. Ciencia y tecnología, 20(3), 325-332. http://dx.doi.org/10.4067/S0718-221X2018005003301

Baldin, T., Nunes, S. M. V., Evaristo, S. T. A., Dias, T. L., & Baraúna, E. E. P. (2022). Extratos das folhas de Corymbia citriodora na proteção da madeira de Eucalyptus sp. ***Matéria*** *(Rio de Janeiro)*, *27*(2), e202249010. https://doi.org/10.1590/1517-7076-RMAT-2022-49010

Bossardi, K. (2014). Tall oil e seus subprodutos: alternativas como preservantes para madeira. [Tese de doutorado, Universidade Estadual Paulista].

Fassina Brocco, V., Gonçalves da Costa, L., Monteiro de Castro, M. C., Xavier Barbosa, A. V., da Costa Lyra, P. H., & Alves Cruz da Conceição, R. C. (2025). Antifungal and antitermitic potential of extracts of industrial wood waste from Central Amazon, Brazil. Maderas. Ciencia y tecnología, 27. http://dx.doi.org/10.22320/s0718221x/2025.08

Cavalcante, M. S. (1983). Implantação e desenvolvimento da preservação de madeiras no Brasil. Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo.

Dias, K. B., & Barreiros, R. M. (2018). Preservantes para madeiras de rápido crescimento-uma revisão. **Periódico Tchê Química**, 15(30), 241. DOI: 10.52571/PTQ.v15.n30.2018.244_Periodico30_pgs_241_251

Ferrarini, S. F., et al. (2012). Classificação de resíduos de madeira tratada com preservativos à base de arseniato de cobre cromatado e de boro/flúor. ***Química Nova***, *35*(9), 1767–1771. http://dx.doi.org/10.1590/S0100-40422012000900012

Gosselin, M., & Zagury, G. J. (2020). Metal (loid) s inhalation bioaccessibility and oxidative potential of particulate matter from chromated copper arsenate (CCA)-contaminated soils. **Chemosphere**, 238, 124557. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.124557

Jorbandian, A., Ghavidel, A., Gholamiyan, H., & Hosseinpourpia, R. (2025). Surface Characteristics of Selected Wood Species after Treatment with Tannin and Ammonia Vapor. **BioResources**, 20(2), 4216. DOI: 10.15376/biores.20.2.4216-4228

López-Gómez, Y. M., et al. (2025). Efeitos da impregnação de tanino-geopolímero na madeira: lixiviabilidade, resistência à biodegradação e propriedades mecânicas. **European Journal of Wood and Wood Products**, 83, 17. https://doi.org/10.1007/s00107-024-02184-X

Makaxi, R. W., Brito, F. M. S., Brocco, V. F, Caxias, V. F., da Costa, L. G., Marinho, J. F. C. (2025). Tecnologia verde: Resinas, óleos e extratos vegetais como alternativas aos produtos convencionais para proteção da madeira. In **Meio ambiente e ciências agrárias** (Vol. 3, pp. 355–371). Amplla Editora. DOI: 10.51859/amplla.mac5295-18

Megna, B., & Liotta, G. (2017). Biodeterioration of the wooden roof of the Phnom Penh National Museum. **Conservation Science in Cultural Heritage**, 15, 73–83. https://doi.org/10.6092/issn.1973-9494/7120

Menezes, D. O., & Daminelli, B. L. (2024). Tratamentos para preservação de madeira para construção civil: Panorama atual e inovações. **Cuadernos de Educación y Desarrollo,** 16(1), 966–991. https://doi.org/10.55905/cuadv16n1-051

Militão, L. V., Sasaya, A. Y., Carvalho, F. W. B., Gonçalves, P. P., & Garlet, J. (2021). Compostos naturais extraídos de plantas na preservação de madeiras: Uma revisão narrativa. In Madeiras nativas e plantadas do Brasil: Qualidade, pesquisas e atualidades (pp. 355–371). **Editora Científica**. https://doi.org/10.37885/210504694

Rosu, L., et al. (2020). Epoxy coatings based on modified vegetable oils for wood surface protection against fungal degradation. **ACS Applied Materials & Interfaces**, 12(12), 14443–14458. https://doi.org/10.1021/acsami.0c00682

Sablík, P., Giagli, K., Pařil, P., et al. (2016). Impact of extractive chemical compounds from durable wood species on fungal decay after impregnation of non-durable wood species. **European Journal of Wood and Wood Products**, 74, 231–236. https://doi.org/10.1007/s00107-015-0984-z

Santos, C. E., Candaten, L., da Silva, P. R. B., & Trevisan, R. (2022). Madeira preservada com CCA: proficuidade, potencial deletério, toxicidade dos resíduos e tecnologias de recuperação. **Revista em Agronegócio e Meio Ambiente**, 15(1), 153-166. https://doi.org/10.17765/2176-9168.2022v15n1e8871

Silveira, A. G. (2019). Extratos naturais como alternativa para a preservação de madeiras [Tese de doutorado, Universidade Federal de Santa Maria].

Sousa, S. F. D., Paes, J. B., Arantes, M. D., Almeida, A. T. D., Lopez, Y. M., Nicacio, M. A., & Rivera, O. R. (2024). Use of vegetable oils to improve the resistance of wood to attack by xylophagous termites. **Revista Caatinga**, 38, e12548. https://doi.org/10.1590/1983-21252025v3812548rc

Tondi, G., et al. (2012). Eficácia do tanino na fixação de boro na madeira: Resistência a fungos e cupins. **BioResources**, 7(1), 1238–1252.

Verly Lopes, D. J., Barnes, H. M., & Dos Santos Bobadilha, G. (2020). Influence of heat treatment and tannin impregnation on boron depletion and wood durability. ***Forests***, *11*(2), 201. https://doi.org/10.3390/f11020201

Woźniak, M. (2022). Antifungal agents in wood protection—A review. **Molecules**, 27(19), 6392. https://doi.org/10.3390/molecules27196392

Zikeli, F., Vinciguerra, V., Sennato, S., Scarascia Mugnozza, G., & Romagnoli, M. (2019). Preparation of lignin nanoparticles with entrapped essential oil as a bio-based biocide delivery system. **ACS Omega**, 5(1), 358–368. https://doi.org/10.1021/acsomega.9b02793

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Delaminação em Elementos Estruturais Colados com e sem Alma de OSL sob Ciclos de Umidade e Secagem

Cleyton Machado Prata Filho[1]; Rafael Gonçalves Espósito Oliveira[4]; Nahanni Ramalah Caetano Paes[3]; Pedro Gutemberg de Alcântara Segundinho[3]; Pedro Henrique Greggio Gava[3]; Emilly Soares Gomes da Silva[2]; Fabricio Gomes Gonçalves[3]

[1] Fields Engenharia
[2] Placas do Brasil S.A.
[3] Universidade Federal do Espírito Santo (Ufes)
[4] Secretaria de Estado da Educação do Estado do Espírito Santo (Sedu)

Resumo: O presente estudo demonstrou que a utilização de elementos estruturais colados contribui para o aumento do desempenho técnico, da durabilidade e da viabilidade econômica da madeira engenheirada, consolidando-a como uma alternativa competitiva aos materiais tradicionais de maior impacto ambiental. A hipótese da pesquisa foi que a utilização de uma alma produzida a partir de painel OSL aumentaria a delaminação dos elementos estruturais quando submetidos a ciclos de umedecimento e secagem, em comparação aos sistemas convencionais de madeira laminada colada, em razão da maior heterogeneidade do painel e do maior número de interfaces adesivas presentes na estrutura. Para verificar essa hipótese, foram avaliados 36 corpos de prova, distribuídos em seis tratamentos, representando diferentes configurações estruturais, incluindo madeira laminada colada (MLC), vigas tipo "I" e elementos estruturais com alma de OSL e mesas de pinus e eucalipto. Após climatização a 65 ± 5% de umidade relativa e 25 ± 3 °C, os corpos de prova foram submetidos ao ensaio de delaminação conforme a norma AITC T110, utilizando três ciclos de umedecimento e secagem, simulando condições severas de exposição. Os resultados demonstraram que os tratamentos com adesivo à base de resorcinol, especialmente nas vigas tipo "I", mantiveram índices de delaminação inferiores ao limite de 10% estabelecido pela norma. As vigas tipo "I" apresentaram os menores índices médios de delaminação (1,21% e 2,19%), enquanto os elementos estruturais contendo alma de OSL registraram os maiores valores médios (33,22% e 38,38%). A MLC apresentou comportamento intermediário, com médias de 6,66% para Pinus e 12,46% para Eucalyptus. Conclui-se que as vigas tipo "I" apresentaram o melhor desempenho frente aos ciclos de umedecimento e secagem, atendendo aos requisitos normativos, enquanto os elementos estruturais com alma de OSL apresentaram delaminação significativamente superior ao limite estabelecido, indicando que, nas condições avaliadas, seu emprego não é recomendado para ambientes sujeitos a elevadas variações de umidade sem aperfeiçoamentos no sistema de colagem.

Palavras-chave: Engenharia estrutural; Tecnologia da madeira; Interface adesiva.

Delamination of Bonded Structural Elements with and without an OSL Core under Wetting and Drying Cycles

Abstract: This study demonstrated that the use of bonded structural elements improves the technical performance, durability, and economic viability of engineered wood, establishing it as a competitive alternative to traditional materials with greater environmental impact. The research hypothesized that the incorporation of an Oriented Strand Lumber (OSL) core would increase the delamination of structural elements subjected to wetting and drying cycles

compared with conventional glued laminated timber systems, due to the greater heterogeneity of the panel and the higher number of adhesive interfaces within the structure. To test this hypothesis, 36 specimens distributed among six treatments were evaluated, representing different structural configurations, including glued laminated timber (Glulam), I-beams, and structural elements with an OSL core and Pinus and Eucalyptus flanges. After conditioning at 65 ± 5% relative humidity and 25 ± 3 °C, the specimens were subjected to the delamination test according to the AITC T110 standard, using three wetting and drying cycles to simulate severe exposure conditions. The results showed that treatments bonded with resorcinol-based adhesive, particularly the I-beams, maintained delamination values below the 10% limit established by the standard. The I-beams exhibited the lowest average delamination values (1.21% and 2.19%), whereas the structural elements containing an OSL core showed the highest average values (33.22% and 38.38%). Glued laminated timber exhibited intermediate performance, with average delamination values of 6.66% for Pinus and 12.46% for Eucalyptus. It was concluded that the I-beams showed the best performance under wetting and drying cycles, meeting the normative requirements, whereas the structural elements with an OSL core exhibited significantly higher delamination than the acceptable limit, indicating that, under the evaluated conditions, their use is not recommended for environments subjected to high moisture variations without improvements in the bonding system.

Keywords: Structural Engineering; Wood Technology; Adhesive Interface.

1. **Introdução**

A madeira é um recurso renovável amplamente utilizado na construção civil devido às suas propriedades mecânicas, leveza, durabilidade e capacidade de captura de carbono, contribuindo para a mitigação das mudanças climáticas (Yadav & Kumar, 2021; Younis & Dodoo, 2022). O avanço do manejo sustentável e das tecnologias de madeira engenheirada tem ampliado o uso da madeira lamelada colada (MLC), que se destaca pela versatilidade, elevado desempenho estrutural e possibilidade de utilização de diferentes espécies e adesivos de alta resistência, como os à base de resorcinol e poliuretano (Kim et al., 2024). Entretanto, a MLC ainda enfrenta desafios técnicos, especialmente relacionados à delaminação tais como separação das lâminas coladas devido a variações de umidade, temperatura e tensões internas que compromete a durabilidade e a segurança estrutural (Segundinho et al., 2018). Segundo a norma AITC T110, níveis de delaminação superiores a 10% da linha de cola tornam o material inadequado para uso externo. A umidade influencia diretamente a estabilidade dimensional, a resistência mecânica e a durabilidade da MLC, podendo favorecer falhas adesivas e a ação de agentes biológicos (Fiorelli & Dias, 2005; Segundinho et al., 2018). Diante da crescente demanda por soluções sustentáveis, pesquisas têm buscado o desenvolvimento de materiais e adesivos de base biológica, como os à base de tanino, que apresentam potencial técnico aliado à redução de impactos ambientais (Kumar & Leggate, 2022).

A madeira laminada colada (MLC) destaca-se como uma alternativa inovadora e sustentável na construção civil, pois possibilita o uso eficiente de madeira de reflorestamento, reduzindo impactos ambientais e atendendo à demanda por materiais de alto desempenho. Contudo, no Brasil, sua aplicação ainda enfrenta barreiras técnicas e normativas, especialmente quanto à resistência e durabilidade da linha de cola, responsável pela união das lâminas (Segundinho et al., 2018). A delaminação, caracterizada pela separação das camadas coladas em função de tensões mecânicas, variações de temperatura e umidade ou falhas no adesivo, pode comprometer a integridade estrutural e limitar a aceitação do material (Calil Neto, 2011). A durabilidade das juntas coladas depende do tipo de adesivo, da compatibilidade com a madeira, do processo de colagem e das condições ambientais de exposição (Fiorelli & Dias, 2005; Pereira, 2014). Diante da necessidade de maior padronização e validação técnica no país, ensaios de delaminação realizados conforme normas internacionais são essenciais para assegurar a qualidade das linhas de cola e o desempenho do material ao longo do tempo.

No Brasil, apesar do avanço do setor florestal e do uso de espécies de reflorestamento como pinus e eucalipto, ainda há desafios relacionados ao domínio técnico e ao melhor aproveitamento das propriedades físico-mecânicas da madeira (Martins et al., 2017; Singh et al., 2022). O desenvolvimento tecnológico impulsionou a expansão da madeira engenheirada, especialmente da madeira lamelada colada (MLC), reconhecida por sua eficiência estrutural e versatilidade (Silva et al., 2010; Yadav & Kumar, 2021), além de outros produtos como OSB, MDF, LVL, LSL, OSL, PSL e CLT, que contribuem para a descarbonização do setor (Araújo et al., 2020). A qualidade da MLC depende do controle rigoroso de fabricação conforme a NBR 7190 e da escolha adequada de adesivos estruturais, como UF, PF, MUF, PU e alternativas de base biológica (Leite et al., 2017). O desempenho das colagens é influenciado por fatores como umidade, pH, pressão e tempo de cura, sendo a delaminação um dos principais indicadores de durabilidade em elementos estruturais colados (Segundinho et al., 2013, 2018). Assim, o controle tecnológico e a correta seleção de materiais são essenciais para garantir segurança e desempenho sustentável na construção civil.

Dessa forma, o objetivo do trabalho foi verificar a resistência da linha de cola dos elementos estruturais confeccionados, por meio do ensaio de delaminação, considerando condições extremas de umidade e pressão.

2. Material e métodos

Os elementos estruturais colados foram desenvolvidos com base em um projeto inovador realizado na Universidade Federal do Espírito Santo, especificamente no Laboratório Multiusuário de Painéis do Departamento de Ciências Florestais e da Madeira. Os corpos de prova foram obtidos nas extremidades das vigas após a realização do ensaio destrutivo de flexão estática, sendo avaliados seis diferentes tratamentos aplicados aos elementos estruturais. Foram confeccionadas seis amostras por tratamento, totalizando 36 corpos de prova, dimensionados conforme as especificações da norma T110 (AITC, 2007). As amostras foram posteriormente climatizadas a 65 ± 5% de umidade relativa e 25 ± 3 °C até atingirem equilíbrio higroscópico (Tabela 1).

Tabela 1 – Descrição dos tratamentos utilizados para elaboração dos elementos estruturais

Tratamento	**Descrição**	**Dimensão do corpo de prova (mm)** **(altura × espessura × profundidade)**
1	Viga tipo ‘I’ com mesa de Eucalipto	74,9 × 59,1 × 76,9 mm^3
2	Elemento cheio* com mesa de Eucalipto	60,1 × 74,8 × 79,8 mm^3
3	Madeira lamelada colada - Pinus	60,7 × 74,8 × 79,6 mm^3
4	Madeira lamelada colada - Eucalipto	60,7 × 74,8 × 79,6 mm^3
5	Viga tipo ‘I’ com mesa de Pinus	74,9 × 59,1 × 76,9 mm^3
6	Elemento cheio com mesa de Pinus	60,1 × 74,8 × 79,8 mm^3

*Elemento cheio: alma da viga preparada com elementos tipo OSL unidos com resorcinol formaldeído. O painel tipo OSL colado aos pares foram utilizados na alma da viga tipo “I”.

As resinas utilizadas nos tratamentos incluíram fenol-formaldeído na fabricação do painel *Oriented Strand Lumber* (OSL), produzido com madeira de pinus. Na união das mesas de eucalipto e pinus ao painel OSL foi empregado adesivo resorcinol-formaldeído, o qual também foi utilizado na produção da MLC (elemento cheio) para ambas as espécies. Após o ensaio de flexão, os elementos foram encaminhados à marcenaria, e com o uso de serra circular, foram confeccionados seis corpos de prova por tratamento, totalizando 36 amostras. As dimensões adotadas atenderam às especificações estabelecidas pela *American Institute of Timber Construction*, conforme a norma T110 (AITC, 2007) (Tabela 1; Figura 1).

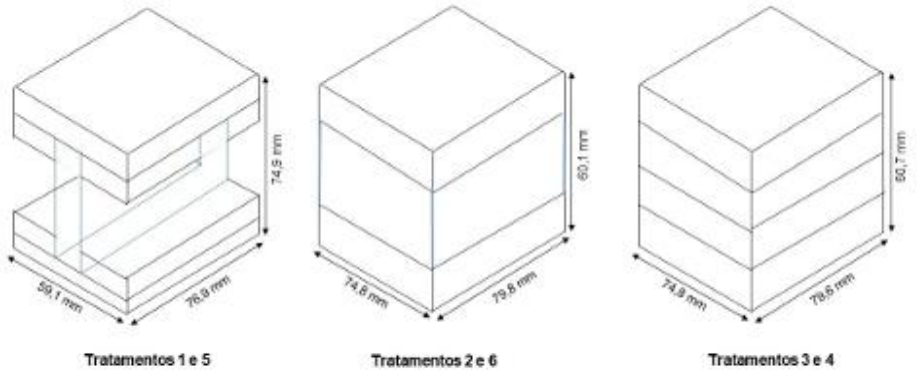


Figura 1 – Composição de montagem do ensaio

3. Resultados e discussão

Observou-se disparidade nos resultados de delaminação entre os tratamentos, evidenciando a influência das combinações de materiais e configurações estruturais na resistência da linha de cola sob condições extremas. Contudo, não houve diferença significativa entre os tratamentos 2 e 6 (F > 0,05), ambos correspondentes a elementos cheios com mesas compostas por espécies distintas (Tabela 2). A espécie utilizada não influenciou a delaminação, possivelmente devido à homogeneidade das madeiras empregadas e à similaridade da configuração estrutural das mesas. Assim, fatores como o tipo de adesivo e o processo de colagem demonstraram maior impacto na resistência da linha de cola do que as diferenças entre as espécies utilizadas.

Tabela 2 – Delaminação dos corpos de prova por tratamento

Tratamento*	Lado A (%)*	Lado B (%)	Média (%)
T1	3,29 B (9,29)	0,00 B (0,00)	2,19 (7,70)
T2	28,40 A (33,48)	38,05 A (34,18)	33,22 (33,82)
T3	7,11 B (20,88)	6,22 B (13,76)	6,66 (17,45)
T4	10,89 B (26,42)	14,02 B (24,72)	12,46 (25,22)
T5	0,00 B (0,00)	3,64 B (12,61)	1,21 (7,28)
T6	30,89 A (34.93)	45,86 (34,45)	38,38 (35,14)

* Lado A: superior; Lado B: inferior. Valores entre parênteses correspondem ao desvio padrão. Médias seguidas de mesma letra maiúscula na vertical não diferem estatisticamente (Scott-Knott, p > 0,05). Tratamento 1: viga tipo "I" com mesa de *Eucalyptus*; tratamento 2: Elemento cheio com mesa de *Eucalyptus*; tratamento 3: MLC de *Pinus*; tratamento 4: MLC de *Eucalyptus*; tratamento 5: Viga tipo "I" com mesa de *Pinus*; tratamento 6: Elemento cheio com mesa de *Pinus*.

Os resultados evidenciaram diferenças significativas na resistência à delaminação entre os tratamentos avaliados. Para o Lado A (superior), os tratamentos 6 (30,89%) e 2 (28,40%) apresentaram os maiores índices, enquanto os tratamentos 1 e 5 registraram valores reduzidos (3,29% e 0,00%, respectivamente). No Lado B (inferior), o tratamento 6 novamente apresentou o pior desempenho (45,86%), seguido pelo tratamento 2 (38,05%). As médias gerais confirmaram a superioridade dos tratamentos 1 e 5 (2,19% e 1,21%) e as limitações dos tratamentos 2 e 6 (33,22% e 38,38%). Valores acima de 10% são considerados críticos para uso externo, conforme a norma T110 (AITC, 2007), indicando que os tratamentos 2, 4 e 6 não atenderam ao limite normativo.

A elevada delaminação compromete a durabilidade e a integridade estrutural dos elementos, especialmente em ambientes sujeitos a variações de umidade e temperatura (Fiorelli & Dias, 2005; Segundinho et al., 2018). O melhor desempenho dos tratamentos 1 e 5 está associado ao uso de adesivo à base de resorcinol, reconhecido por sua alta resistência à umidade e forte ligação química com os componentes da madeira (Frihart, 2005), além da eficiência estrutural da configuração tipo “I”, que favorece melhor distribuição de tensões (Araújo et al., 2020; Pereira, 2014). Por outro lado, os elevados índices nos tratamentos com núcleo OSL podem estar relacionados à maior heterogeneidade e variabilidade das partículas lignocelulósicas, que dificultam a eficiência da interface adesiva (Avila et al., 2003; Zhang & Lu, 2014), bem como à intensificação das tensões decorrentes dos ciclos de umedecimento e secagem (Calil Neto, 2011; Segundinho et al., 2013).

Fatores como pressão de fabricação, orientação das fibras e preparo superficial também influenciam diretamente o desempenho da linha de cola (Fiorelli & Dias, 2005).

4. Conclusão

De modo geral, os resultados reforçam a superioridade do adesivo resorcinol em vigas tipo “I”, com valores de delaminação inferiores aos limites normativos estabelecidos; e evidenciam limitações dos sistemas com núcleo OSL sob condições extremas. Destaca-se que a importância da adequada combinação entre materiais, adesivos e configuração estrutural para garantir maior durabilidade e desempenho da madeira engenheirada na construção civil.

5. Agradecimentos

Ao Laboratório Multiusuário de Painéis e ao Laboratório de Estruturas de Madeira pela seção dos equipamentos e do espaço para realização do experimento.

6. Referências bibliográficas

AITC. (2007). *American Institute of Timber Construction. T110: Test methods for structural glued laminated timber - Cyclic delamination test.* (p. 3).

Araújo, V. A., Biazzon, J. C., Morales, E. A. M., Barbosa, J. C., Gava, M., & Garcia, J. N. (2020). Materiais lignocelulósicos em uso pelo setor produtivo de casas de madeira no Brasil. *Revista do Instituto Florestal*, *32*(2), 129–141. https://doi.org/https://doi.org/10.24278/2178-5031.202032202

Avila, C. B., Beauregard, R. L., Mohammad, M., & Hernández, R. E. (2003). Structural performance of finger-jointed black spruce lumber with different joint configurations. *Forest Products Journal*, *53*(9), 72–76.

Calil Neto, C. (2011). *Madeira laminada colada (MLC): controle de qualidade em combinações espécie-adesivo-tratamento preservativo* [Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade de São Paulo, São Carlos, SP]. https://doi.org/10.11606/D.88.2011.tde-19042011-171909

Fiorelli, J., & Dias, A. A. (2005). Avaliação da delaminação em peças de madeira laminada colada reforçadas com fibra de vidro. *Revista Matéria*, *10*(2), 241–249.

Frihart, C. R. (2005). Wood adhesion and adhesives. In Roger M. Rowell (Ed.), *Handbook of Wood Chemistry and Wood Composites* (pp. 215–277). CRC Press.

Kim, K.-H., Lee, H.-M., & Lee, M. (2024). Evaluation of adhesive characteristics of mixed cross laminated timber (CLT) using yellow popular and softwood structural lumbers. *Journal of Korean Wood Science and Technology*, *52*(1), 58–69. https://doi.org/10.5658/WOOD.2024.52.1.58

Kumar, C., & Leggate, W. (2022). An overview of bio-adhesives for engineered wood products. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, *118*, 103187. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2022.103187

Leite, T. M., Santos, P. A. F. M., & Valle, I. M. R. (2017). O uso da madeira laminada colada no Brasil: panorama e desafios. *II Congresso Ibero-Latinoamericano de La Madera en La Construcción*, 1–12. https://clem-cimad2017.unnoba.edu.ar/papers/T7-20.pdf

Martins, T. V., Gomide, L. R., Ferraz Filho, A. C., Silva, P. R., & Melo, L. A. (2017). Mosaicos

clonais de eucalyptus no planejamento florestal e seus efeitos econômicos e produtivos. *Scientia Forestalis*, *45*(116), 727–737. https://doi.org/10.18671/scifor.v45n116.13

Pereira, M. C. M. (2014). *Metodologia para estudo da caracterização estrutural de painéis de madeira laminada colada cruzada* [Mestrado em Desenvolvimento, Caracterização e Aplicação de Materiais, Universidade de São Paulo, São Carlos, SP]. https://doi.org/https://doi.org/10.11606/D.18.2015.tde-07052015-084252

Segundinho, P. G. A., Silva, A. C., Gonçalves, F. G., & Regazzi, A. J. (2018). Caracterização da madeira laminada colada de *Eucalyptus* sp. produzida com adesivos resorcinol-fenol-formaldeído e poliuretano. *Revista Ciência Da Madeira*, *9*(2), 123–133. https://doi.org/10.12953/2177-6830/rcm.v9n2p123-133

Segundinho, P. G. A., Zangiácomo, A. L., Carreira, M. R., Dias, A. A., & Lahr, F. A. R. (2013). Avaliação de vigas de madeira laminada colada de cedrinho (*Erisma uncinatum* Warm.). *Ciência da Madeira*, *19*(3), 441–449. https://doi.org/https://doi.org/10.1590/S0104-77602013000300011

Silva, F. C., Trevisan, H., Silva, K. E. D., Lelis, R. C. C., & Carvalho, A. G. (2010). Influência de diferentes adesivos utilizados na fabricação de painéis aglomerados na ação de *Coptotermes gestroi* (Wasmann, 1896) (Isoptera: Rhinotermitidae). *Floresta*, *40*(2), 379–384. https://doi.org/https://doi.org/10.5380/rf.v40i2.17833

Singh, T., Aarpanaei, A., Elustondo, D., Wang, Y., Stocchero, A., Oeste, T. A. P., & Fu, Q. (2022). Emerging technologies for the development of wood products towards extended carbon storage and CO2 capture. *Carbon Capture Science & Technology*, *4*, 100057. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ccst.2022.100057

Yadav, R., & Kumar, J. (2021). Engineered wood products as a sustainable construction material: A review. In M. Gong (Ed.), *Engineered Wood Products for Construction* (pp. 1–14). IntechOpen. https://doi.org/http://doi.org/10.5772/intechopen.99597

Younis, A., & Dodoo, A. (2022). Cross-laminated timber for building construction: A life-cycle-assessment overview. *Journal of Building Engineering*, *52*, 104482.

Zhang, H., & Lu, X. (2014). Modeling of the elastic properties of laminated strand lumber. *Wood Research*, *59*(1), 1–10.

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

673.DESEMPENHO DE PRODUTOS ALTERNATIVOS NA PROTEÇÃO SUPERCIFIAL DA MADEIRA DE TIMBORANA SUBMETIDA AO INTEMPERISMO NATURAL

Vanderson Alexandre Sousa Cruz[1]; Antony Victor Borges Nunes[1]; Roniel Alves Lima[1]; Sindy Daniela Ferreira Sozinho[1]; Guilherme Dos Santos Araújo[1]; Raimunda Márcia Souza Dos Santos[1]; Selma Lopes Goulart[2]

[1]Universidade Federal Rural da Amazonia, UFRA, Campus Parauapebas

[2]Universidade Federal Rural da Amazonia, UFRA, Campus Parauapebas

Resumo: A madeira é considerada uma das matérias-primas amplamente utilizada em diversos setores, porém a madeira é suscetível a ação da degradação, exigindo métodos adequados para a sua preservação. Desse modo, objetivou-se avaliar o uso de produtos alternativos na preservação da madeira, de modo que foram analisados quatro produtos; cera de carnaúba, óleo de linhaça, óleo queimado e verniz. Foram analisadas duas variáveis, verificou-se a intensidade de rachaduras e a variação percentual de massa submetidos aos testes de Friedman e ANOVA de Welch (5%). Os tratamentos com cera de carnaúba tornaram favorável na redução de rachaduras e o óleo de linhaça no ganho de massa. Concluindo que os produtos alternativos apresentam potencial para a preservação da madeira, sendo sua eficiência influenciada pelas características da espécie estudada.

Palavras-chave: Durabilidade, Tratamento alternativo, Sustentabilidade.

Performance of alternative products in the surface protection of timborana wood subjected to natural weathering.

Abstract: Wood is considered one of the raw materials widely used in various sectors; however, it is susceptible to degradation, requiring appropriate methods for its preservation. Thus, the objective of this study was to evaluate the use of alternative products for wood preservation. Four products were analyzed: carnauba wax, linseed oil, used motor oil, and varnish. Two variables were evaluated: crack intensity and percentage mass variation, which were subjected to the Friedman test and Welch's ANOVA (5% significance level). Treatments with carnauba wax were favorable in reducing cracks, while linseed oil promoted the greatest mass gain. It was concluded that alternative products have potential for wood preservation, and their effectiveness is influenced by the characteristics of the species studied.

Keywords: Durability, Alternative treatment, Sustainability.

1. Introdução

A madeira é um material natural, heterogêneo e anisotrópico, constituído principalmente por celulose, hemiceluloses, lignina e extrativos. Quando exposta ao ambiente externo, sua superfície é submetida à ação combinada da radiação solar, precipitação, variações de temperatura e umidade, desencadeando alterações físicas, químicas e dimensionais. Entre os efeitos observáveis do intemperismo estão mudanças de cor, degradação superficial, movimentações dimensionais e formação de rachaduras.

A exposição cíclica à água e à secagem favorece movimentos dimensionais da madeira, enquanto a radiação ultravioleta contribui para alterações fotoquímicas na superfície. Esses processos podem reduzir a estabilidade superficial do material e comprometer seu desempenho em aplicações externas. Por isso, tratamentos superficiais capazes de reduzir a entrada de água e limitar as trocas de umidade podem contribuir para a proteção da madeira durante a exposição ambiental.

Entre os produtos de origem natural, os óleos vegetais e as ceras apresentam interesse por sua capacidade de atuar como agentes hidrorrepelentes. O óleo de linhaça é um óleo secativo e pode formar uma camada superficial após a oxidação, contribuindo para reduzir a absorção de água. Da mesma forma, revestimentos à base de cera de carnaúba podem atuar como barreira hidrofóbica, reduzindo o contato direto da água com a superfície da madeira (BOSSARDI; BARREIROS, 2011; HUMAR; LESAR, 2013).

Carvalho (2020) afirma que vem crescendo a o desenvolvimento de produtos naturais para preservação da madeira que tenham baixo custo e menor impacto ambiental, um exemplo são os preservativos a base de óleos ou extratos de plantas.

A espécie florestal Timborana, *Pseudopiptadenia psilostachya*, (Miq.) J. W. Grimes,) de acordo com o Jardim Botânico, Rio de Janeiro (2023), possui distribuição geográfica ao longo do Bioma Amazônico em vegetação do tipo, Floresta de Terra Firme, abrangendo os Estados da Região Norte do Brasil (Acre, Amazonas e Pará).

Esse trabalho tem como objetivo a caracterização de efeitos de produtos alternativos (cera de carnaúba, óleo queimado, óleo de linhaça e verniz) para preservação da madeira de alta densidade “Timborana”, oriunda de resíduos florestais, testada sob protótipo que simule uso da madeira, avaliando a percentagem de rachadura dos corpos de prova e a variação de massa.

2. Material e métodos

2.1 Local do estudo

A presente pesquisa foi conduzida no laboratório multiusuário de química e produtos lignocelulósicos no Campus Universitário da Universidade Federal Rural da Amazônia, localizada no município de Parauapebas na mesorregião de Carajás, sudeste do Estado do Pará, com a classificação climática de Köppen como Aw, com temperatura média anual 26.1 °C.

2.2 Obtenção e preparo das amostras

Para o desenvolvimento do estudo científico foi utilizada madeira da espécie *Pseudopiptadenia psilostachya*, com alto teor de densidade, proveniente de resíduo do manejo florestal sustentável. A coleta do material foi realizada na Unidade de Manejo Florestal da Fazenda Rio Capim, (UMFR/Rio Capim) no município de Paragominas no Estado do Pará e posteriormente enviada ao laboratório da Universidade.

Com a devida escolha do material, realizaram-se as marcações correspondentes as áreas dos corpos de prova, para posterior processamento na serraria, foram definidos manualmente com as dimensões de 20 × 3 × 3 cm, em conformidade com a NBR 7190:2022 (figura 1-A).

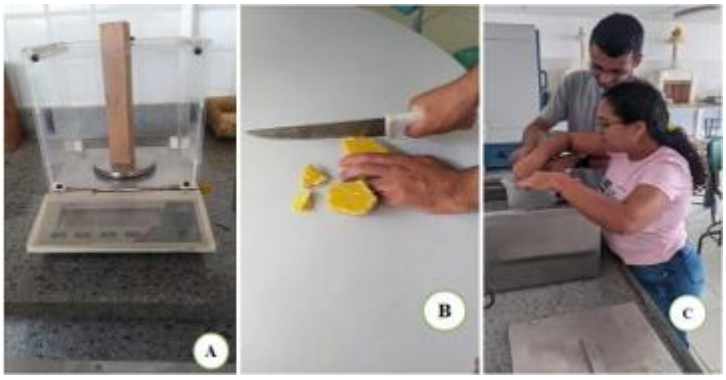


Figura 1 - Processo de marcação nas peças (A e B) de madeiras para as dimensões dos corpos de provas estudados e processo de lixamento dos corpos de prova.

Posteriormente, selecionaram-se 30 corpos de prova de madeira, priorizando aquelas sem defeitos ou danos por xilófagos. Realizou-se o lixamento com lixa grão 120 para melhorar o acabamento e remover imperfeições, conforme a (Figura 1 B).

A marcação dos corpos de prova foi realizada, e foram diferenciadas conforme códigos que apresentavam a sigla da espécie da madeira, dos respetivos tratamentos, e números que variou entre 1 e 6, delimitando a quantidade de repetição para cada tratamento, como por exemplo: TBOL1 (Timborana Óleo de Linhaça 1), TBV 3 (Timborana Verniz 3) entre outros e na sequencia passagem dos corpos de prova conforma Figura 2.

Nesse estudo, o processo de pesagem ocorreu sem a realização da secagem inicial dos corpos de prova em estufa, constituindo uma alteração metodologica intencional. Tal decisão, obteve a finalidade de representar de forma mais proxima ás condições encontradas em algumas serrarias e mercenarias da Região Amazônica, nas quais a madeira pode ser comercializadas e utilizadas sem passar previamente por nenhum processo de secagem em estufas. Dessa forma, a pesagem inicial dos corpos de prova foi realizada considerando a condição natural de umidade no momento de sua



preparação para o experimento.

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Figura 2 – A - Pesagem dos corpos de prova com auxílio da balança analítica. B e C – preparo da cera de carnaúba e aquecimento.

2.3 Delineamento experimental e tratamentos testados

O experimento foi conduzido em arranjo comparativo com cinco tratamentos (Cera de Carnaúba, Verniz, Óleo Queimado, Óleo de Linhaça e Testemunha). Os produtos foram adquiridos no comércio local e pela internet, foram usadas seis repetições para cada tratamento, totalizando 30 corpos de prova. Os tratamentos foram organizados de forma agrupada, com as repetições dispostas sequencialmente, visando facilitar o acompanhamento.

Dentre todos os produtos alternativos para a preservação, a cera de carnaúba precisou passar por uma preparação, fato de que a cera é em forma de barra, sólida. Nesse sentido, esta necessitou ser triturada com uma faca (Figura 2 B) e após isso, passou pelo banho-maria a 105 °C. (Figura 2 C).

Portanto, a etapa subsequente foi realizada a aplicação dos produtos alternativos pelo método de pincelagem, seguida da secagem dos produtos. Esse processo durou cerca de cinco dias para ser concluído e para que os produtos aplicados nas madeiras estivessem completamente secos. No protocolo original não foram registrados a taxa de aplicação, a massa de produto por área, o número de demãos, a concentração, a viscosidade ou a temperatura de aplicação. Essas informações constituem limitações metodológicas e devem ser consideradas na comparação entre os tratamentos.

2.4 Instalação dos experimentos e variáveis analisadas

O experimento foi instalado em 14/11/2024 e permaneceu em exposição em ambiente externo até março de 2025, totalizando aproximadamente quatro meses de avaliação. Os corpos de prova foram dispostos na calçada lateral ao bloco 4 do Campus, permanecendo diretamente suscetíveis ás condições ambientais,

especialmente ã ação da radiação solar e das precipitações, conforme apresentado na figura 3 A.

Esse período coincide com a estação chuvosa na região amazônica, caracterizada, entre os meses de novembro a maio, por elevada umidade relativa do ar, ocorrência frequente de precipitações e maior número de dias com presença de chuvas na região.

Paralelamente, os corpos de prova também estiveram sujeitos à incidência de radiação solar ao longo do período experimental, promovendo a atuação simultânea de diferentes agentes de intemperismo. Dessa forma, a exposição em ambiente externo possibilitou avaliar o comportamento da madeira sob condições naturais de umidade, precipitação e radiação solar, representativas das condições climáticas predominantes na região amazônica durante o período avaliado.



Figura 3 - Área de instalação dos corpos de prova no bloco 4 do campus de Parauapebas. B - Análise visual de rachadura.

As avaliações visuais de rachaduras foram realizadas em 29/11/2024, 17/01/2025 e 26/03/2025, por três avaliadores independentes e treinados. As rachaduras foram observadas no topo e na superfície dos corpos de prova. Utilizou-se uma escala ordinal de 0 a 10, conforme o protocolo original, sendo 0 correspondente à ausência de rachaduras e 10 à maior intensidade observada. Os critérios percentuais intermediários da escala não foram registrados no protocolo original; portanto, não foram acrescentadas categorias percentuais que não constavam dos dados do experimento. As notas dos avaliadores foram utilizadas para obtenção da média por corpo de prova.

$$Variação\ percentual\ de\ massa = \frac{Massa\ Inicial - Massa\ Final}{Massa\ Inicial}\ x\ 100\,\%$$

Fórmula 1- Equação matemática de perda de massa dos corpos de prova.

3. Análise estatística dos dados

As análises foram realizadas no software Jamovi, adotando-se nível de significância de 5% (α = 0,05). Para a variável rachadura, de natureza ordinal e com dados que não atenderam ao pressuposto de normalidade, foi utilizado o teste não paramétrico de Friedman, seguido das comparações múltiplas de Durbin-Conover. Para a variação percentual de massa, a ANOVA de Welch de um fator foi utilizada para comparar as médias entre os tratamentos sem pressupor homogeneidade das variâncias. A escolha desse procedimento é adequada quando se deseja comparar grupos e não se assume variâncias iguais entre eles. Os cálculos complementares das médias foram realizados no Microsoft Excel.

Resultados e discussoes

4.1 Avaliação das rachaduras

Análise das rachaduras, por meio do teste de Friedman, indicou diferenças significativas entre os tratamentos. As comparações múltiplas (Durbin-Conover) mostraram que a Cera de Carnaúba, apresentou as menores médias, sendo o tratamento

mais eficiente (Figura 4). Essa superioridade também foi observada na análise descritiva



Figura 4 - Distribuição média das notas utilizadas na avalição de rachaduras.

(TBT = Timborana testemunha, TBOL = Timborana óleo queimado, TBC = Timborana cera de carnaúba, TBV = Timborana verniz).

O teste de Shapiro-Wilk confirmou a não normalidade, justificando o uso de métodos não paramétricos (tabela 1).

Tratamentos	TBT	TBOL	TBOQ	TBC	TBV
Média	0.981	0.870	0.778	0.176	0.639
Desvio-padrão	1.03	1.36	0.899	0.542	0.767
Variância	1.06	185	0.808	0.294	0.589
W de Shapiro-Wilk	0.828	0.679	0.813	0.371	0.807
P Shapiro-Wilk	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001

Tabela 1- Estatística descritiva sobre a variável rachadura para os tratamentos utilizados. (TBT = Timborana testemunha, TBOL = Timborana óleo queimado, TBC = Timborana cera de carnaúba, TBV = Timborana verniz).

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

A maior eficiência da cera de carnaúba na redução de rachaduras é coerente com o efeito esperado de uma camada superficial hidrorrepelente. A menor interação da água com a superfície pode reduzir a amplitude dos ciclos de inchamento e retração, diminuindo a formação ou a abertura de fissuras. Entretanto, essa interpretação é específica para a timborana e para as condições experimentais avaliadas.

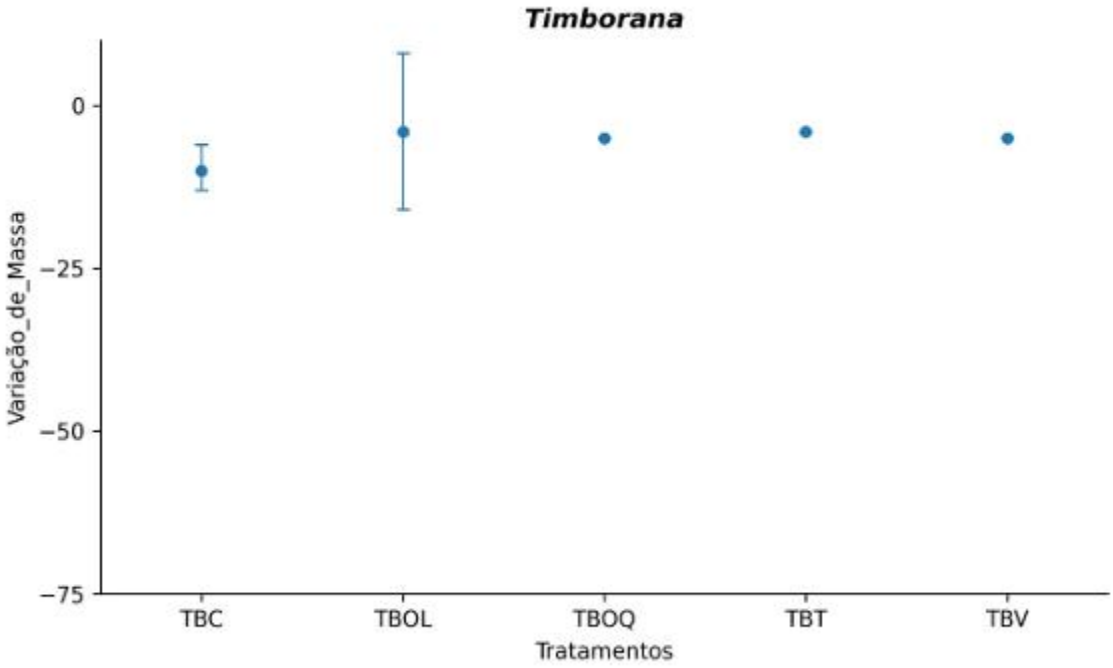
A variação percentual de massa apresentou diferenças significativas entre os tratamentos, conforme a ANOVA de Welch ($p < 0,001$). A análise deve ser interpretada com cautela, pois a massa final pode incorporar água absorvida ou retida, partículas provenientes do ambiente e resíduos do próprio tratamento. Assim, a variação observada representa o comportamento da massa dos corpos de prova durante a exposição, mas não permite, isoladamente, concluir sobre perda ou ganho de material estrutural.

Variação de Massa da madeira. Shapiro-Wilk

Espécie	Tratamento	Média	Desvio-padrão	W	P
Timborana	TBT	3.78	0.441	0.536	< 0.001
	TBOL	3.33	0.707	0.564	< 0.001
	TBOQ	4.89	0.333	0.390	< 0.001
	TBC	1.78	0.441	0.536	< 0.001
	TBV	1.25	0.463	0.566	< 0.001

Tabela 2 - Estatística descritiva sobre a variável variação de massa.

Já para a perda de massa, (Figura 7), os dados apresentaram diferenças significativas



entre os tratamentos, permitindo identificar os produtos ineficientes na perda de massa. O teste de Shapiro-Wilk confirmou a normalidade dos dados, possibilitando o uso da chamada ANOVA de Welch, que indicou diferenças significativas ($p < 0,001$). Todos os produtos apresentaram médias negativas, indicando ganho de massa, com destaque para o TBOL (Tratamento da madeira com óleo de linh**aça).**

Figura 7. Distribuição média da porcentagem de variação de massa dos tratamentos avaliados. TBC = Timborana, cera de carnaúba, TBOl = Timborana, óleo de linhaça, TBOQ = Timborana óleo queimado, TBT = Timborana testemunha, TBV = Timborana verniz.

Os resultados evidenciam comportamentos distintos entre os tratamentos quanto à intensidade de rachaduras e à variação percentual de massa. A cera de carnaúba apresentou o melhor desempenho para a variável rachadura, o que pode estar relacionado à formação de uma barreira superficial hidrorrepelente. Para a variação percentual de massa, as diferenças entre tratamentos indicam comportamentos distintos durante a exposição, mas não devem ser interpretadas isoladamente como medida de preservação, devido à influência simultânea da água, do produto aplicado e de partículas depositadas na superfície.

A interpretação da variação percentual de massa deve ser feita com cautela. Como os corpos de prova não passaram por secagem inicial em estufa e o teor de umidade inicial não foi determinado, diferenças entre massa inicial e final podem resultar de absorção ou perda de água, retenção do tratamento, deposição de partículas e alterações superficiais. Dessa forma, o resultado representa o comportamento da massa durante a exposição, mas não permite, isoladamente, concluir sobre ganho ou perda de material estrutural.

O óleo lubrificante usado apresentou desempenho experimental que pode ser comparado aos demais tratamentos, mas sua utilização como alternativa de preservação requer ressalvas ambientais. O gerenciamento e a destinação desse resíduo são regulamentados, e sua utilização em madeira exposta ao ambiente deve considerar a possibilidade de lixiviação e de contato dos contaminantes com o solo. Portanto, qualquer indicação prática desse tratamento deve considerar critérios ambientais e de destinaçã, além dos resultados experimentais (Conama, 2005; Ibama, 2012).

4. Conclusão

A cera de carnaúba apresentou o melhor desempenho entre os tratamentos avaliados para reduzir a intensidade de rachaduras na madeira de timborana submetida ao intemperismo natural. A variação percentual de massa apresentou diferenças entre os tratamentos, mas não deve ser utilizada isoladamente para estabelecer uma recomendação de preservação, pois o teor de umidade inicial não foi determinado e a massa final pode refletir água, produto retido e material particulado. Os resultados indicam potencial da cera de carnaúba como tratamento superficial nas condições avaliadas, enquanto a indicação dos demais produtos deve considerar as limitações metodológicas e, no caso do óleo lubrificante usado, os aspectos ambientais e de destinação.

5. Agradecimentos

Ao CNPq - Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (Processo nº 406053/2022-7) pelo financiamento do projeto “Geração de bioenergia a partir de resíduos do manejo florestal sustentável: descentralização da matriz energética e impactos socioambientais na Amazônia”, sob coordenação do Prof. Thiago de Paula Protásio.

6. Referências

LEPAGE, E. S.; OLIVEIRA, A. M. F.; LELIS, A. T.; LOPEZ, G. A. C.; CHIMELO, J. P.; OLIVEIRA, L. C. S.; CAÑEDO, M. D.; CAVALCANTE, M. S.; IELO, P. K. Y.; ZANOTTO, P. A.; MILANO, S. **Manual de preservação de madeiras**. São Paulo: IPT. 2. ed. 1986. 708p.

MORALES-SALAZAR, M. S.; VÍLCHEZ ALVARADO, B.; CHAZDON, R. L.; ORTIZ.

JOLY, A. B. Botânica: Introdução à taxonomia vegetal. 5. ed. São Paulo**: Companhia Editora Nacional,** 1979. 777p.

MEDEIROS NETO, Pedro Nicó et al. Resistência biológica e agentes deterioradores da madeira. In: ANDRADE, Jaily Kerller Batista (Org.). Fundamentos e pesquisas em Ciências Ambientais e Agrárias. Campina Grande: Licuri, 2024, p. 73-89. ISBN: 978-65-85562-27-0. DOI: 10.58203/Licuri.22706.

VIDAL, J. M. et al. Preservação de madeiras no Brasil: Histórico, cenário atual e tendências. Ciência Florestal, v. 25, n. 1, 2015.

Durabilidade de estacas de eucalipto (Eucalyptus sp.) tratadas com CCA após 60 meses de ensaio no campo experimental da Embrapa Acre, Rio Branco, Acre. Rio Branco: Embrapa Acre, 2005.

BOSSARDI, Kelly; BARREIROS, Ricardo Marques. Produtos naturais como preservantes para madeiras de rápido Crescimento–uma revisão. Revista Ciência da

Madeira (Brazilian Journal of Wood Science), v. 2, n. 2, p. 10.12953/2177-6830. v02n02a05, 2011.

Flora e Funga do Brasil – Pseudopiptadenia suaveolens (Miq.) J.W. Grimes. Rio de Janeiro: JBRJ, 2020. Disponível em: https://floradobrasil.jbrj.gov.br Acesso em: 23 abr. 2026.

BORGES, Patrıcia Thaıs Cavalcante et al. **Carnauba wax and linseed oil to preserve Amazon wood.**

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Desempenho mecânico de estruturas emergenciais produzidas com resíduos domésticos

Chris Stephanie Larco Chávez[1]; Danilo dos Santos Alves[1]; Eliana Martins de Sousa[1]; Keliane de Jesus Reis[1]; Renilson Luiz Teixeira[2]; José Reinaldo Moreira da Silva[1]

[1] Departamento de Ciências Florestais – ESAL/UFLA
[2] IFES/campus Colatina e Departamento de Ciências Florestais – ESAL/UFLA

Resumo: Poucas pesquisas abordam o uso de estruturas emergenciais em madeira para o rápido restabelecimento da mobilidade após desastres naturais, especialmente utilizando materiais reaproveitados de baixo custo. Este estudo teve como objetivo avaliar a deformação estrutural de pontes confeccionadas com cabos de vassoura descartados submetidos a carregamento estático, visando analisar seu potencial para aplicações temporárias. Os resíduos foram previamente classificados de acordo com a densidade da madeira e empregados na fabricação das estruturas experimentais. Também foram avaliadas diferentes distâncias entre as transversinas, registrando-se as deformações por meio de medições com precisão de 0,01 mm. Os resultados demonstraram que a densidade da madeira, o espaçamento entre as transversinas e a presença de defeitos naturais influenciaram diretamente o desempenho mecânico das pontes. Além disso, verificou-se que a utilização de longarinas duplas proporcionou maior resistência estrutural. Conclui-se que cabos de vassoura comumente descartados apresentam potencial para estruturas emergenciais de pequena escala, desde que previamente selecionados quanto à qualidade da madeira e à densidade.

Palavras-chave: Reutilização; Sustentabilidade; Mobilidade.

Mechanical Performance of Emergency Structures Produced from Household Waste

Abstract: Research on timber emergency structures for the rapid restoration of mobility after natural disasters remains limited, particularly regarding the use of low-cost recycled materials. This study evaluated the structural deformation of bridges manufactured from discarded broom handles under static loading to assess their potential for temporary applications. The wooden elements were classified according to density and assembled into experimental bridge structures. Different transverse beam spacings were assessed, and structural deformations were recorded with a precision of 0.01 mm. The results showed that wood density, transverse beam spacing, and natural defects had a direct influence on the mechanical performance of the structures, whereas the use of double longitudinal beams significantly improved their load-bearing capacity. These findings indicate that discarded broom handles can be repurposed as a sustainable material for small-scale emergency bridge structures, provided that the wood is carefully selected based on its quality and density.

Keywords: Reuse; Sustainability, mobility.

1. Introdução

As travessias emergenciais desempenham papel essencial na restauração da mobilidade em regiões afetadas por desastres naturais, como enchentes, deslizamentos de terra e colapso de pontes, permitindo o deslocamento de equipes de resgate, o transporte de suprimentos e o acesso

da população a serviços essenciais (Yeh et al., 2015). Nesse contexto, estruturas temporárias de rápida implantação representam alternativa estratégica para reduzir o isolamento de comunidades e minimizar os impactos sociais e econômicos decorrentes dessas situações.

Entre as soluções tradicionalmente empregadas destacam-se as pontes modulares metálicas, como Bailey Bridge, Medium Girder Bridge (MGB), Dry Support Bridge (DSB) e outros sistemas portáteis utilizados em operações militares e de defesa civil (Brittani Russell e Ashley Thrall, 2013; Rodrigues Pereira, 2015). Embora apresentem elevada eficiência estrutural, esses sistemas normalmente dependem de componentes industrializados, equipamentos de transporte e logística especializada, fatores que podem limitar sua utilização em cenários onde o acesso é restrito ou os recursos disponíveis são insuficientes (Xu et al., 2025).

Como alternativa, a adaptação de conceitos estruturais históricos tem despertado interesse na engenharia contemporânea. A ponte autoportante idealizada por Leonardo da Vinci constitui um exemplo notável de estrutura cuja estabilidade é obtida exclusivamente pelo arranjo geométrico e pelo equilíbrio entre seus elementos, dispensando conectores metálicos permanentes (Bast et al., 2019; Lamberti et al., 2024). Esse princípio estrutural apresenta potencial para aplicações em travessias emergenciais, principalmente quando associado ao uso de materiais de baixo custo e facilmente disponíveis.

Os princípios da sustentabilidade e da economia circular têm incentivado o reaproveitamento de resíduos lignocelulósicos em aplicações estruturais. A reutilização de cabos de vassouras descartados, constituídos predominantemente por madeira de pequenas dimensões, representa alternativa promissora para a construção de protótipos experimentais, agregando valor a materiais que normalmente seriam destinados ao descarte. Além dos benefícios ambientais, essa estratégia contribui para o desenvolvimento de soluções acessíveis e de rápida execução, características desejáveis em situações de emergência. Entretanto, a elevada variabilidade das propriedades da madeira exige que aspectos físicos, como a densidade, sejam considerados durante o desenvolvimento de estruturas. A densidade apresenta estreita relação com a resistência mecânica e rigidez, influenciando diretamente o comportamento estrutural dos elementos submetidos ao carregamento.

O objetivo foi avaliar a deformação estrutural, com carregamento controlado, de estruturas confeccionadas a partir de resíduos domésticos ou empresariais, de forma a contribuir para o desenvolvimento sustentável, em aplicações emergenciais.

2. Material e métodos

a. Coleta, preparo dos corpos de prova e montagem das estruturas emergenciais

Foram coletados 30 cabos de vassouras, provenientes de resíduos do setor de limpeza da Universidade Federal de Lavras (UFLA). Os mesmos foram padronizados, no Laboratório de Usinagem da Madeira (LUM), gerando 20 longarinas e 10 transversinas, de 1096 mm e de 397 mm de comprimento, respectivamente, as quais permitiram realizar a construção de cinco estruturas, contendo 4 longarinas e 2 transversinas em cada uma. Após a padronização dimensional, foi realizada a medição do diâmetro, em seis distintas posições ao longo dos comprimentos, por meio de paquímetro digital (0,01 mm) e pesadas, em balança eletrônica (0,01 g). A partir destes dados foram calculadas as densidades aparentes (12%) de cada peça, que permitiram agrupar as longarinas em cinco classes distintas (Tabela 1).

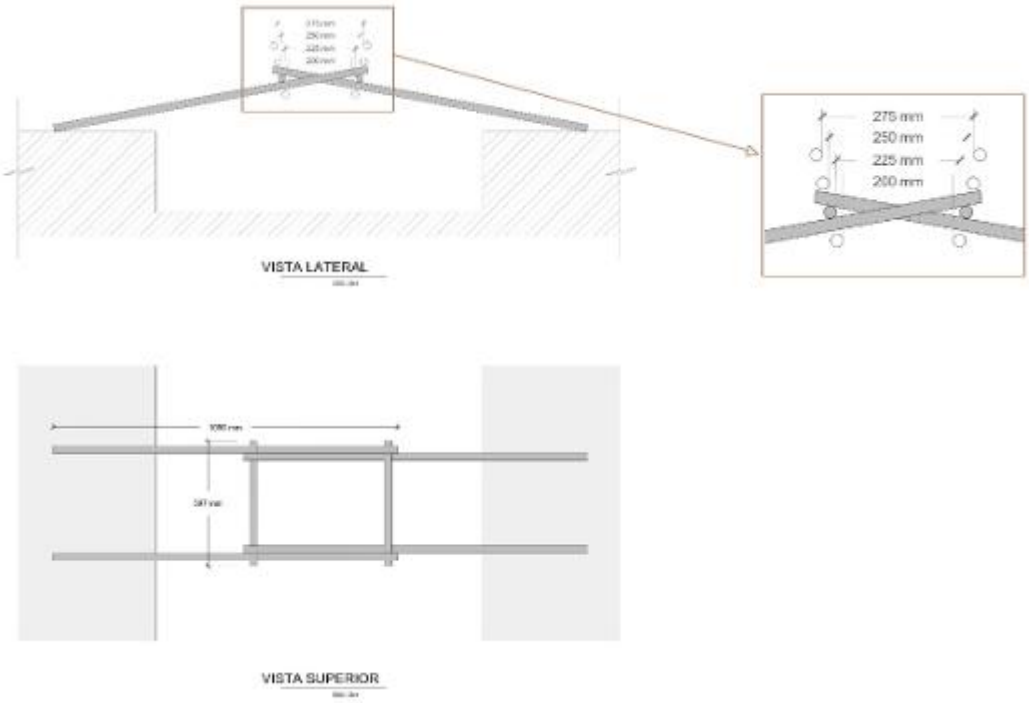
Tabela 1. Agrupamento das madeiras, por média das densidades, para confecção das longarinas em cada estrutura emergencial

Estruturas	Valores das densidades (g*cm^{-3})	
	Por longarina	**Média por estrutura**
1	0,383 0,398 0,402 0,409	0,398
2	0,413 0,420 0,425 0,428	0,422
3	0,429 0,431 0,431 0,433	0,431
4	0,436 0,469 0,470 0,478	0,463
5	0,481 0,502 0,520 0,623	0,532

A seguir, foram confeccionadas cinco estruturas (Figura 1), com semelhantes densidades, reduzindo as variabilidades internas. Durante a montagem das estruturas emergenciais não foram utilizados conectores metálicos (pregos, parafusos, tarugos...) ou adesivos entre as longarinas e entre longarinas e transversinas. Apenas foram utilizados arames entre as transversinas, para definir o comprimento da base de apoio da plataforma de

transposição e da inclinação das longarinas, até que se iniciasse o carregamento vertical. Além disto, os arames permitiram facilidade e agilidade na montagem das estruturas.

Figura 1. Vistas esquemáticas do processo de montagem da estrutura emergencial, em destaque o comprimento da base de apoio da plataforma de transposição, definidas pelo arame entre as transversinas.
Fonte: Autores (2026)



b. Ensaios de carregamento

Para a avaliação da capacidade estrutural de suporte de carga, foram previamente definidas quatro distâncias entre as transversinas, sendo de 200, 225, 250 e 275 mm (Figura 1). As transversinas são consideradas os elementos responsáveis por estabilização das longarinas, definindo a geometria da estrutura emergencial (Tabela 2). Foram montadas vinte estruturas experimentais, resultantes da combinação das cinco classes de densidades e as quatro distâncias entre transversinas. Dessa forma, cada classe de densidade foi avaliada em todas as condições geométricas estabelecidas.

Tabela 2. Distâncias entre as transversinas, vão livre (comprimento projetado das longarinas) e altura da estrutura, que promovem a declividade, em percentual das longarinas

Distâncias entre as transversinas	Altura da plataforma	Vão livre	Declividade
200 mm	195	960	20,3%
225 mm	168	960	17,5%

250 mm	160	950	16,8%
275 mm	138	945	14,6%

As declividades utilizadas na Tabela 2, podem ser consideradas superiores aos limites recomendados pelas normas de acessibilidade, onde a inclinação máxima permitida para cada segmento varia entre 5% e 8,33%, dependendo da altura do desnível a ser vencido (ABNT NBR 9050, 2020). Contudo, cabe ressaltas que as estruturas avaliadas se destinam exclusivamente a aplicações emergenciais de caráter temporário e podem ser utilizadas até que soluções permanentes sejam implementadas pelos órgãos responsáveis.

Os ensaios de carregamento foram realizados mediante aplicação de cargas concentradas, na base da estrutura, utilizando anilhas de academia (Figura 2). Inicialmente, a carga foi aumentada em incrementos de 2,5 kg até atingir 15 kg e posteriormente foram utilizados incrementos de 3 kg até a ocorrência da falha estrutural, seja por deslocamento, por redução do vão a ser vencido, devido a flecha das longarinas, ou por ruptura. A cada incremento de carga, foi medida a flecha máxima, no centro do vão das longarinas, por meio do traçador digital de altura, com resolução de 0,01 mm.



Figura 2. Setup para o ensaio de carregamento e medição das deformações.
Fonte: Autores (2026)

3. Resultados e discussão

As densidades das longarinas utilizadas na confecção das cinco estruturas emergenciais (Tabela 1), apresentou valores de 0,383 a 0,623 g*cm^{-3}, com desvio padrão de 0,0014 a 0,0564 g*cm^{-3} e coeficiente de variação de 0,33 a 10,61%. A estrutura cinco apresentou o maior coeficiente de variação (10,61%), indicando maior heterogeneidade entre suas longarinas, principalmente devido à presença de uma peça, que apresentou densidade significativamente superior as demais. Em contrapartida, a Estrutura 3 apresentou o menor coeficiente de variação (0,33%), evidenciando maior uniformidade entre os elementos

estruturais. Embora a densidade seja um parâmetro importante para avaliação do comportamento mecânico da madeira, outros fatores, como defeitos naturais e características anatômicas das peças, também podem influenciar significativamente o desempenho estrutural durante os ensaios (Konukcu; Quin e Zhang, 2021).

Durante a execução dos ensaios algumas longarinas apresentaram defeitos naturais que comprometeram a continuidade do ensaio de carregamento e deformação. Assim, foi necessária a substituição de algumas peças por outras com densidade semelhante. Este fato, foi controlado apenas por motivos dos defeitos naturais, sem qualquer intuito de melhor a performance da estrutura. Na Tabela 3, encontra-se apresentadas as substituições ocorridas e a descrição do motivo. Além disto, foi feita análise do efeito da substituição, por longarina e estrutura, em termos da variação das densidades obtidas.

Tabela 3. Longarinas substituídas durante os ensaios por motivo e as densidades envolvidas na substituição

Estrutura	Densidade (g/cm³)		Variação de densidade (%)	Motivo
	Original	Substituta		
2	0,425	0,520	+22,5	Ruptura por furo de broca
5	0,641	0,470	-26,6	Ruptura prematura por nó

Na estrutura emergencial 2, a longarina com densidade de 0,425 g*cm^{-3} apresentou ruptura durante o ensaio devido à presença de furos provocados por insetos xilófagos, sendo substituída pela longarina com densidade de 0,520 g*cm^{-3}. Como consequência, a densidade média da estrutura aumentou para aproximadamente 0,445 g*cm^{-3}. Situação semelhante ocorreu com a estrutura emergencial 5, em que uma longarina (0,641 g*cm^{-3}) rompeu prematuramente em decorrência da presença de nó localizado na região de maior solicitação mecânica. Ela foi substituída por outra longarina (0,470 g*cm^{-3}), reduzindo a densidade média da estrutura para aproximadamente 0,519 g*cm^{-3}. Essas substituições devem ser consideradas na interpretação dos valores de resistências, pois tanto os defeitos naturais quanto as alterações na densidade média das estruturas podem influenciar diretamente seu comportamento mecânico.

3.1. Influência da carga aplicada e da distância entre transversinas na deformação das estruturas

A variação da deformação das estruturas emergenciais em função da carga aplicada, para as diferentes distâncias entre as transversinas e classes de densidade, encontra-se ilustrado na Figura 3.

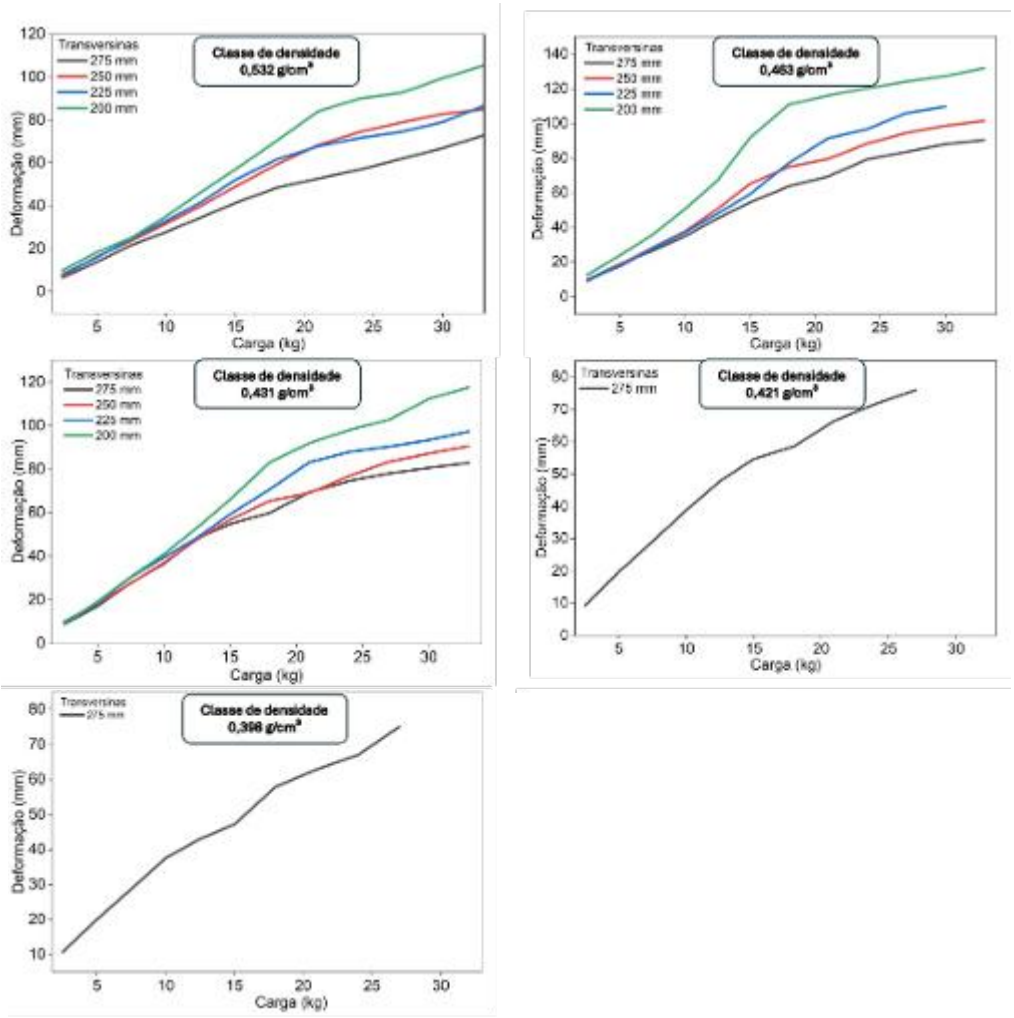


Figura 3. Variação da deformação em razão de diferentes cargas, distância entre as transversinas e classes de densidade.
Fonte: Autores (2026)

Em todas as estruturas avaliadas observou-se aumento progressivo da deformação com o incremento da carga aplicada. Esse comportamento é compatível com a resposta de elementos estruturais submetidos à flexão, nos quais o aumento do carregamento resulta em maiores deslocamentos, sendo a magnitude das deformações influenciada pela rigidez e pelas propriedades mecânicas da madeira (Arriaga et al., 2023). Independentemente da classe de densidade, as menores deformações ocorreram nas cargas iniciais, enquanto os maiores deslocamentos foram registrados sob as cargas mais elevadas. De maneira geral, as configurações com distância entre transversinas de 200 mm apresentaram maiores deformações para cargas elevadas, enquanto para as estruturas com transversinas distantes de 275 mm apresentaram menores deslocamentos. Esses valores indicam que menores distancias entre as transversinas causam melhoria da rigidez estrutural. Entretanto, esse comportamento variou

entre as diferentes classes de densidade, evidenciando que a resposta mecânica resulta da interação entre a geometria da estrutura e as propriedades da madeira.

Nas estruturas com densidades médias de 0,421 g*cm^{-3} e 0,398 g*cm^{-3}**,** os resultados foram obtidos apenas para a distância entre as transversinas de 275 mm, pois uma das longarinas apresentou ruptura prematura durante os ensaios devido à presença de defeitos naturais, impossibilitando a continuidade das demais configurações.

3.2. Influência da carga e da distância entre transversinas na deformação

A comparação entre as diferentes classes de densidade, considerando apenas as estruturas ensaiadas com distância entre as transversinas de 275 mm, eliminando a influência da variação geométrica, encontra-se na Figura 4.

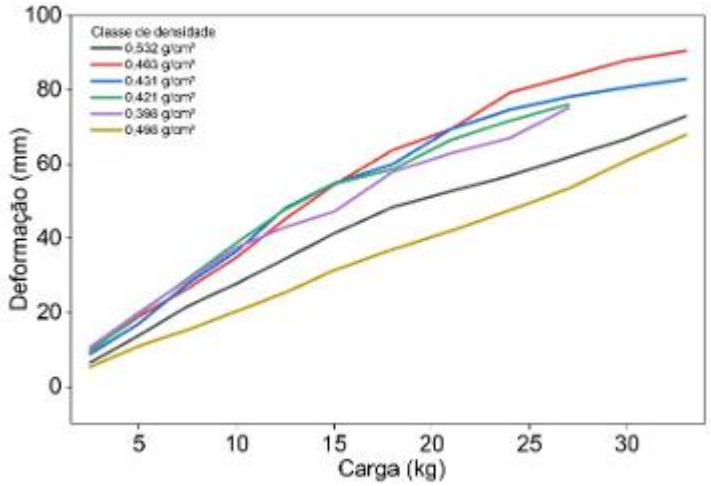


Figura 4. Variação da deformação das pontes em diferentes cargas e classe de densidade com transversinas de 275 mm.
Fonte: Autores (2026)

A relação entre densidade e comportamento mecânico também é observada na literatura, sendo reportadas associações positivas entre a densidade da madeira e propriedades como o módulo de elasticidade e a resistência à flexão. Entretanto, essa relação pode apresentar variações entre espécies e peças individuais, especialmente quando estão presentes defeitos ou outras características que alteram a distribuição das tensões (Van Gelder et al., 2006; Arriaga et al., 2023). A presença de defeitos naturais, especialmente nós, pode alterar significativamente o comportamento mecânico da madeira, uma vez que provoca desvios das fibras e alterações na distribuição das tensões, podendo reduzir a resistência à flexão e outras propriedades mecânicas (Arriaga et al., 2023; Zhang et al., 2024).

Esses resultados demonstram que, embora a densidade exerça influência importante sobre o comportamento mecânico das estruturas, fatores como defeitos naturais da madeira e

características construtivas das longarinas também desempenham papel significativo na resposta estrutural.

3.3. Comparação do desempenho antes e após as substituições

Com o objetivo de avaliar a influência das substituições das longarinas sobre o desempenho estrutural, compararam-se as cargas máximas suportadas pelas estruturas antes e após as trocas realizadas durante os ensaios (Tabela 4).

Tabela 4. Comparação das cargas máximas suportadas antes e após as substituições das longarinas

Estrutura	Condição	Densidade média ($g*cm^{-3}$)	Carga máxima suportada (kg)	Deformação na carga máxima (mm)	Variação da carga (%)
2	Original	0,4215	27,00	98,00	-
2	Após substituição	0,4450	33,00	131,86	+22,2
5	Original	0,5317	30,00	120,00	-
5	Após substituição	0,5190	33,00	131,86	+10,0

Observou-se que a substituição realizada na Estrutura 2 proporcionou aumento de 22,2% na carga máxima suportada, enquanto na Estrutura 5 esse incremento foi de 10,0%, permitindo que ambas atingissem a carga máxima prevista para o ensaio, que foi de 33 kg.

Os resultados evidenciam que as substituições possibilitaram a continuidade dos ensaios, sem comprometer significativamente o comportamento global das estruturas, reforçando que defeitos naturais da madeira podem exercer influência mais significativa sobre o desempenho mecânico que pequenas variações da densidade entre as peças utilizadas como longarinas.

4. Conclusões

A ponte com classe de densidade de 0,498 $g*cm^{-3}$, apresentou maior resistência à deformação. Isso pode estar relacionado ao fato da mesma ser composta por longarinas confeccionadas com a junção de 2 cabos de vassoura, reforçando à resistência da estrutura.

As pontes com classes de densidade de 0,421 e 0, 398 $g*cm^{-3}$ apresentam os valores de deformação medidos utilizando-se apenas as transversinas de 275 mm porque uma de suas longarinas quebrou, provavelmente devido à presença de brocas causadas por xilófagos.

5. Agradecimentos

Agradecemos à UFLA, pela estrutura necessária para a realização deste trabalho e ao IFES pelo incentivo constante as nossas pesquisas. Agradecemos também a CAPES, ao CNPq e

a FAPEMIG cujos recursos foram fundamentais para a realização, bem como participação no VII CBCTEM.

6. Referências bibliográficas

Arriaga, F., Wang, X., Íñiguez-González, G., Llana, D. F., Esteban, M., & Niemz, P. (2023). *Mechanical properties of wood: A review*. Forests, 14(6), 1202. https://doi.org/10.3390/f14061202

Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2020). *Acessibilidade a edificações, mobiliário, espaços e equipamentos urbanos* (NBR 9050). ABNT.

Bast, K. M., Xie, M., & Ochsendorf, J. (2019). *Feasibility study of Leonardo da Vinci's bridge proposal over the Golden Horn in Istanbul* [Master's thesis, Massachusetts Institute of Technology]. MIT Libraries. https://dspace.mit.edu/

Konukcu, A. C., Quin, F., Zhang, J., Effect of growth rings on fracture toughness of wood. Springer Nature, 2021. https://doi.org/10.1007/s00107-021-01738-7

Lamberti, L. A., Della Pace, R. D., Tavares, L. C., Perius, C. F., Beck, F., & Pauletti, D. (2024). *Structural analysis and design of a self-supporting wooden bridge designed by Leonardo Da Vinci*. Ciência e Natura, 46. https://doi.org/10.5902/2179460X86798

Pereira, R. M. R. (2015). *Comportamento estrutural de pontes logísticas do tipo Mabey do Exército Português* [Dissertação de mestrado, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa]. Repositório Científico de Acesso Aberto de Portugal. https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/downloadFile/563345090414140/Tese%20Mestrado%20Ricardo%20Pereira%2068543.pdf

Russell, B. R., & Thrall, A. P. (2013). *Portable and rapidly deployable bridges: Historical perspective and recent technology developments*. *Journal of Bridge Engineering*, *18*(10), 1074–1085. https://doi.org/10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.0000454

Van Gelder, H. A., Poorter, L., & Sterck, F. J. (2006). Wood mechanics, allometry, and life-history variation in a tropical rain forest tree community. New Phytologist, 171(2), 367–378. https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2006.01757.x

Xu, G., Li, D., Lu, J., & Ma, G. (2025). *Technical development and applications of Bailey bridges*. *Steel Construction (Chinese & English)*, *40*(4), 1–7. https://doi.org/10.13206/j.gjgS24011001

Yeh, F.-Y., Chang, K.-C., Sung, Y.-C., Hung, H.-H., & Chou, C.-C. (2015). *A novel composite bridge for emergency disaster relief: Concept and verification*. *Composite Structures*, *127*, 199–210. https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2015.03.012

Zhang, X., Sun, H., Xu, G., Duan, Y., Van den Bulcke, J., Van Acker, J., & Shi, J. (2024). Understanding the effect of knots on mechanical properties of Chinese fir under bending test by using X-ray computed tomography and digital image correlation. Forests, 15(1), 174. https://doi.org/10.3390/f15010174

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Diagnóstico Tecnológico e Mapeamento Regional da Eficiência do Tratamento Preservativo de Madeiras no Brasil

Davi Bueno Araujo[1]; Davi Ferreira Castro Cabral[1]; Gabriel de Matos Diniz[1]; Gledston da Silva Rezende[1]; Laura Menezes Corrêa[1]; William Moreira de Oliveira[1]; Wellington Folhaça Ferreira[1]; Vinícius Resende de Castro[1];

[1] Universidade Federal de Viçosa 01

Resumo: A avaliação da retenção e penetração do CCA em madeira tratada é essencial para garantir a eficiência do tratamento preservativo conforme as categorias de uso da ABNT NBR 16143:2024. Este estudo diagnosticou o controle de qualidade (retenção e penetração) em amostras de madeira tratada e soluções preservativas coletadas entre 2025 e 2026 na UFV. Foram analisadas 1.313 amostras, sendo 1.098 de madeira tratada e 215 de soluções de CCA-C, utilizando ensaios de penetração por colorimetria com cromoazurol S e quantificação dos ingredientes ativos por fluorescência de raios X (XRF). As madeiras apresentaram aprovação superior a 60% quanto à retenção mínima exigida de acordo com a norma, enquanto as soluções preservativas apresentaram 58,74% de reprovação. Os principais polos industriais concentram-se em Santa Catarina (18%), Minas Gerais (16%) e Paraná (14%). Os resultados evidenciam desafios na padronização química do CCA e no controle de qualidade do setor de madeira tratada no Brasil.
Palavras-chave: Controle de qualidade; XRF; Elementos xilófagos.

Technological Diagnosis and Regional Mapping of Wood Preservative Treatment Efficiency at Brazil

Abstract: The evaluation of CCA retention and penetration in treated wood is essential to ensure the efficiency of the preservative treatment in accordance with the use categories of the ABNT NBR 16143:2024 standard. This study diagnosed the quality control (retention and penetration) of treated wood samples and preservative solutions collected between 2025 and 2026 at UFV. A total of 1,313 samples were analyzed, consisting of 1,098 treated wood samples and 215 CCA-C solutions, utilizing colorimetric penetration assays with chromeazurol S and active ingredient quantification by X-ray fluorescence spectrometry (XRF). The wood samples achieved an approval rate exceeding 60% regarding the minimum required retention according to the standard, whereas the preservative solutions showed a 58.74% rejection rate. The main industrial clusters are concentrated in Santa Catarina (18%), Minas Gerais (16%), and Paraná (14%). The results highlight challenges in the chemical standardization of CCA and in the quality control of the treated wood sector in Brazil.
Keywords: Quality control; XRF; Xylophagous elements.

1. Introdução

A produção brasileira de madeira preservada atingiu a marca de 5,5 milhões de metros cúbicos em 2025. Esse montante destina-se, majoritariamente, ao atendimento de demandas estruturais e rurais, destacando-se o uso como mourões, dormentes, postes, além de peças roliças e serradas voltadas para a construção civil (ABPM, 2025).

No âmbito do tratamento preservativo, destacam-se as madeiras de *Pinus* e *Eucalyptus*, devido à ampla disponibilidade de madeira e ao rápido crescimento em comparação com espécies nativas (Valle et al., 2013).

Em decorrência da susceptibilidade natural da madeira ao ataque de organismos xilófagos, o tratamento preservativo desempenha um papel fundamental no prolongamento de sua vida útil (Matos et al., 2020; Ferrarini et al., 2016). No Brasil, o arseniato de cobre cromatado (CCA) consolida-se como o principal preservante químico empregado no tratamento em autoclaves (De Menezes, 2024). O CCA destaca-se por sua elevada eficácia na proteção da madeira contra a ação de agentes biodeterioradores (Araujo et al., 2012; Vivian et al., 2021).

O CCA é um preservante hidrossolúvel de base óxida, contendo óxidos de cobre (CuO), cromo (CrO_3) e arsênio (As_2O_5), com operação restrita a ambientes industriais controlados e fechados, como a autoclave com sistema vácuo-pressão (Araujo et al., 2012). Conforme estabelecido pela ABNT NBR 16143 (2024), a quantidade de preservante retido na madeira varia se acordo com as classes de exposição da madeira, demandando uma retenção mínima de 6,5 kg i.a./m^3 para mourões em contato com o solo, 4,0 kg i.a./m^3 para madeira serrada em suspensão e 9,6 kg i.a./m^3 para postes, dormentes e peças estruturais que tem contato com o solo.

Os limites mínimo e máximo de CuO, CrO_3 e As_2O_5 exigidos para o balanço dos ingredientes ativos na formulação do CCA-C são, respectivamente, 17–21%, 44,5–50,5% e 30–38% de acordo com a AWPA P23 (2014). No que diz respeito às funções de seus constituintes químicos, o cromo atua como o agente fixador dos demais elementos na matriz da madeira. Por sua vez, o cobre e o arsênio desempenham os papéis de fungicida e inseticida, respectivamente, conferindo proteção integral ao material (Kim & Park, 2020; Mohajerani et al., 2018).

No Brasil, a qualidade da madeira tratada sob pressão é regulamentada por normas técnicas que estabelecem critérios para assegurar a eficiência do processo preservativo e o desempenho do material em serviço. A ABNT NBR 16143:2024 – Preservação de madeiras – Sistema de categorias de uso define as condições de exposição da madeira e os requisitos mínimos de retenção de ingredientes ativos de acordo com a aplicação final, considerando diferentes níveis de risco biológico e ambiental. Complementarmente, a ABNT NBR 6232:2013 – Penetração e retenção de preservativos em madeira tratada sob pressão estabelece os procedimentos para avaliação da qualidade do tratamento, incluindo métodos para determinação da penetração e quantificação da retenção dos preservativos na madeira. A aplicação integrada desses referenciais normativos é fundamental para garantir a uniformidade

dos tratamentos industriais, aumentar a vida útil dos produtos madeireiros e assegurar o uso sustentável da madeira como material renovável.

Diante da relevância do tratamento preservativo no cenário nacional e de sua complexidade inerente, torna-se imprescindível monitorar a qualidade do beneficiamento de madeiras dos gêneros *Pinus* e *Eucalyptus*. Nesse contexto, o Laboratório de Propriedades da Madeira (LPM) da UFV realiza ensaios físico-químicos de acordo com a norma ABNT NBR 6232 (2013), para determinar a penetração e a retenção do CCA-C na madeira e na solução preservativa através da quantificação em porcentagem, dos óxidos de cobre (CuO), cromo (CrO_3) e arsênio (As_2O_5).

O presente trabalho objetivou diagnosticar os dados coletados no período de um ano (01/06/2025 a 01/06/2026) pela UFV, quantificando os índices de aprovação e reprovação das amostras recebidas, o mapeamento por Unidades Federativas e a distribuição das amostras conforme sua aplicação tecnológica (mourões, estacas, decks, dormentes, postes, madeira serrada e compensados).

2. Material e métodos

2.1 Delineamento experimental e banco amostral

Este estudo foi desenvolvido a partir de um banco de dados analítico proveniente do programa de controle de qualidade físico-químico de madeira tratada com arseniato de cobre cromatado tipo C (CCA-C) da UFV. Foram avaliadas 1.313 amostras coletadas entre junho de 2025 e junho de 2026, incluindo 1.098 amostras de madeira tratada sob pressão e 215 amostras de soluções preservativas utilizadas em processos industriais de tratamento da madeira.

2.2 Avaliação da penetração do preservativo

A penetração dos ingredientes ativos na madeira foi avaliada conforme a ABNT NBR 6232:2013, utilizando o método colorimétrico baseado no reagente cromoazurol S. As amostras foram avaliadas quanto à distribuição do preservativo no plano transversal, sendo classificadas conforme os critérios normativos de conformidade.

A classificação qualitativa do ensaio de penetração (Figura 1) seguiu a comparação com os 5 níveis/graus de impregnação: o grau 1 representa a penetração ideal e uniforme em toda a extensão do alburno (coloração totalmente azul), ao passo que o grau 5 assinala a ausência de penetração do CCA (coloração completamente vermelha).



Figura 1 – Graus de penetração na madeira. Fonte: Autor

2.3 Determinação da retenção de ingredientes ativos da madeira

Concluída a etapa preliminar visual de penetração, os corpos de prova foram submetidos à separação entre cerne e alburno. A porção correspondente ao alburno foi separada com o auxílio de um formão e transferida para uma estufa de circulação de ar, permanecendo por um período mínimo de 4 horas a 103 ± 2 °C até atingir a secagem completa. Posteriormente, as amostras foram acondicionadas em um dessecador por 1 hora, visando ao resfriamento do material sem entrar em contato com a umidade do ambiente. Na sequência, determinou-se a densidade aparente de cada fragmento utilizando um medidor de densidade digital (Gehaka, modelo DSL910), seguida pela moagem e classificação granulométrica da madeira com a obtenção de serragem retida na malha de 60 mesh.

O material particulado foi então encaminhado para quantificação analítica em um Espectrômetro de Fluorescência de Raios X (XRF, modelo LAB-X5000) (Figura 2), previamente calibrado; são aferidos os teores e o balanço dos óxidos constituintes do CCA-C. Por fim, a integração entre os valores de densidade e as concentrações elementares obtidas via XRF possibilitou o cálculo analítico da retenção da madeira, gerando o laudo de conformidade técnica respaldado pelas diretrizes da norma ABNT NBR 6232 (2013) e comparados aos requisitos estabelecidos pela ABNT NBR 16143:2024.

2.2 Análise de balanceamento da solução preservativa

Após a codificação, as amostras de solução preservativa foram submetidas à determinação da temperatura, da densidade e da avaliação do aspecto visual. Para isso, utilizaram-se uma proveta graduada de 250 mL e um termodensímetro de imersão devidamente calibrado. O aspecto visual foi classificado em três categorias qualitativas, considerando o grau

de sedimentação dos sais, a turbidez e a transparência da solução, parâmetros utilizados para avaliar sua estabilidade físico-química.

Em seguida, as amostras foram analisadas por espectrometria de fluorescência de raios X (XRF), utilizando um espectrômetro modelo LAB-X5000 (Figura 2) previamente calibrado para soluções preservativas à base de arseniato de cobre cromatado (CCA-C). A técnica permitiu a quantificação dos teores de cobre (Cu), cromo (Cr) e arsênio (As), possibilitando a verificação do balanceamento da solução preservativa e sua conformidade com as especificações estabelecidas pelas normas brasileiras vigentes para o controle de qualidade de preservativos de madeira.



Figura 2 – Análise elementar da madeira e da solução preservativa em espectrômetro de fluorescência de raios X (LAB-X5000). Fonte: Autor

2.4 Análise dos resultados

Os dados foram submetidos à análise estatística descritiva, porcentagem de conformidade e análise comparativa entre categorias de uso e regiões produtoras. A avaliação da conformidade foi realizada considerando os limites mínimos de retenção definidos pela normas ABNT NBR 16143:2024 e ABNT NBR 6232:2013.

3. Resultados e discussão

O diagnóstico realizado com 1.313 análises revelou que a conformidade do tratamento preservativo com CCA-C depende não apenas da retenção final obtida na madeira, mas também da estabilidade química das soluções preservativas empregadas no processo industrial (Figura 3). Embora 63,75% das amostras de madeira tratada tenham atendido aos requisitos mínimos estabelecidos pela ABNT NBR 16143:2024, 58,74% das soluções preservativas apresentaram não conformidade, evidenciando que o controle da composição química constitui um dos principais fatores limitantes para a uniformidade do tratamento preservativo.

Figura 3 – Porcentagem das amostras de madeira e de solução preservativa em conformidade com a norma ABNT NBR 6232 (2013).

A elevada taxa de reprovação das soluções sugere a ocorrência de variações na concentração dos ingredientes ativos ao longo da operação industrial, possivelmente associadas à reposição inadequada de componentes, à homogeneização insuficiente dos tanques de tratamento ou ao consumo diferencial de cobre, cromo e arsênio durante sucessivos ciclos de impregnação. Essas variações podem comprometer a eficiência da impregnação da madeira e resultar em retenções inferiores às exigidas para cada categoria de uso.

Quando analisadas as diferentes classes de retenção em relação a norma ABNT NBR 16143:2024 (Figura 4), observou-se que madeiras destinadas a aplicações de menor severidade (exigência mínima de retenção de 4,0 kg i.a./m^3 destinados a madeiras de uso sem contato com o solo, como decks, madeiras serradas, compensados e estacas suspensas sem uso estrutural) apresentaram maiores índices de conformidade (86,88%), enquanto categorias que exigem maiores retenções de ingredientes ativos exibiram redução progressiva da aprovação. Esse comportamento evidencia que o atendimento às classes mais rigorosas representa um desafio tecnológico para a indústria de preservação, especialmente em aplicações estruturais submetidas ao contato permanente com o solo e elevada exposição biológica, em que o limite de 6,5 kg i.a./m^3 (56,57% de aprovação) aplica-se a componentes em contato direto com o solo (como mourões), e de 9,6 kg i.a./m^3 (50,42% de conformidade) para uso de postes, dormentes e uso estrutural em contato com solo.

Figura 4 – Porcentagem da quantidade de amostras de acordo com a classificação de retenção mínima.

Outro aspecto relevante refere-se à distribuição geográfica das amostras (Figura 5). A predominância de Santa Catarina, Minas Gerais e Paraná reflete a concentração dos principais polos brasileiros de preservação de madeira. A abrangência geográfica do conjunto de dados amplia a representatividade dos resultados e reforça sua aplicabilidade para programas de monitoramento da qualidade industrial e aperfeiçoamento das práticas de controle químico.

Figura 5 – Porcentagem das amostras recebidas e sua distribuição no Brasil.

Tratamentos preservativos realizados dentro dos padrões estabelecidos prolongam a vida útil da madeira, reduzem a necessidade de substituição precoce de componentes estruturais e promovem o uso mais eficiente de um recurso renovável, contribuindo para a redução da demanda por novas matérias-primas florestais e para a mitigação das emissões de carbono associadas à produção de madeira.

4. Conclusões

O diagnóstico realizado neste estudo revelou que, embora a maioria das madeiras tratadas com CCA-C apresente conformidade quanto aos requisitos mínimos de retenção estabelecidos pela ABNT NBR 16143:2024, a variabilidade observada nas soluções preservativas representa um ponto crítico para a confiabilidade dos sistemas de preservação de madeira no Brasil. A reprovação de 58,74% das soluções preservativas avaliadas evidencia limitações no controle da composição química dos preservativos, podendo comprometer a uniformidade do tratamento industrial e a durabilidade esperada dos produtos em serviço.

A predominância de aplicações destinadas a componentes em contato com o solo, como mourões, estacas rurais e elementos estruturais, demonstra a relevância estratégica do controle de qualidade para garantir desempenho e segurança em ambientes de elevada exposição biológica e ambiental.

O diagnóstico geográfico revelou que a atividade industrial de preservação de madeiras no Brasil exibe forte concentração nos estados de Santa Catarina (18%), Minas Gerais (16%) e Paraná (14%).

Os resultados evidenciam a necessidade de aprimoramento dos protocolos de monitoramento químico das soluções preservativas, associando análises elementares, rastreabilidade dos processos e controle contínuo da qualidade industrial. Este estudo fornece uma visão integrada do cenário nacional de preservação de madeiras tratadas e contribui para o desenvolvimento de sistemas mais eficientes, seguros e sustentáveis de utilização da madeira como material renovável de longa vida útil.

5. Agradecimentos

Este trabalho foi viabilizado, em parte, pela Montana Química S.A. e pela ABPM (Associação Brasileira de Preservadores de Madeira).

6. Referências bibliográficas

Associação Brasileira de Preservadores de Madeira – ABPM, 2025.

Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT. **NBR 6232: Penetração e retenção de preservativos em madeira tratada sob pressão.** Rio de Janeiro; 2013.

Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT. **NBR 16143: Preservação de madeiras – Sistemas de categoria de uso.** Rio de Janeiro; 2024.

Valle, M. L. A. et al. Retention and penetration of CCA in wood of first and second rotation of *Eucalyptus urophylla* ST Blake. 2013.

De Menezes, D.; Damineli, B. Tratamentos para preservação de madeira para construção civil: panorama atual e inovações. **Cuadernos de Educación y Desarrollo**, v. 16, n. 1, p. 966-991, 2024.

Araujo, H. J. B.; Magalhães, W. L. E.; Oliveira, L. C. Durabilidade de madeira de eucalipto citriodora (*Corymbia citriodora* (Hook.) KD Hill & LAS Johnson) tratada com CCA em ambiente amazônico. **Acta Amazônica**, v. 42, p. 49-58, 2012.

Vivian, M. A. et al. Efeito do tratamento preservante e da exposição a campo na resistência mecânica da madeira de *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus cloeziana*. **Revista de Ciências Agroveterinárias**, v. 20, n. 3, p. 241-249, 2021.

Matos, R. C.; Oliveira, H.; Fonseca, H. M. A. C.; Moaris, S.; Sharma, B.; Santos, C.; Pereira, M. L. Comparative Cr, As and CCA induced Cytostaticity in mice kidney: A contribution to assess CCA toxicity. **Environmental Toxicology and Pharmacology**, v. 73, 2020.

American Wood Protection Association. 2014 **AWPA book of standards**. P23-14 Standard for Chromated Copper Arsenate, Type C.

Kim, J.; Oh, S.; Park, Y. Overview of biochar production from preservative-treated wood with detailed analysis of biochar characteristics, heavy metals behaviors, and their ecotoxicity. **Journal of hazardous materials**, v. 384, p. 121356, 2020.

Lebow, S. T. Wood preservation. **Wood handbook: wood as an engineering material: chapter 15. Centennial ed. General technical report FPL; GTR-190. Madison, WI: US Dept. of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 2010: p. 15.1-15.28.**, v. 190, p. 15.1-15.28, 2010.

Oliveira, W. M. (2025). PIRÓLISE DE MOURÃO DE *Eucalyptus cloeziana* TRATADO COM ARSENIATO DE COBRE CROMATADO (CCA-C) (Dissertação de TCC). Universidade Federal de Viçosa.

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Durabilidade de estacas de eucalipto tratadas com CCA em ensaio de campo no nordeste paraense

Thaissa Cristina de Carvalho Mafra[1]; Carlos Andrew Pinheiro Souza[1]; Eurilane Cruz de Oliveira Correia[1]; Juliandra Evilyn Leite Nunes[1]; Mahayla Stherffanny Silva da Silva[1]; Samylly Victoria Oliveira de Araújo[1]; Saly Takeshita Yamaguti[1];

1 Universidade Federal Rural da Amazônia

Resumo: A madeira em contato com o solo exige alta durabilidade natural, nem sempre presente, tornando necessário o tratamento preservante. Desta forma, o objetivo deste estudo foi avaliar a durabilidade das estacas do clone comercial de *Eucalyptus* I144 tratadas com CCA-C (arseniato de cobre cromatado) em campo. Assim, foram comparadas estacas não tratadas, tratadas com CCA e tratadas com CCA sem secagem prévia. O ensaio de campo foi conduzido em Paragominas/PA com madeira roliça de rebrota tratada em autoclave pelo processo de célula vazia. A avaliação ocorreu após 19 meses, considerando o índice de deterioração e a presença de fungos e cupins. As estacas não tratadas apresentaram deterioração total ou ataque intenso de organismos xilófagos. Em contraste, as estacas tratadas permaneceram sadias. As estacas que foram tratadas sem secagem prévia também se mantiveram íntegras, com exceção de duas peças com fungo manchador. Os resultados evidenciaram a eficiência do tratamento preservante em condições amazônicas.

Palavras-chave: *Preservação da madeira; Deterioração da madeira; Térmitas.*

Durability of CCA-treated eucalyptus stakes in a field test in southeastern Pará

Abstract: Wood in ground contact requires high natural durability, which is not always present, making preservative treatment necessary. Thus, the objective of this study was to evaluate the durability of fencing stakes from the commercial clone *Eucalyptus* I144 treated with CCA-C (chromated copper arsenate) under field conditions. Untreated stakes, CCA-treated stakes, and CCA-treated stakes without prior drying were compared. The field test was conducted in Paragominas, Pará, Brazil, using coppiced roundwood treated in an autoclave by the empty-cell process. Evaluation was performed after 19 months, considering the deterioration index and the presence of fungi and termites. Untreated stakes showed total degradation or severe attack by xylophagous organisms. In contrast, reated stakes remained intact and sound. Stakes treated without prior drying also remained intact, except for two that showed signs of staining fungi. The results demonstrate the effectiveness of preservative treatment under Amazonian conditions.

Keywords: *Wood preservation; Wood deterioration; Termites.*

1. Introdução

O Brasil possui 8,1 milhões de hectares de área de eucalipto destinado para os setores como celulose, energia, construção, entre outros, e o estado do Pará a cada ano vem aumentando sua participação ocupando, atualmente, 171 mil de hectares dessas áreas plantadas (IBÁ, 2025). Este gênero de rápido crescimento é uma ótima alternativa para diminuição da pressão contra madeiras nativas, tendo o eucalipto tratado com produtos preservativos um segmento de grande potencial (ARAÚJO et al., 2012).

Paragominas foi um dos principais polos de produção de madeira da Amazônia a partir da década de 1980 (Valdiones et al., 2022). Na atualidade, o município vive uma profunda transição produtiva, na qual as atividades do agronegócio suplantaram a exploração madeireira nativa, com destaque para soja e pecuária (Silva et al., 2022). Paralelamente, o avanço nas áreas de floresta plantada aliada à alta demanda do setor rural abre caminho para o segmento de madeira tratada, que, embora seja amplamente difundido nas regiões Sudeste e Sul do Brasil, apresenta grande potencial de expansão na região Amazônica.

O tratamento preservativo da madeira de eucalipto é considerado uma etapa fundamental para garantir maior resistência aos agentes deterioradores e aumentar a durabilidade. Além disso, permite ampliar a utilização em diferentes aplicações, assegurando melhor desempenho estrutural e maior vida útil das peças, especialmente em ambientes com condições favoráveis ao desenvolvimento de organismos xilófagos (LOPES et al., 2017). Dentre os produtos utilizados no Brasil para tratar madeira, o Arseniato de Cobre Cromatado (CCA) ainda destaca-se por ser um produto que é eficiente contra organismos xilófagos como fungos, insetos e xilófagos marinhos (VALLE et al., 2013; VIDAL et al, 2015).

Por outro lado, a crescente utilização de estacas de eucalipto em sistemas rurais, cercamentos e estruturas agrícolas na região amazônica torna fundamental compreender a eficiência dos tratamentos preservativos aplicados a esse material. Diante disso, o objetivo do trabalho foi avaliar estacas do clone comercial de *Eucalyptus* I144 tratadas com CCA-C (arseniato de cobre cromatado) em comparação a estacas não tratadas e estacas que não passaram por secagem prévia.

2. Material e métodos

O experimento foi conduzido no município de Paragominas/PA, localizado no nordeste paraense. O clima do município é do tipo mesotérmico e úmido, temperatura média anual é de aproximadamente 26°C, com temperaturas máximas média em torno de 32°C, e mínima de aproximadamente 22°C. A umidade relativa do ar se mantém elevada ao longo do ano, com média de 80% e 90%. O período chuvoso ocorre de dezembro à maio enquanto o período seco de junho à novembro (INMET, 2020).

A espécie utilizada foi o clone comercial de *Eucalyptus* I144, oriundo de rebrota, com idade aproximada de seis anos e estacas com dimensões médias de 2,41 m de comprimento e 11,92 cm de diâmetro, divididas em três tratamentos, de acordo com a Tabela 1. Cada tratamento foi composto por cinco unidades de madeira roliça. Os tratamentos T2 e T3 foram tratadas em autoclave, pelo processo de célula vazia, com 60 minutos de vácuo inicial e 70 minutos de pressão. O produto preservante utilizado foi o CCA-C (arseniato de cobre cromatado) com concentração da solução de 1,7% e retenção mínima de 7 kg I.A..m^{-3}, de acordo com ao NBR16143.

Tabela 1 – Estacas avaliadas no ensaio de campo

Tratamentos	Identificação	Descrição
Tratamento 1	T1	Estacas sem produto preservante
Tratamento 2	T2	Estacas tratadas com CCA com secagem prévia
Tratamento 3	T3	Estacas tratadas com CCA sem secagem prévia

Fonte: Autores (2026)

Como limitação do estudo, as estacas utilizadas nos tratamentos foram fornecidas, na forma de doação, por uma empresa local. O teor de umidade das peças não foi determinado previamente à instalação do experimento, em virtude da indisponibilidade de equipamento para essa mensuração. Essa condição representa uma característica do material empregado e reflete a realidade operacional de pequenas empresas do setor madeireiro regional, com as quais este estudo busca promover a aproximação entre pesquisa científica e setor produtivo, incentivando a adoção de tecnologias e o desenvolvimento de soluções aplicadas.

As estacas foram instaladas verticalmente no solo, em covas com profundidade de 70 cm, mantendo-se um espaçamento de 150 cm entre estacas e dispostas de forma aleatória (Figura 1). O ensaio de campo foi instalado em junho/2024, permanecendo em campo por um período de 19 meses. A área experimental foi mantida em condições naturais, sujeita às variações climáticas locais, incluindo o período chuvoso.



Figura 1 – Organização das estacas no ensaio de campo.
Fonte: Autores (2026)

Mensalmente as estacas foram monitoradas e após 12 meses de exposição foi realizada uma avaliação de desempenho das estacas de forma visual para verificar a sanidade das peças e a presença de organismos xilófagos. Após 19 meses foi realizada nova avaliação seguindo a classificação do índice de deterioração sugerida por Lepage (1970), com uma escala que varia 0 a 4 levando em consideração a sanidade das estacas e presença de ataque de cupins e fungos (Tabela 2).

Tabela 2 - Classificação do índice de deterioração da madeira

Estado de sanidade	Nota
Sadio, nenhum ataque	0
Ataque leve ou superficial de fungos e térmitas	1
Ataque evidente, mas moderado de fungos e térmitas	2
Apodrecimento intenso ou ataque intenso de térmitas	3
Quebra, perda quase total de resistência	4

Fonte: Lepage (1970)

As notas da tabela acima foram atribuídas para cada estaca nas seguintes posições: acima do solo, zona de afloramento e abaixo do solo. Estas posições seguiram orientações presentes no trabalho de Araújo; Magalhães & Oliveira (2012).

3. Resultados e discussão

As estacas pertencentes ao tratamento T1 foram as que apresentaram maior nível de deterioração. Os primeiros sinais da ação dos agentes xilófagos foram observados no terceiro mês após a implantação do ensaio de campo, nas estacas sem tratamento (T1), sendo observados

a ação de cupim subterrâneo (Figura 2a). Fato ocorrido no período de estiagem em Paragominas, onde, no geral, os meses de julho a outubro não há incidência de chuvas na região (INMET, 2026), tornando as estacas atrativas para os cupins.

No período chuvoso, intensificado principalmente nos meses de janeiro a abril, onde a chuva acumulada pode atingir uma média mensal de 388,07 mm e a umidade relativa média fica acima de 90% (INMET, 2026), foi possível observar a presença de fungos manchadores bem evidentes após o décimo mês em campo (Figura 2b).



Figura 2 – Presença de cupim subterrâneo (a) e fungo manchador (b) em estacas sem tratamento.
Fonte: Autores (2026)

Ensaios de deterioração conduzidos em condições semelhantes demonstram que a madeira exposta diretamente ao solo tende a apresentar redução progressiva de resistência quando não recebe proteção preservativa adequada (ROMANINI et al., 2014; MELO et al., 2010). Esse padrão foi claramente observado no presente estudo.

Após 12 meses, todas as estacas sem tratamento preservante apresentaram sinais de ação de térmitas, fungos manchadores e apodrecedores. As estacas dos tratamentos T2 e T3 estavam todas sadias. No 19° mês de exposição, três estacas sem tratamento perderam totalmente a resistência mecânica, resultando em queda (Figura 3b), onde uma estaca caiu espontaneamente, enquanto as outras duas, após leve pressão aplicada, também se romperam. A partir deste momento foi realizada a classificação do índice de deterioração.



Figura 3 – (a) Área do experimento durante o período chuvoso tomada pela vegetação; (b) Situação da estaca logo após queda.
Fonte: Autores (2026)

A figura abaixo avalia o índice de deterioração nos 3 tipos de tratamento, abrangendo todas as estacas do experimento, a avaliação foi realizada em 3 partes das estacas: a parte acima do solo, em contato com o solo e abaixo do solo, avaliando cada parte com uma pontuação que varia de 0 a 4.

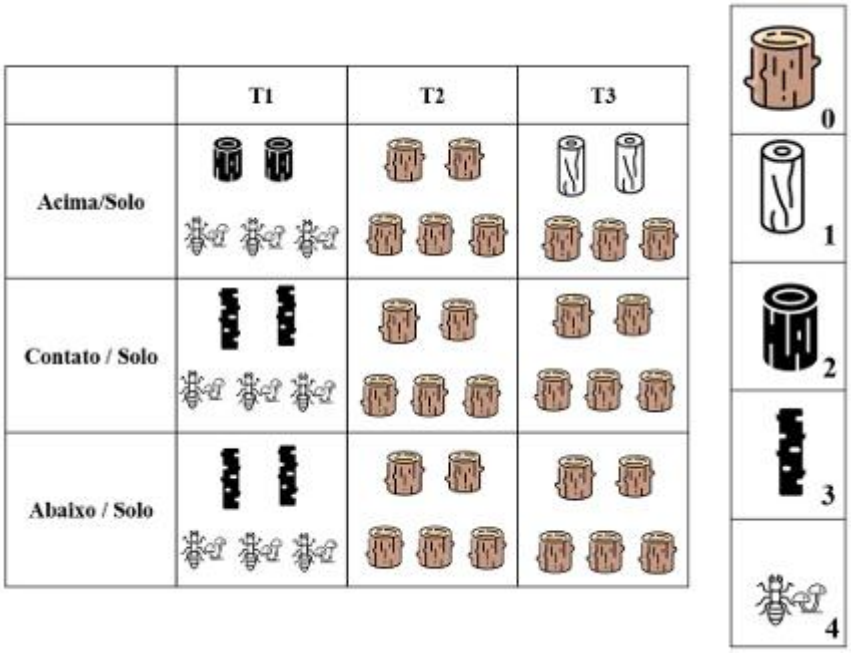


Figura 4 – Quantidade de estacas de acordo com a nota (0-4) obtida na avaliação de qualidade.
Fonte: Autores (2026)

Os resultados demostram que as peças que não passaram por nenhum tipo de processo de aplicação de produtos preservativos sofreram danos consideráveis, principalmente nas partes

em contato e abaixo do solo. As peças do tratamento T2 não apresentaram danos e do T3, duas estacas apresentaram ataque superficial de fungos na partir acima do solo, indicando possível variação na eficiência da impregnação do preservativo. As estacas T1 restantes apresentaram ataque intenso de térmitas na porção enterrada, evidenciando elevado nível de deterioração da madeira nesta região (Figura 4).



Figura 5 – a) Área experimental após a queda das estacas sem tratamento preservativo (destaque em amarelo sinaliza a posição das estacas que caíram; b) Detalhe do ataque intenso de térmitas na porção enterrada da estaca.
Fonte: Autores (2026)

No estudo de Araújo, Magalhães & Oliveira (2012) em ambiente amazônico, observou que após 16 meses de exposição em campo, estacas de *Corymbia citriodora* apresentaram intensamente atacadas e presença evidente de fungos com corpos de frutificação. Já Romanini et al. (2014), ao avaliarem espécies amazônicas em ensaios de campo, observaram redução progressiva da durabilidade natural quando a madeira foi mantida em contato com o solo sob condições tropicais. Desta mesma forma, Melo et al. (2010) verificaram perda significativa de desempenho estrutural em espécies florestais não tratadas submetidas a exposição prolongada em campo. Os resultados obtidos nesse estudo seguem esta mesma tendência, confirmando assim que a durabilidade natural do clone I144 é insuficiente para uso direto no solo sem tratamento preservativo.

Por outro lado, Montagna et al (2025), ao utilizar moirões estacas para cerca do híbrido de *Eucalyptus urophylla* de uma árvore de 34 anos, apresentou uma vida média em campo superior a 11 anos, utilizando madeira do cerne e sem tratamento. Esta informação

demonstra a necessidade de tratamento preservantes em espécies de rápido crescimento, no entanto em árvores mais velhas, as mesmas podem ter a durabilidade natural semelhante às espécies nativas.

Sobre as duas estacas com sinais de fungo, favorecido pelo ambiente propício (Figura 3a), pertencem ao tratamento T3 que não passaram por uma secagem prévia, e tal comportamento pode estar diretamente relacionado à adequada retenção do preservativo na madeira, de acordo com que é estabelecido pela ABNT NBR 9480 (ABNT, 2009). Nesta situação, o teor de umidade pode ter afetado na concentração do produto preservante e consequentemente na retenção mínima desejada.

Estudos sobre tratabilidade da madeira de *Eucalyptus* indicam que a eficiência do tratamento preservativo depende da capacidade de impregnação e da uniformidade de distribuição do produto na estrutura lenhosa (LOPES et al., 2017). Desta forma, o bom desempenho observado no tratamento T2 está coerente com o que a literatura técnica descreve sobre o comportamento da madeira devidamente tratada.

No tratamento industrial em autoclave, é recomendado que a madeira passe por uma secagem prévia até atingir teor de umidade próximo ou inferior ao ponto de saturação das fibras (PSF), situado em torno de 30%, quando a água livre já foi removida das cavidades celulares (KOLLMANN; CÔTÉ, 1968; OLIVEIRA et al., 2010). Abaixo desse limite, a penetração do preservativo ocorre de uma forma mais eficiente.

Estudos demonstram que o teor de umidade influencia diretamente a retenção e a distribuição do preservativo na madeira, podendo comprometer a eficiência do tratamento quando o material apresenta elevada umidade no momento da impregnação (LOPES et al., 2017).

Esse aspecto técnico ajuda a entender e explicar o desempenho ligeiramente inferior das estacas do tratamento T3 em comparação ao T2, no qual houve uma secagem prévia antes da impregnação. Ainda assim, mesmo com a possível redução na eficiência de retenção, o tratamento preservativo promoveu aumento da durabilidade quando comparado às estacas sem tratamento, demonstrando que a aplicação do CCA, mesmo sob condições menos ideais de preparo, ainda representa importante medida de proteção para uso em contato com o solo.

4. Conclusões

Todas as estacas do clone comercial de eucalipto I144 in natura (sem tratamento) apresentaram perda total ou ataque intenso de térmitas e fungos após 19 meses de exposição em ensaio de campo, onde a incidência de térmita foi observada inicialmente após o terceiro mês de campo.

Em contrapartida, todas as estacas que passaram por secagem prévia e tratadas com CCA permaneceram íntegras e visualmente sadias durante o período avaliado, demonstrando maior resistência à deterioração biológica. Estacas que foram tratadas com CCA sem secagem prévia também estavam íntegras, com a exceção de duas estacas que apresentaram sinais de ação de fungo manchador.

5. Referências bibliográficas

Araújo, H. J. B., Magalhães, W. L. E., & Oliveira, L. C. de. (2012). Durabilidade de madeira de eucalipto citriodora (*Corymbia citriodora* (Hook.) K.D. Hill & L.A.S. Johnson) tratada com CCA em ambiente amazônico. *Acta Amazonica, 42*(1), 49–58. https://doi.org/10.1590/S0044-59672012000100006

Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2009). *ABNT NBR 9480: Peças roliças preservadas de eucalipto para construções rurais — Requisitos*. ABNT.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2013). *ABNT NBR 16143: Preservação de madeiras — Sistema de categorias de uso*. ABNT.

Correia-Silva, D. C., Costa, E. M. da, Santos, I. M. dos, Silva, J. M. L., Braga, M. de B., Fernandes, R. da S., & Souza Junior, G. N. de. (2022). Forecasting productive trajectory with a focus on agribusiness: A case study in the municipality of Paragominas–Pará. In *Open Science Research IX* (Vol. 9, pp. 632–643). Editora Científica Digital. https://doi.org/10.37885/221211340.

Indústria Brasileira de Árvores. (2025). *Relatório anual 2025*. IBÁ.

Instituto Nacional de Meteorologia. (2026). *Dados meteorológicos da estação de Paragominas (PA)*. Recuperado em 13 de julho de 2026, de https://tempo.inmet.gov.br/Graficos/A001

Kollmann, F. F. P., & Côté, W. A. (1968). *Principles of wood science and technology*. Springer-Verlag.

Lepage, E. S. (1970). Método sugerido pela IUFRO para ensaios de campo com estacas de madeira. *Preservação de Madeiras, 1*(4), 205–216.

Lopes, D. J. V., Paes, J. B., Jankowsky, I. P., Segundinho, P. G. de A., & Vidaurre, G. B. (2017). Influências do diâmetro e umidade da madeira na qualidade do tratamento preservativo. *Floresta e Ambiente, 24,* e20160207. https://doi.org/10.1590/2179-8087.020716

Melo, R. R. de, Stangerlin, D. M., Santini, E. J., Haselein, C. R., Gatto, D. A., & Susin, F. (2010). Durabilidade natural da madeira de três espécies florestais em ensaios de campo. *Ciência Florestal, 20*(2), 357–365. https://doi.org/10.5902/198050981858

Montagna, R. G., Freitas, J. A. de, Freire Neto, A. O. da L., Fioruci, W. J., Bucci, L. A., Ranzini, M., Lima, I. L. de, & Longui, E. L. (2025). Natural durability of wood for fifteen *Eucalyptus* and two *Corymbia* species in contact with the soil. *Maderas. Ciencia y Tecnología, 27*, 44. https://doi.org/10.22320/s0718221x/2025.44

Oliveira, J. T. S., Fiedler, N. C., & Nogueira, M. (2010). *Tecnologia da madeira: Propriedades e aplicações* (2ª ed.). UFV.

Romanini, A., Stangerlin, D. M., Pariz, E., Souza, A. P. de, Gatto, D. A., & Calegari, L. (2014). Durabilidade natural da madeira de quatro espécies amazônicas em ensaios de deterioração de campo. *Nativa, 2*(1), 13–21. https://doi.org/10.31413/nativa.v2i1.1309

Valdiones, A. P., Cardoso, B., Damasceno, C., Roury, C. G., Souza Jr., C., Cardoso, D., Meirelles, F., Costa, J. N., Ribeiro, J., Sobral, L. M., Lentini, M. W., Andrade, M. B. T., Pacheco, P., Morgado, R. P., Carvalho, T., & Silgueiro, V. (2022). *A evolução do setor madeireiro na Amazônia entre 1980 e 2020 e as oportunidades para seu desenvolvimento inclusivo e sustentável na próxima década*. Imazon, Imaflora, ICV & Idesam. https://imazon.org.br/wp-content/uploads/2022/06/Evolucao-do-Setor-Madeireiro-na-Amazonia-de-1980-a-2020.pdf

Valle, M. L. A., Silva, J. C., Della Lucia, R. M., & Evangelista, W. V. (2013). Retenção e penetração de CCA em madeira de primeira e segunda rotação de *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake. *Ciência Florestal, 23*(2), 481–490.

Vidal, J. M., Evangelista, W. V., Silva, J. C., & Jankowsky, I. P. (2015). Preservação de madeiras no Brasil: Histórico, cenário atual e tendências. *Ciência Florestal, 25*(1), 257–271. https://doi.org/10.1590/1980-509820152505257

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Efeito da modificação térmica nas propriedades mecânicas de madeiras de *Eucalyptus* sp. e *Pinus* sp. submetidas a diferentes temperaturas

Nathália Gabriele Franca Dias Polido[1]; Gilson Mendonça de Miranda Júnior[2]; Náthali dos Santos Toniatto Alves[1]; Henzza Ferreira Rocha[1]; Davi Rogério Guimarães [1]; Daniele Ingrid Moreira Damásio[1]; Maria Eduarda Meira Pratti[1]; Rejane Costa Alves[1]

[1] Universidade Federal do Espírito Santo 01
[2] Universidade Federal de Pernambuco 02

Resumo: A modificação térmica é uma técnica utilizada para melhorar propriedades da madeira, como estabilidade dimensional e resistência biológica, podendo, no entanto, alterar suas propriedades mecânicas. Neste estudo, madeiras de *Eucalyptus* sp. e *Pinus* sp. foram submetidas a tratamento térmico nas temperaturas de 180 °C e 240 °C e avaliadas quanto ao módulo de elasticidade (MOE), módulo de ruptura (MOR) e resistência à compressão paralela às fibras (fc0), conforme a norma ABNT NBR 7190 (2022). O tratamento térmico reduziu progressivamente o MOE e o MOR de ambas as espécies, com diferenças significativas apenas a 240 °C, enquanto a fc0 não apresentou diferenças significativas entre os tratamentos. O *Eucalyptus* sp. mostrou-se mais sensível ao tratamento na maioria das propriedades avaliadas, sendo a temperatura de 240 °C a que promoveu as maiores alterações nas propriedades mecânicas.

Palavras-chave: Flexão estática; Compressão paralela; Tratamento térmico; Folhosa e conífera

Thermal modification effect on mechanical properties of eucalyptus and pine wood

Abstract: Thermal modification is a technique used to improve wood properties, such as dimensional stability and biological resistance, but it can alter the material's mechanical properties. In this study, Eucalyptus sp. and Pinus sp. wood samples were subjected to heat treatment at temperatures of 180 °C and 240 °C and evaluated for modulus of elasticity (MOE), modulus of rupture (MOR), and compressive strength parallel to the grain (fc0), in accordance with ABNT NBR 7190 (2022). Thermal treatment progressively reduced the MOE and MOR of both species, with significant differences observed only at 240 °C, while fc0 showed no significant differences among treatments. Eucalyptus sp. proved more sensitive to treatment for most of the evaluated properties, with 240 °C being the temperature that promoted the greatest changes in mechanical properties.

Keywords: Static bending; Parallel compression; Heat treatment; Hardwood and softwood

1. Introdução

O setor florestal brasileiro ocupa posição de destaque no cenário mundial, impulsionado principalmente pelo cultivo de espécies de rápido crescimento, como *Eucalyptus* spp. e *Pinus* spp., que juntas representam mais de 90% das florestas plantadas no país, destacando-se pela adaptabilidade a diferentes condições climáticas e pela alta produtividade (IBÁ, 2025). Esse modelo produtivo tem sido fundamental para atender à crescente demanda por produtos florestais, reduzindo simultaneamente a pressão sobre ecossistemas nativos (Santana et al., 2021).

Apesar das vantagens relacionadas ao uso da madeira, existem desafios quanto à sua durabilidade e vida útil, uma vez que, por ser um material orgânico, está sujeita a fatores que podem comprometer sua integridade ao longo do tempo (Martín & López, 2023). Esses desafios têm impulsionado o estudo de novas técnicas capazes de melhorar as propriedades da madeira, principalmente as de rápido crescimento, reduzindo a dependência de espécies nativas (Yue et al., 2023) . Dentre essas técnicas, destaca-se a modificação térmica, sendo utilizado atualmente para melhoria das propriedades físicas, mecânicas a estéticas da madeira (Jančíková & Jablonský, 2025).

O processo de modificação térmica promove alterações na composição química da madeira, com degradação e rearranjo dos principais constituintes da parede celular, resultando em mudanças em propriedades como cor, estabilidade dimensional, higroscopicidade e resistência à biodeterioração (Laudares et al., 2023). No entanto, essas mesmas alterações químicas podem impactar negativamente as propriedades mecânicas da madeira, aspecto que ainda carece de maior aprofundamento científico, especialmente para espécies de ampla utilização no Brasil (Barreiros et al., 2022; Batista, 2019). Nesse contexto, o presente trabalho teve como objetivo avaliar o efeito da modificação térmica a 180 °C e 240 °C sobre as propriedades mecânicas de madeiras de *Eucalyptus* sp. e *Pinus* sp.

2. Material e métodos

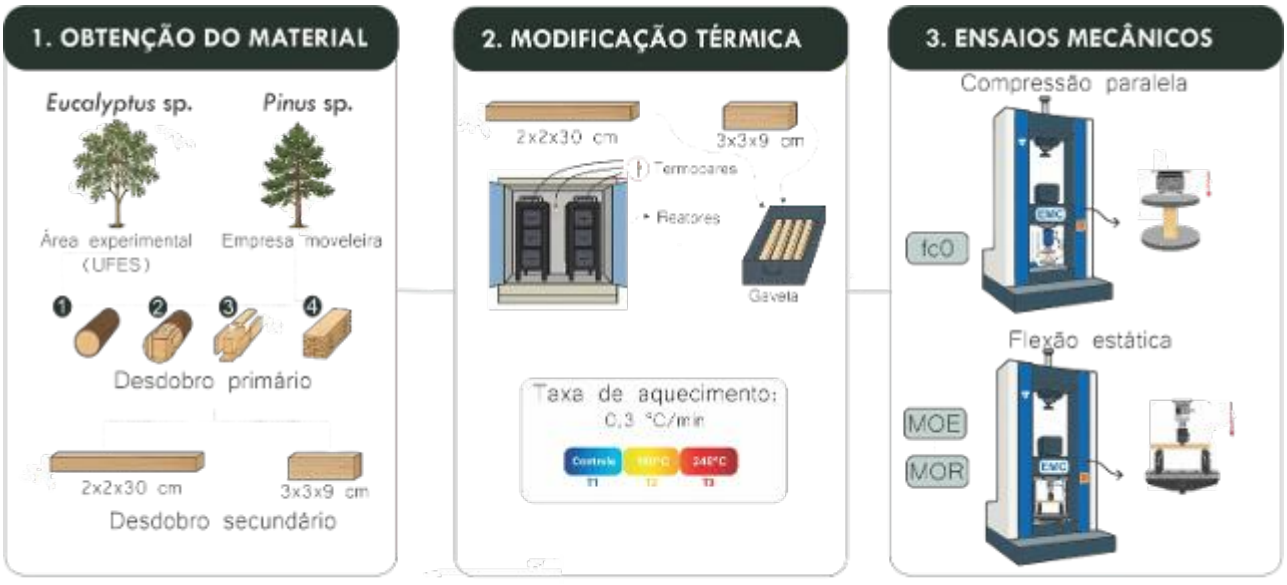
As toras de madeira da espécie *Eucalyptus* sp. foram obtidas através de doação da Área Experimental da Universidade Federal do Espírito Santo (UFES), localizada no município de Jerônimo Monteiro – ES, enquanto as tábuas de *Pinus* sp. foram provenientes de doação de uma empresa do setor moveleiro. O material não foi identificado em nível de espécie. *Eucalyptus* sp. apresentou densidade aparente média de 650,4 kg m^{-3}, e *Pinus* sp., segundo informado pela empresa doadora, tratava-se de um lote de densidade superior à comumente observada para o

gênero, apresentando densidade aparente média de 708,7 kg m^{-3}, ambas referentes ao tratamento controle.

Os corpos de prova foram confeccionados na marcenaria do Departamento de Ciências Florestais e da Madeira (DCFM), conforme a norma da ABNT 7190 (2022), para os ensaios mecânicos de flexão estática e compressão paralela. Após a confecção, os corpos de prova foram submetidos ao processo de modificação térmica, em uma estufa de circulação mecânica, equipada com dois reatores, sendo o processo conduzido a uma taxa de aquecimento de 0,3 °C/min. Os reatores e a estufa foram equipados com termopares e um data logger, com objetivo de aferir as temperaturas de interesse em tempo real. As temperaturas aplicadas foram: controle (sem tratamento), 180 °C e 240 °C. Foram utilizados 8 corpos de prova por espécie e tratamento, totalizando 24 corpos de prova por espécie. O processo de modificação térmica ocorreu em atmosfera de ar, em estufa de circulação mecânica. Ao atingir a temperatura final estabelecida, esta foi mantida constante por 2 horas, período em que ocorreu efetivamente o processo de modificação térmica.

Os ensaios mecânicos de flexão estática e compressão paralela às fibras foram realizados conforme a norma ABNT 7190 (2022) na máquina universal de ensaios EMIC (modelo DL 10000). Os resultados foram submetidos à ANOVA e ao teste de Tukey (95% de probabilidade). O esquema metodológico completo está ilustrado na Figura 1.

Figura 1 – Esquema metodológico do estudo: obtenção do material de *Eucalyptus* sp. e *Pinus* sp., modificação térmica (controle, 180 °C e 240 °C) e ensaios mecânicos de compressão paralela (fc0) e flexão estática (MOE e MOR).



3. Resultados e discussão

Os valores médios de módulo de elasticidade (MOE), módulo de ruptura (MOR) e resistência à compressão paralela às fibras (fc0) das madeiras de *Eucalyptus* sp. e *Pinus* sp. submetidas aos diferentes tratamentos térmicos são mostrados na Tabela 1. Ambas as espécies apresentaram diferença entre as médias de MOE e MOR nos tratamentos controle e 240 °C, conforme o teste de Tukey. As médias de fc0, no entanto, não diferiram entre os tratamentos para nenhuma das espécies.

Tabela 1 –Valores médios de MOE, MOR e resistência à compressão paralela às fibras (fc0) em MPa para *Eucalyptus* sp. e *Pinus* sp. submetidas à modificação térmica.

Tratamento	***Eucalyptus* sp. MOE**	***Eucalyptus* sp. MOR**	***Eucalyptus* sp. fc0**	***Pinus* sp. MOE**	***Pinus* sp. MOR**	***Pinus* sp. fc0**
Controle	10866 A ±1310	98,32 A ±9,75	56,65 A ±1,55	13044 A ±650	125,53 A ±11,75	56,08 A ±5,90
180 °C	9839 A ±920	105,06 A ±14,18	57,23 A ±5,78	12467 AB ±1342	108,41 B ±13,89	63,07 A ±6,01
240 °C	7056 B ±1056	27,72 B ±1,78	50,24 A ±4,83	10108 B ±539	81,00 C ±8,64	56,84 A ±4,31

Médias seguidas pela mesma letra na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$). MOE e MOR: flexão estática; fc0: compressão paralela às fibras. O asterisco (*) representa o desvio padrão.

Em relação as médias de MOE, observou-se um comportamento de redução gradual com o aumento da temperatura para as duas espécies estudadas. Em ambas, houve redução significativa apenas na maior temperatura estudada em relação ao controle, sendo de 35% para *Eucalyptus* sp. e 22,51% para *Pinus* sp. A maior redução em *Eucalyptus* sp. está associada à composição estrutural característica das folhosas, nas quais predominam as xilanas (15-35% do peso seco) (Ramos et al., 2008). Por apresentarem estrutura amorfa e ramificada, esses polissacarídeos são mais suscetíveis à hidrólise térmica (Boaes, 2022), o que confere às xilanas de folhosas uma menor estabilidade térmica em comparação às demais hemiceluloses (Bächle et al., 2010; Výbohová & Geffertová, 2020). Em contrapartida, a menor susceptibilidade do *Pinus* sp. pode ser atribuída à composição estrutural característica das coníferas, que possuem lignina distinta, maior teor de resinas e predominância de galactomananas, hemiceluloses com ligações mais resistentes à degradação, conferindo maior estabilidade térmica à parede celular (de Medeiros Neto et al., 2024; Gallio et al., 2019). De modo geral, esse comportamento de redução está associado à degradação parcial das hemiceluloses e da celulose da parede celular pela ação

do calor, que se intensifica com o aumento da temperatura, resultando em menor rigidez (Hodžić & Bahmani, 2023).

As propriedades de resistência (MOR e fc0) responderam de forma distinta ao tratamento térmico, sendo o MOR a propriedade mais afetada para as duas espécies. Para *Eucalyptus* sp., observou-se redução significativa apenas a 240 °C, não havendo diferença estatística entre o controle e o tratamento a 180 °C.

Para *Pinus* sp., os três tratamentos diferiram entre si, com redução de 13,64% a 180 °C e de 35,5% a 240 °C em relação ao controle. O resultado confirma os achados de Hodžić & Bahmani (2023), que afirmam que a degradação das hemiceluloses ocorre em temperaturas mais baixas, fator amplamente associado à perda de resistência mecânica em madeiras termicamente modificadas, enquanto o MOE permanece relativamente menos afetado devido à maior estabilidade da celulose cristalina nessa faixa de temperatura. Paula (2021) destaca que os resultados sobre o efeito da temperatura nas propriedades mecânicas da madeira podem ser contraditórios entre espécies e propriedades, o que reforça que a resposta térmica não segue um padrão único e pode variar mesmo dentro da mesma espécie. O comportamento mais estável da fc0 pode ser atribuído ao aumento das regiões cristalinas da celulose e à reticulação da lignina, que juntos limitam o movimento das microfibrilas sob compressão paralela às fibras, mantendo a resistência nessa direção (Bayani et al., 2019; Boonstra & Tjeerdsma, 2006).

De forma geral, o *Eucalyptus* sp. mostrou-se mais sensível ao tratamento térmico do que o *Pinus* sp. na maior parte das propriedades avaliadas, especialmente no MOR a 240 °C, onde a redução foi aproximadamente o dobro da observada para o *Pinus* sp na mesma temperatura. Essa diferença corrobora a maior estabilidade térmica das coníferas em relação às folhosas, atribuída às particularidades de sua composição química, especialmente o tipo de hemiceluloses e o teor de lignina (Bächle et al., 2010; Hasanagić et al., 2021).

4. Conclusões

Os resultados indicam que a modificação térmica afetou de forma diferenciada as propriedades mecânicas das madeiras de Eucalyptus sp. e Pinus sp., reduzindo progressivamente o MOE e o MOR de ambas as espécies, especialmente na temperatura mais severa avaliada, enquanto a resistência à compressão paralela às fibras (fc0) manteve-se estável em todos os tratamentos.

De modo geral, o Pinus sp. demonstrou maior estabilidade mecânica frente ao tratamento térmico do que o Eucalyptus sp., sendo a espécie mais indicada quando a manutenção de resistência e rigidez é prioritária. Quanto à temperatura, 180 °C mostrou-se a

condição mais equilibrada para ambas as espécies, promovendo os benefícios já conhecidos da modificação térmica sem as perdas mecânicas mais acentuadas observadas a 240 °C, especialmente no MOR do Eucalyptus sp.

Do ponto de vista prático, esses resultados indicam que a madeira modificada termicamente a 180 °C mantém desempenho mecânico compatível com aplicações estruturais menos exigentes, enquanto o tratamento a 240 °C deve ser reservado a usos em que a estabilidade dimensional e a resistência biológica sejam prioritárias em detrimento da resistência mecânica, sobretudo no caso do Eucalyptus sp.

Recomenda-se, para trabalhos futuros, a identificação botânica em nível de espécie e a determinação da densidade básica, de modo a permitir comparações mais precisas entre materiais de composição química e anatômica conhecidas. Sugere-se também ampliar o gradiente de temperaturas avaliadas, incluindo pontos intermediários entre 180 °C e 240 °C, de modo a caracterizar de forma mais contínua a resposta mecânica ao tratamento térmico. Por fim, a associação entre a perda de massa e a caracterização química imediata (teores de lignina, extrativos e holocelulose) com a redução das propriedades mecânicas permitiria estabelecer relações quantitativas entre a intensidade da degradação química e o desempenho mecânico da madeira, hoje apenas discutidas com base na literatura.

5. Agradecimentos

Os autores agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), à Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação do Espírito Santo (FAPES) e à Universidade Federal do Espírito Santo (UFES) pelo apoio à realização desta pesquisa.

6. Referências bibliográficas

Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2022). *NBR 7190: Projeto de estruturas de madeira*. ABNT.

Bächle, H., Zimmer, B., Windeisen, E., & Wegener, G. (2010). Evaluation of thermally modified beech and spruce wood and their properties by FT-NIR spectroscopy. *Wood Science and Technology*, *44*(3), 421–433. https://doi.org/10.1007/s00226-010-0361-3

Barreiros, R. M., Lisboa, F. D., Gouvêa, C. F., Roque, V. G. R., Dias, K. B., Reis, A. M. F., Silva, G. C., & Godinho, E. Z. (2022). EFEITOS DA TERMORRETIFICAÇÃO DA MADEIRA EM CLONES DE EUCALIPTO. Em *Open Science Research IX* (p. 1441–1455). Editora Científica Digital. https://doi.org/10.37885/221211263

Batista, D. C. (2019). Thermal treatment, heat treatment or thermal modification? *Ciencia Florestal*, *29*(1), 467–484. https://doi.org/10.5902/1980509822577

Bayani, S., Taghiyari, H. R., & Papadopoulos, A. N. (2019). Physical and Mechanical Properties of Thermally-Modified Beech Wood Impregnated with Silver Nano-Suspension and Their Relationship with the Crystallinity of Cellulose. *Polymers*, *11*(10), 1538. https://doi.org/10.3390/polym11101538

Boaes, T. da S. (2022). *Aprimoramento da obtenção do hidrolisado hemicelulósico a partir da mistura do bagaço e palha de cana-de-açúcar visando a produção de xilitol* (M. das G. de A. Felipe, Org.).

Boonstra, M. J., & Tjeerdsma, B. (2006). Chemical analysis of heat treated softwoods. *Holz als Roh - und Werkstoff*, *64*(3), 204–211. https://doi.org/10.1007/s00107-005-0078-4

de Medeiros Neto, P. N., Pinto, J. de A., Brito, F. M. S., Paes, J. B., Ferreira, G., & Correia, N. P. C. M. (2024). Resistência biológica e agentes deterioradores da madeira. Em *https://editoralicuri.com.br/index.php/ojs/article/view/525* (p. 73–89). Editora Licuri. https://doi.org/10.58203/Licuri.22716

Gallio, E., Zanatta, P., Cruz, N. D., Zanol, G. S., Schulz, H. R., & Gatto, D. A. (2019). Influence of thermal rectification and furfurylation treatments on technological properties of a conifer. *Revista Materia*, *24*(3). https://doi.org/10.1590/s1517-707620190003.0739

Hasanagić, R., Ganguly, S., Bajramović, E., & Hasanagić, A. (2021). Mechanical properties changes in fir wood (abies sp.), linden wood (tilia sp.), and beech wood (fagus sp.) subjected to various thermal modification process conditions. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, *1208*(1), 012025. https://doi.org/10.1088/1757-899X/1208/1/012025

Hodžić, A., & Bahmani, M. (2023). Physical and mechanical changes in thermal modified wood: A review. *Zastita Materijala*, *64*(3), 314–326. https://doi.org/10.5937/zasmat2303314H

IBÁ. (2025). *Relatório Anual Ibá 2025*. https://iba.org/wp-content/uploads/2025/10/IBA_relatorio_digital_POR.pdf

Jančíková, V., & Jablonský, M. (2025). Thermal Modification of Wood—A Review. *Sustainable Chemistry*, *6*(3), 19. https://doi.org/10.3390/suschem6030019

Laudares, F. A. L., Do Nascimento, A. M., Oliveira, R. N., Dos Santos, R. R., & Moura, F. D. G. (2023). Evaluation of the acoustic properties of African mahogany (Khaya ivorensis)

subjected to heat treatment in an oven and autoclave. *Revista Materia*, *28*(1). https://doi.org/10.1590/1517-7076-RMAT-2023-0035

Martín, J. A., & López, R. (2023). Biological Deterioration and Natural Durability of Wood in Europe. *Forests*, *14*(2), 283. https://doi.org/10.3390/f14020283

Paula, M. H. (2021). Propriedades tecnológicas de madeiras submetidas a tratamentos térmicos para estabilização dimensional [Tese de doutorado, Universidade de Brasília].

Ramos, L. P., Maximino, M., & Carvalho, M. G. (2008). Métodos analíticos aplicados à caracterização química da celulose. Em *Panorama de la industria de celulosa y papel en Iberoamérica 2008* (p. 277–311). RIADICYP (Red Iberoamericana de Docencia e Investigación en Celulosa y Papel).

Santana, M., de Souza, A., & Pereira, A. (2021). *As florestas nativas e plantadas como agentes prestadores de serviços ecossistêmicos* (p. 51–68).

Výbohová, E., & Geffertová, J. (2020). HEATING VALUE OF THERMALLY TREATED WOOD. *Drewno. Prace Naukowe, Doniesienia, Komunikaty = Wood. Research Papers, Reports, Announcements*, *63*(206), 35–46. https://doi.org/10.12841/wood.1644-3985.345.08

Yue, K., Li, X., Jiao, X., Wu, P., & Song, X. (2023). Strength grading of Chinese poplar wood for structural use following thermal modification. *Polymer Testing*, *123*. https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2023.108032

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Efeito do lixamento na rugosidade superficial em painéis de partículas produzidos com madeira de *Pinus* sp. e resíduos agrícolas

Amanda de Freitas Côrrea[1]; Marina Hartungs Prates de Lima[1]; Mariana Figueira Machado[1]; Merielen de Carvalho Lopes[1]; Érika da Silva Ferreira[1];

[1] Centro de Engenharias (CEng), Universidade Federal de Pelotas (UFPel), Pelotas/RS, Brasil

Resumo: A qualidade superficial em painéis de partículas, conhecidos também como aglomerados, influencia diretamente os processos de acabamento e no desempenho do produto final. Neste contexto, o estudo teve como objetivo avaliar a rugosidade da superfície em painéis de partículas de média densidade produzidos com madeira de pinus (*Pinus* sp.), palha de milho (*Zea mays* L.) e palha de arroz (*Oryza* sp.) submetidos a diferentes sequências de lixamento. Os corpos de prova foram avaliados por meio dos tratamentos testemunha, sem lixamento, e com lixas de grãos 80, 100, 120 e 180. A rugosidade superficial foi determinada utilizando rugosímetro digital, sendo avaliados os parâmetros Ra, Rq e Rz. Os resultados evidenciam que a utilização de resíduos agrícolas, como palha de arroz e palha de milho, constitui uma alternativa promissora para a produção de painéis de partículas, apresentando valores de rugosidade superficial estatisticamente semelhantes aos dos painéis produzidos com madeira de pinus, além de contribuir para o aproveitamento sustentável de resíduos lignocelulósicos.

Palavras-chave: Análise da superfície; Acabamento; Materiais lignocelulósicos.

Effect of sanding on the surface roughness of particleboards produced from *Pinus* sp. wood and agricultural residues

Abstract: The surface quality of particleboards, also known as chipboards, directly influences finishing processes and the performance of the final product. In this context, the study aimed to evaluate the surface roughness of medium-density particleboards produced from pine wood (*Pinus* sp.), corn straw (*Zea* mays L.) and rice straw (*Oryza* sp.) subjected to different sanding sequences. Test specimens underwent control treatments (no sanding) and sanding with 80, 100, 120, and 180-grit sandpaper. Surface roughness was determined using a digital roughness tester, evaluating the Ra, Rq, and Rz parameters. The results demonstrate that the use of agricultural residues, such as rice straw and corn straw, represents a promising alternative for particleboard production, presenting statistically similar surface roughness values to those of pine-based panels, while contributing to the sustainable utilization of lignocellulosic waste.

Keywords: Surface analysis; Finishing; Lignocellulosic materials.

1. Introdução

Os painéis de partículas, amplamente empregados na fabricação de móveis e componentes para a construção civil, são tradicionalmente produzidos a partir da consolidação de partículas de madeira com adesivos sintéticos, sob ação de temperatura e pressão (IWAKIRI; TRIANOSKI, 2020).

No entanto, a crescente demanda por processos ambientalmente sustentáveis tem impulsionado a busca por matérias-primas alternativas. Nesse sentido, estudos como o de Silva et al. (2015), que avaliaram painéis MDP produzidos com partículas de eucalipto e palha de milho, demonstram a viabilidade técnica de incorporar resíduos agroindustriais lignocelulósicos à composição de painéis de madeira. Essa mesma lógica fundamenta o aproveitamento da palha de milho (*Zea mays* L.) e da palha de arroz (*Oryza* sp.) em associação à madeira de *Pinus* sp., estratégia que agrega valor a esses subprodutos, reduz o descarte inadequado e diminui a pressão sobre as florestas plantadas.

Para que painéis com essas novas composições sejam inseridos no mercado, é fundamental garantir que suas propriedades técnicas atendam aos requisitos de uso. A qualidade do produto final depende de fatores como a densidade, a distribuição das partículas e, sobretudo, o acabamento superficial. Segundo Pereira, Garcia e Nascimento (2018), a rugosidade da superfície é diretamente influenciada pela estrutura anatômica do material lignocelulósico e pelas condições de usinagem empregadas. Como os resíduos agrícolas apresentam características anatômicas e geométricas distintas da madeira convencional, sua incorporação pode alterar significativamente a regularidade da superfície do painel, o que afeta de forma direta as etapas posteriores de usinagem e revestimento.

Uma superfície mais uniforme favorece a adesão de materiais de acabamento e otimiza o consumo de tintas e vernizes, enquanto irregularidades excessivas comprometem a estética e o desempenho físico-mecânico do produto. A quantificação precisa dessa característica é realizada por meio de rugosímetros, que fornecem parâmetros como a rugosidade média (Ra), a rugosidade quadrática média (Rq) e a altura máxima do perfil (Rz), permitindo avaliar o comportamento da superfície sob diferentes materiais e processamentos, em conformidade com as diretrizes da ABNT NBR ISO 4287 (ABNT, 2002).

Diante da necessidade de compreender o impacto da inclusão desses resíduos agrícolas no acabamento final dos compósitos, este estudo teve como objetivo avaliar a rugosidade

superficial de painéis de partículas produzidos com madeira de pinus (*Pinus* sp.), palha de milho (*Zea mays* L.) e palha de arroz (*Oryza* sp.), comparando o comportamento da superfície após diferentes sequências de lixamento.

2. Material e métodos

Foram utilizados painéis de partículas de média densidade produzidos com madeira de pinus (*Pinus* sp.), palha de milho (*Zea mays* L.) e palha de arroz (*Oryza* sp.). Os painéis apresentam dimensões de 500 × 500 × 8 mm, densidade nominal de 0,70g/cm³ e foram produzidos com 8% de resina ureia-formaldeído, base peso seco de partículas, conforme especificações de Lourenço Neto *et al.* (2017) e Ferreira *et al.* (2014; 2015). O processo de prensagem foi realizado sob pressão específica de 40kgf/cm², temperatura de 180 °C e tempo de prensagem de 6 minutos.

A madeira de pinus utilizada foi fornecida por empresas do setor madeireiro, sendo previamente fragmentada em moinho de martelo equipado com malha de 9 mm, enquanto as palhas de milho e de arroz foram coletadas em áreas agrícolas do Rio Grande do Sul, submetidas ao mesmo processo de fragmentação e posteriormente secas em estufa com circulação forçada de ar até atingirem aproximadamente 3% de umidade. Após a secagem, todos os materiais foram classificados granulometricamente em peneiras de 10, 16 e 30 *mesh*, sendo utilizadas para produção dos painéis apenas as partículas retidas nas peneiras de 16 e 30 *mesh*, visando à padronização da geometria das partículas.

Para a avaliação da qualidade superficial, foram retirados um corpo de prova para cada chapa avaliada com dimensões aproximadas de 70 × 100 × 8 mm, onde os mesmos foram subdivididos em quatro quadrantes para realização das leituras com o rugosímetro. As amostras foram submetidas aos tratamentos de lixamento utilizando as sequências de lixas de grãos 80, 100, 120 e 180, além das amostras testemunhas sem acabamento. O lixamento foi realizado de forma sequencial, empregando-se a mesma amostra em todas as etapas, permitindo a avaliação da influência de cada sequência de lixas sobre a rugosidade superficial.

Os quinze tratamentos avaliados foram definidos a partir da combinação entre os três materiais utilizados (pinus, palha de arroz e palha de milho) e cinco sequências de lixamento, aplicados de forma cumulativa sobre uma única amostra por material, das quais foram realizadas quatro leituras em cada sequência de lixamento, conforme apresentado na Tabela 1.

Tabela 1 - Descrição dos tratamentos conforme material e sequência de lixamento aplicada

Tratamentos	Materiais	Sequência de lixas
T1	pinus	sem lixamento
T2	pinus	lixa 80
T3	pinus	lixa 80/100
T4	pinus	lixa 80/100/120
T5	pinus	lixa 80/100/120/180
T6	palha de arroz	sem lixamento
T7	palha de arroz	lixa 80
T8	palha de arroz	lixa 80/100
T9	palha de arroz	lixa 80/100/120
T10	palha de arroz	lixa 80/100/120/180
T11	palha de milho	sem lixamento
T12	palha de milho	lixa 80
T13	palha de milho	lixa 80/100
T14	palha de milho	lixa 80/100/120
T15	palha de milho	lixa 80/100/120/180

A rugosidade da superfície foi determinada por meio de um rugosímetro portátil digital Mitutoyo SJ-210 (178-561-02A), conforme a ABNT NBR ISO 4288 (2002), utilizando percurso de avaliação de 4 mm, velocidade de deslocamento de 0,5 mm s^{-1}, *cut-off* de 0,8 mm e λs de 2,5 µm. Cada corpo de prova foi dividido em quatro quadrantes, sendo realizada uma leitura em cada quadrante para determinação dos parâmetros Ra (desvio aritmético médio), Rq (desvio médio quadrático) e Rz (altura máxima do perfil).

Os resultados de cada parâmetro de rugosidade (Ra, Rq e Rz) foram submetidos separadamente à análise de variância (ANOVA) fatorial, considerando os efeitos dos materiais, das sequências de lixamento e da interação entre esses fatores. Quando observadas diferenças significativas, as médias foram comparadas pelo teste de Tukey, adotando-se nível de significância de 5%.

3. Resultados e discussão

Os dados observados por meio da análise de superfície correspondentes às médias das leituras realizadas nos quatro quadrantes de cada amostra para os parâmetros Ra, Rq e Rz,

determinados no perfil de rugosidade dos painéis produzidos com madeira de pinus, palha de arroz e palha de milho, submetidos a diferentes grãos de lixa estão apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 - Parâmetros médios de rugosidade, Ra, Rq e Rz, nos diferentes tratamentos avaliados onde observou-se o efeito do tipo de grão empregado no lixamento x materiais lignocelulósicos utilizados na produção dos painéis de partículas

Tratamentos	Ra (µm)	Rq (µm)	Rz (µm)
T1 – pinus (sem lixa)	7,19[a]	9,06[a]	38,69[a]
T2 – pinus (lixa 80)	12,78[a]	16,25 [b]	70,25[b]
T3 – pinus (lixa 100)	7,05[a]	9,65[ab]	43,70[ab]
T4 – pinus (lixa 120)	8,29[a]	10,64[ab]	44,86[ab]
T5 – pinus (lixa 180)	9,13[a]	12,26[ab]	52,71[ab]
T6 – palha de arroz (sem lixa)	8,19[a]	10,34[ab]	43,72[ab]
T7 – palha de arroz (lixa 80)	12,11[a]	14,87[ab]	60,19[ab]
T8 – palha de arroz (lixa 100)	10,36[a]	13,32[ab]	57,75[ab]
T9 – palha de arroz (lixa 120)	9,38[a]	11,68[ab]	49,68[ab]
T10 – palha de arroz (lixa 180)	9,21[a]	11,39[ab]	47,18[ab]
T11 – palha de milho (sem lixa)	8,65[a]	11,70[ab]	53,35[ab]
T12 – palha de milho (lixa 80)	10,83[a]	13,59[ab]	58,32[ab]
T13 – palha de milho (lixa 100)	10,30[a]	12,70[ab]	53,30[ab]
T14 – palha de milho (lixa 120)	12,16[a]	15,28[ab]	61,80[ab]
T15– palha de milho (lixa 180)	9,53[a]	12,31[ab]	52,51[ab]

* Médias seguidas pela mesma letra na coluna não diferem entre si a 5% de significância

Por meio da Tabela 2 observa-se que para o parâmetro Ra, todos os quinze tratamentos foram estatisticamente semelhantes entre si, independentemente do material ou dos grãos de lixas empregados. Esse resultado indica que, isoladamente, a rugosidade média (Ra) não foi sensível o suficiente para diferenciar estatisticamente os tratamentos.

Entretanto, para os parâmetros Rq e Rz, o tratamento T2 (pinus, lixa 80) destacou-se estatisticamente dos demais, apresentando os valores médios mais elevados (16,25 µm e 70,25 µm, respectivamente), diferindo significativamente do tratamento T1 (pinus, sem lixa), que registrou os menores valores (9,06 µm e 38,69 µm). Essa propriedade sugere que a lixa de grão mais grossa (80) promoveu um desgaste mais acentuado e irregular da superfície dos painéis de pinus, ampliando a profundidade dos vales e picos do perfil de rugosidade, ao passo que a ausência de lixamento preservou uma superfície comparativamente mais uniforme, resultado de uma prensagem homogênea das partículas.

Nos painéis produzidos com palha de arroz (T6 a T10) e com palha de milho (T11 a T15), os valores de Rq e Rz mantiveram-se estatisticamente equivalentes entre si e em relação à maioria dos tratamentos com pinus, não sendo possível identificar, dentro de cada material, um grão de lixa estatisticamente superior aos demais. Ainda assim, numericamente, os tratamentos sem lixamento (T6 e T11) apresentaram os menores valores médios de Rq e Rz dentro de seus respectivos materiais, enquanto a lixa 80 (T7 e T12) resultou nos maiores valores, repetindo a tendência numérica observada para os painéis de pinus — material em que essa diferença foi estatisticamente significativa para Rz. Isso sugere que a granulometria mais grossa tende a aumentar a aspereza superficial independentemente do material lignocelulósico utilizado, ainda que essa tendência não tenha sido estatisticamente confirmada para a palha de arroz e a palha de milho.

A Tabela 3 apresenta os valores médios de Ra, Rq e Rz determinados no perfil de rugosidade, agrupados por material e grão de lixa, permitindo comparar o desempenho geral entre cada efeito avaliado.

Tabela 3 - Valores médios para os parâmetros Ra, Rq e Rz determinados no perfil de rugosidade para cada efeito avaliado

Tratamento	Ra (µm)	Rq (µm)	Rz (µm)
Material			
pinus	8,89[a]	11,57[a]	50,04[a]
palha de arroz	9,85[a]	12,32[a]	51,71[a]
palha de milho	10,29[a]	13,11[a]	55,86[a]
Grão de Lixa			
sem lixa	8,01[a]	10,37[a]	45,25[a]
lixa 80	11,90 [b]	14,90 [b]	62,92 [b]
lixa 100	9,23[a]	11,89[ab]	51,58[ab]
lixa 120	9,94[ab]	12,53[ab]	52,11[ab]
lixa 180	9,29[ab]	11,99[ab]	50,79[ab]

* Médias seguidas pela mesma letra na coluna não diferem entre si a 5% de significância.

Ao analisar a Tabela 3 quanto ao fator material, verifica-se que pinus (Ra = 8,89 µm), palha de arroz (Ra = 9,85 µm) e palha de milho (Ra = 10,29 µm) não diferiram estatisticamente entre si para nenhum dos três parâmetros avaliados (Ra, Rq e Rz). Esse resultado indica que, de forma geral, o tipo de material lignocelulósico empregado na produção dos painéis não exerceu influência estatisticamente significativa sobre a qualidade final da superfície.

Com relação o grão de lixa, observa-se uma diferença estatística evidente entre os tratamentos sem lixamento e com lixa 80 para os três parâmetros avaliados. A condição sem lixamento apresentou os menores valores médios (Ra = 8,01 µm; Rq = 10,37 µm; Rz = 45,25 µm), sendo estatisticamente distinta da lixa 80, que resultou nos maiores valores médios (Ra = 11,90 µm; Rq = 14,90 µm; Rz = 62,92 µm). As lixas de grãos 100, 120 e 180 apresentaram valores intermediários, não diferindo estatisticamente nem da condição sem lixamento nem da lixa 80 , o que evidencia que o uso da lixa de grão mais grosso (80) foi o tratamento menos eficiente para a melhoria do acabamento superficial, promovendo maior aspereza, enquanto a ausência de lixamento manteve a superfície mais homogênea, possivelmente devido à distribuição mais regular das partículas na etapa de prensagem, sem a introdução de riscos e sulcos característicos do processo de lixamento com grão grosso.

De modo geral, os resultados evidenciam que, diferentemente do observado para o parâmetro Ra isoladamente, os parâmetros Rq e Rz foram mais sensíveis para detectar diferenças estatísticas entre os tratamentos, tanto na Tabela 2 quanto na Tabela 3, reforçando a importância de se avaliar conjuntamente os três parâmetros de rugosidade na caracterização da qualidade superficial dos painéis.

4. Conclusões

Por meio dos resultados observados verificou-se que o tipo de material não exerceu influência estatisticamente significativa sobre os parâmetros Ra, Rq e Rz, uma vez que os três materiais apresentaram valores médios semelhantes entre si.

Com relação às sequências de lixamento, observou-se que o grão de lixa foi o fator determinante na variação da rugosidade, independentemente do material empregado.

Dessa forma, conclui-se que a rugosidade superficial dos painéis de partículas avaliados teve uma maior associação entre o grão de lixa empregado do que ao tipo de material lignocelulósico utilizado na produção, evidenciando o potencial da palha de milho e da palha de arroz como alternativas viáveis à madeira de pinus na fabricação de painéis de partículas com qualidade de acabamento equivalente.

5. Agradecimentos

Os autores agradecem ao CNPq pelo fomento ao desenvolvimento da pesquisa que viabilizou a produção dos painéis de partículas. Às empresas Fibraplac pela doação da madeira de *Pinus* sp. e aos produtores rurais dos municípios de Pelotas, Pedro Osório e Santa Vitória do Palmar pela disponibilização da palha de milho e palha de arroz. E finalmente à empresa Hexion Química do Brasil pela disponibilização da resina ureia-formaldeído utilizada na pesquisa.

6. Referências bibliográficas

Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2002). *NBR ISO 4287: Especificação geométrica de produtos (GPS) — Textura da superfície: Método do perfil — Termos, definições e parâmetros de textura da superfície*. ABNT.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2002). *NBR ISO 4288: Especificação geométrica de produtos (GPS) — Textura da superfície: Método do perfil — Regras e procedimentos para avaliação da textura da superfície*. ABNT.

Iwakiri, S., & Trianoski, R. (2020). *Painéis de madeira reconstituída* (2ª ed.). FUPEF.

Silva, D. W., Farrapo, C. L., Ribeiro, D. P., Mendes, R. F., Mendes, L. M., & Scolforo, J. R. S. (2015). MDP com partículas de eucalipto e palha de milho. Scientia Forestalis, 43(108), 853–862. https://doi.org/10.18671/scifor.v43n108.10

Pereira, K. M., Garcia, R. A., & Nascimento, A. M. (2018). Rugosidade da superfície de madeiras amazônicas. Scientia Forestalis, 46(119), 347–356. https://doi.org/10.18671/scifor.v46n119.02

Ferreira, E. S., Pedrazzi, C., Zanatto, A. P., Corrêa, C. S., Souza, T. R., Rodrigues, V. L., Silva, N. M., & Muller, J. L. (2015). *Painéis decorativos produzidos com resíduos agrícolas* (Relatório técnico, Processo CNPq nº 420419/2013-6). CNPq/SPM-PR/Petrobras.

Ferreira, E. S., Furlan, L., Oliveira, M. P., Perleberg, T. D., Lourenço Neto, G. R., Schmitz, V. N., & Koschier, P. V. (2014). *Painéis decorativos produzidos com resíduos lignocelulósicos* (Relatório técnico, Processo CNPq/Vale S.A. nº 455645/2012-4). CNPq/Vale S.A.

Lourenço Neto, G. R., Ferreira, E. S., Lopes, M. C., Cardoso, G. V., Schmitz, V. N., & Koschier, P. V. (2017). Propriedades tecnológicas de painéis aglomerados produzidos com resíduos lignocelulósicos. Em *Anais do III Congresso Brasileiro de Ciência e Tecnologia da Madeira*. https://proceedings.science/cbctem/trabalhos/propriedades-tecnologicas-de-paineis-aglomerados-produzidos-com-residuos-lignoce

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Efeito Do Tratamento Térmico À Vácuo Nas Propriedades Mecânicas De Três Espécies Madeireiras

Gabriel Iuri Candido Leandro[1]; Alexandre Miguel do Nascimento[1]; Rogério Rodrigues dos Santos[1]; Rian Murilo de Souza[1]

[1] Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro

Resumo: O tratamento térmico a vácuo é uma alternativa sustentável para modificar propriedades da madeira sem produtos químicos. Este estudo avaliou o efeito de duas temperaturas (160 °C e 190 °C) sobre as propriedades mecânicas de Freijó (*Cordia goeldiana*), Muiracatiara (*Astronium lecointei*) e *Pinus sp*. Foram medidos o módulo de elasticidade estático (MOE_{est}), dinâmico (MOE_d), dinâmico específico (MOE_d/ρ) e densidade aparente (ρ). Os resultados mostraram aumentos significativos nos módulos estático e dinâmico para todas as espécies, com destaque para a Muiracatiara, que obteve os maiores ganhos. Para Freijó e Pinus, a temperatura de 160 °C foi mais vantajosa para o MOE, enquanto para Muiracatiara ambas as temperaturas foram viáveis, com 190 °C melhorando o MOE_d e MOE_d/ρ. A densidade não variou expressivamente, indicando que as melhorias mecânicas decorrem de modificações estruturais na matriz lignocelulósica, como degradação de hemiceluloses e aumento da cristalinidade da celulose e a madeira de Muiracatiara tende a responder muito mais ao tratamento nas duas temperaturas.

Palavras-chave: Módulo de elasticidade; Densidade aparente; Modificação da madeira.

Effect of Vacuum Thermal Treatment on the Mechanical and Physical Properties of Three Wood Species

Abstract: Vacuum heat treatment is a sustainable alternative for modifying wood properties without chemicals. This study evaluated the effect of two temperatures (160 °C and 190 °C) on the mechanical properties of Freijo (*Cordia goeldiana*), Muiracatiara (*Astronium lecointei*), and Pine (*Pinus sp.*). The static modulus of elasticity (MOE_{stat}), dynamic modulus of elasticity (MOE_d), specific dynamic modulus of elasticity (MOE_d/ρ), and apparent density (ρ) were measured. The results showed significant increases in both the static and dynamic moduli for all species, with Muiracatiara standing out as it achieved the highest gains. For Freijó and Pine, the temperature of 160 °C was more advantageous for MOE, whereas for Muiracatiara both temperatures were viable, with 190 °C improving MOE_d and MOE_d/ρ. Density did not vary significantly, indicating that the mechanical improvements stem from structural modifications in the lignocellulosic matrix, such as hemicellulose degradation and increased cellulose crystallinity, and that Muiracatiara wood tends to respond much more to treatment at both temperatures.

Keywords: Elastic modulus; Apparent density; Wood modification.

1. Introdução

A madeira é um dos materiais mais versáteis e amplamente empregados na construção civil e na indústria moveleira, destacando-se por sua elevada relação resistência/peso, renovabilidade e apelo estético. Contudo, apresenta limitações intrínsecas, como a susceptibilidade à degradação, a instabilidade dimensional frente às variações de umidade e a variabilidade natural de suas propriedades (Kollmann & Côté, 1968; Hill, 2006).

Nas últimas décadas, os processos de modificação térmica da madeira têm recebido atenção crescente da comunidade científica e do setor produtivo, por representarem uma alternativa livre de produtos químicos para a melhoria de propriedades como a estabilidade dimensional, a resistência à deterioração biológica e, em certas condições, a rigidez do material (Esteves & Pereira, 2009). O princípio fundamental do tratamento térmico baseia-se na exposição da madeira a temperaturas elevadas (geralmente entre 160 °C e 240 °C), sob atmosfera controlada, promovendo alterações químicas e estruturais permanentes nos constituintes da parede celular (Militz, 2002).

O tratamento a vácuo apresenta vantagens específicas, como a redução da concentração de oxigênio no ambiente de processamento, minimizando reações oxidativas indesejadas, e a facilitação da remoção de voláteis e produtos de degradação, o que contribui para um tratamento mais homogêneo (Sandberg et al., 2013). Apesar dessas vantagens, estudos comparativos envolvendo mais espécies submetidas ao tratamento a vácuo ainda são escassos na literatura. A maioria dos trabalhos concentra-se em espécies de clima temperado (Boonstra & Tjeerdsma, 2006; Tjeerdsma & Militz, 2005), deixando uma lacuna importante acerca do comportamento de madeiras tropicais, cuja composição química e anatomia diferem substancialmente das espécies de clima temperado.

Do ponto de vista químico, o tratamento induz modificações profundas nos principais constituintes da parede celular: celulose, hemiceluloses e lignina. As hemiceluloses, por apresentarem estrutura amorfa e menor estabilidade térmica, são as primeiras a sofrer degradação, com hidrólise das ligações glicosídicas e liberação de ácidos orgânicos que catalisam reações subsequentes (Hill, 2006). A celulose, embora mais termoestável, pode sofrer aumento de cristalinidade em função da degradação preferencial das regiões amorfas e do realinhamento das cadeias remanescentes. A lignina, por sua vez, sofre reações de condensação e reticulação que contribuem para o enrijecimento da matriz (Yildiz et al., 2006).

Essas alterações químicas traduzem-se em mudanças nas propriedades macroscópicas da madeira, notadamente na redução da higroscopicidade e, em muitos casos, no aumento do módulo de elasticidade (Esteves & Pereira, 2009).

No contexto brasileiro, espécies como o Freijó (*Cordia goeldiana* Huber), a Muiracatiara (*Astronium lecointei* Ducke) e o Pinus (*Pinus spp*.) possuem relevante importância econômica. A resposta diferencial dessas espécies ao tratamento térmico a vácuo pode fornecer subsídios valiosos para a otimização de processos industriais e para a agregação de valor aos produtos madeireiros.

Nesse sentido, o presente trabalho teve como objetivo avaliar o efeito do tratamento térmico a vácuo em duas temperaturas (160 °C e 190 °C) sobre as propriedades físicas (densidade aparente) e mecânicas (módulo de elasticidade estático, módulo de elasticidade dinâmico e módulo dinâmico específico) das madeiras de Freijó, Muiracatiara e Pinus.

2. Material e métodos

Foram utilizadas três espécie: Freijó (*Cordia goeldiana*), Muiracatiara (*Astronium lecointei*) e Pinus (*Pinus spp*.), provenientes de comércio local. Adquiridas pranchas de madeira, foram produzidas amostras, processadas no Laboratório de Processamento Mecânico da Madeira na UFRRJ, com dimensões de 6 × 35 × 211 mm (espessura × largura × comprimento).

2.1. Tratamento térmico a vácuo

Para a realização do tratamento de modificação térmica, foi utilizado uma estufa elétrica modelo SL104 (Figura 1), responsável pelo aquecimento controlado das amostras. O vácuo será gerado por uma bomba de vácuo Novatécnica, modelo NT-613, conectada a um Kitassato de capacidade de 1,0 L.

O programa de tratamento na estufa é mostrado na Figura 2. As amostras serão tratadas, com aplicação de vácuo em aproximadamente 720 mmHg durante todo o processo.



Figura 1 - Representação do esquema de tratamento de modificação térmica com o Kitasato presente para reter o vapor de água. Fonte: Gerada por Gemini em 02/07/2026.

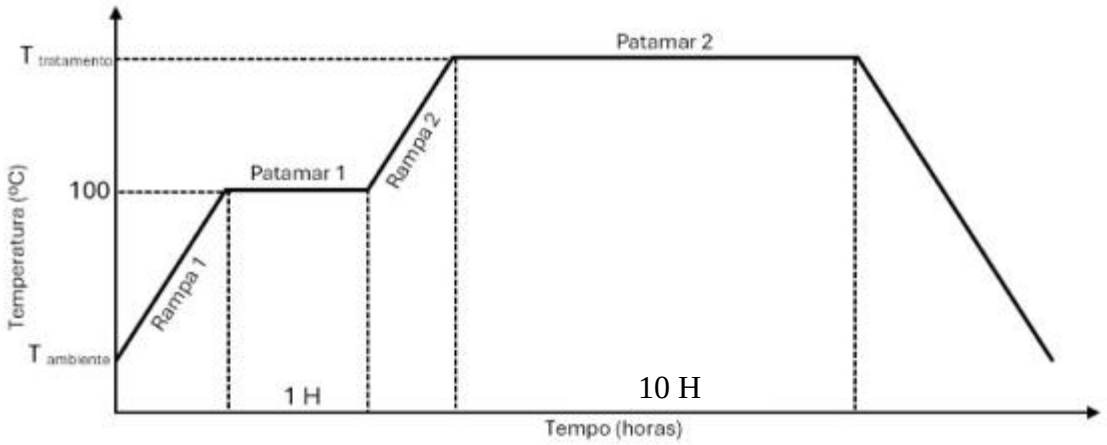


Figura 2 - Programação do tratamento de modificação térmica.

A estufa foi iniciada em temperatura ambiente e definida com uma taxa de aquecimento de 0,8 ºC/min (rampa 1), até atingir a temperatura de 100 °C (patamar 1), quando a temperatura chegou aos 40 °C, o vácuo foi iniciado e com isso o material foi aquecido até a temperatura constante de 100 °C e permaneceu nesta temperatura durante uma hora. Feita a estabilização de temperatura em 100 °C, a estufa foi aquecida novamente com uma taxa de 0,8 °C/min (rampa 2) até alcançar a temperatura auge do tratamento (160 ºC ou 190 °C - patamar 2), durante 10 horas consecutivas. Ao final desse tempo, a estufa foi desligada e deixada em seu resfriamento lento e natural.

2.2. Ensaios físicos e mecânicos

2.2.1. Coleta de densidade aparente

Para a determinação da densidade aparente (Equação 1) das amostras, foi utilizado um micrômetro digital com precisão de três casas (±0,001 mm) para as dimensões de largura e espessura, para o comprimento foi utilizado um paquímetro digital com precisão de duas casas (±0,01 mm) e com esses dados dimensionais foi feito o produto dessas 3 dimensões para obtenção do volume das amostras (cm³), já para a coleta de massa foi utilizado uma balança de precisão de três casas decimais (±0,001 g). Com esses dados foi possível determinar a densidade da madeira, na condição climatizada de equilíbrio (umidade de aproximadamente 12%).

$$Densidade\left(\rho\right)=\frac{Massa\left(g\right)}{Volume\left(c\,m^{3}\right)} \quad (1)$$

2.2.2. **Ensaio de flexão dinâmico e estático**

O ensaio foi realizado no laboratório de ensaios físico-mecânicos da madeira na UFRRJ, através da máquina de ensaios máquina de ensaios universal mecânica modelo CAP 30TF UMC 300. A determinação da resistência à flexão estática da madeira, consistiu na aplicação de uma carga a um corpo-de-prova repousada sobre dois apoios, na metade de seu comprimento, para causar tensões e deformações mensuráveis até sua ruptura (Moreschi, 2005). O limite de proporcionalidade (LP), já foi conhecido para as madeiras de acordo com trabalhos anteriores de Laudares (2022) e Medeiros et al. (2025), de modo que o modulo de elasticidade seja calculado usando a carga abaixo da carga do LP, ou seja $F_{50\%}$ e carga $F_{10\%}$ e com os deslocamentos correspondentes ($\delta_{50\%}$ e $\delta_{10\%}$), pela Equação 2 (ver Figura 3).

$$MOEest\acute{a}tico = \frac{\left(F_{50\%} - F_{10\%}\right) L^3}{\left(\delta_{50\%} - \delta_{10\%}\right) 4\, b\, h^3} \qquad (2)$$

Em que: F50% representa a metade de carga máxima do limite de proporcionalidade estimado nas madeiras e F10% representa 10% da carga máxima do limite de proporcionalidade, “L” representa o vão livre, “δ” representa a deformação ocasionada no material; “b” é a largura da seção transversal da amostra e “h” representa a espessura da seção central da amostra.

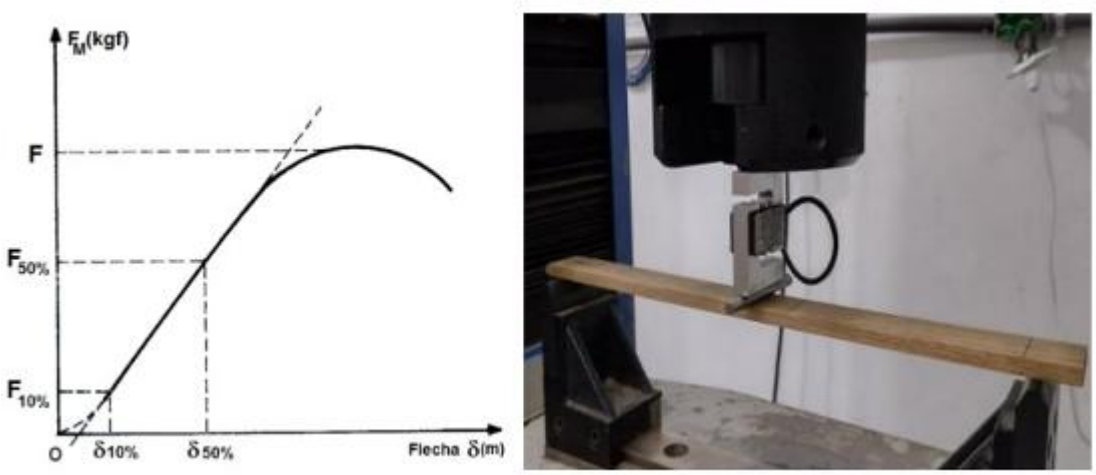


Figura 3 - A imagem esquerda representa o gráfico utilizado para descobrir a tensão máxima na madeira sem comprometer a sua capacidade elástica natural. A direita, representa o ensaio realizado em máquina, aplicando-se uma força N na madeira entre dois apoios que representam o vão da amostra. Fonte: Laudares, 2022.

Para a análise do módulo de elasticidade dinâmico ou Young, foi utilizado o ensaio não destrutivo de propagação de ondas ou método de vibração transversal, em conformidade com a norma ASTM E1876 (2022), conhecido também como método de vibração livre-livre. A

amostra foi posicionada sobre dois apoios paralelos situados a uma distância equivalente a 0,224 vezes o seu comprimento longitudinal, medida a partir de cada extremidade livre (Figura 4).

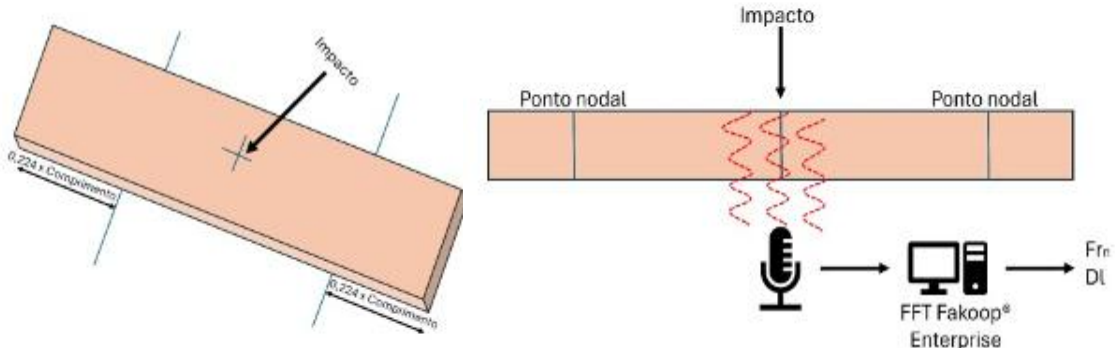


Figura 4 - Á direita, o impacto gerado no centro da amostra e a informação obtida á esquerda. Sendo "Frn" frequência natural de vibração.

Para a execução do ensaio, impactos transversais são aplicados no centro da amostra por meio de um martelo. A captação das ondas sonoras é realizada por um microfone, posicionado na direção oposta ao ponto de impacto central, desta forma a madeira irá vibrar e transmitir a energia sonora para captação do microfone. O sinal acústico gerado foi processado pelo software Fast Fourier Analyzer (FFT), do sistema FAKOOP® Enterprise.

Para a determinação do MOEd (Módulo de elasticidade dinâmico) do material, o exame seguiu conforme a Equação 3, a qual também é descrita em outros trabalhos que tratam de métodos de ressonância, como o de Laudares (2022).

$$MOEd = \left(0{,}9464\,\rho * fn^2 * L^4\right) h^{-2} \qquad (3)$$

Em que: "Ed" representa módulo de elasticidade dinâmico em $kgf.cm^{-2}$, "h" representa espessura da barra em cm, "ρ" representa a densidade da amostra em $g.cm^{-3}$, "fn" representa a frequência de vibração em Hz, "L" representa o comprimento da barra em cm.

2.3. Análise estatística

A análise estatística foi conduzida em duas etapas complementares. Na primeira etapa, primeiramente foi analisado a normalidade dos dados e se seguissem normalidade foi usado o teste t pareado e se não foi usado teste não paramétrico de Wilcoxon. Na segunda etapa, calculou-se o delta (Δ) de cada variável resposta para cada corpo de prova, definido como $\Delta = Y_{Tratado} - Y_{NãoTratado}$ e feito ANOVA fatorial, como fatores, temperatura e espécie, caso os pressupostos não fossem atendidos, será realizado análise não paramétrica por meio de gráfico box plot.

697. **Resultados e Discussão**

Pela é possível observar que a maioria das propriedades na temperatura de 160 ºC obtiveram efeitos (Tabela 1), como por exemplo aumento nos módulos de elasticidade e no caso da Muiracatiara redução na densidade aparente.

Tabela 13 - Dados médios das propriedades mecânicas observadas anterior ao tratamento (Natural) e tratada à 160 ºC (160), com valor p do teste t de comparação entre o estado natural e tratado. Dados em negrito representam efeito significativo. Em asterisco foi utilizado o teste de Wilcoxon.

	Espécie	Freijó		Muiracatiara		Pinus	
Propriedade	Tratamento	Média	p	Média	p	Média	p
MOEest (Kgf/cm²)	Natural	**105972,5**	**0,000**	**108247**	**0,000**	**92446,6**	**0,005***
	160	**128765,4**		**135948,5**		**117622,5**	
MOEd (Kgf/cm²)	Natural	**143123**	**0,000**	**135343,3**	**0,000**	**128110,5**	**0,000**
	160	**147299,8**		**144250,3**		**130052,6**	
MOEesp (MOEd/ρ)	Natural	**255310,8**	**0,000**	**160689,2**	**0,000**	**242030,8**	**0,000**
	160	**262618,9**		**175067,2**		**245906,6**	
Densidade (g/cm³)	Natural	0,562	0,521	**0,842**	**0,000**	0,527	0,284*
	160	0,562		**0,824**		0,527	

Em que: “MOEest” representa o módulo de elasticidade estático, “MOEd” o módulo de elasticidade dinâmico, “MOEest” representa o módulo de elasticidade específico.

A tabela 1, demonstra diminuição apenas para Muiracatiara e nenhuma alteração para Pinus e Freijó, indicando que possa ser madeiras que mantenham sua resistência pouco afetada pelo tratamento à 160 ºC, conforme aumenta os módulos de elasticidade na flexão.

Para o tratamento em 190 ºC (tabela 2), foi observado o mesmo comportamento com algumas variações, onde que, dessa vez as densidades sofreram perdas maiores, estimando que a temperatura possa influenciar na perca de massa das três madeiras.

Tabela 14 - Dados médios das propriedades mecânicas observadas anterior ao tratamento (Natural) e tratada à 190 ºC (190), com teste t de comparação entre o estado natural e tratado. Dados em negrito representam efeito significativo (valor p<0,05).

	Espécie	Freijó		Muiracatiara		Pinus	
Propriedade	Tratamento	Média	p	Média	p	Média	p
MOEest (Kgf/cm²)	Natural	**102503,5**	**0,000**	**117336,3**	**0,000**	**89366,94**	**0,010**
	190	**109217,2**		**145165,4**		**98140,21**	
MOEd (Kgf/cm²)	Natural	**137630,1**	**0,000**	**141492,3**	**0,000**	**120379,7**	**0,000**
	190	**141227,0**		**151906,3**		**123260,1**	
MOEesp (MOEd/ρ)	Natural	**240038,9**	**0,000**	**166709**	**0,000**	**224331,2**	**0,000**
	190	**248613,6**		**183058,6**		**230964,8**	
Densidade (g/cm³)	Natural	**0,576**	**0,000**	**0,849**	**0,000**	**0,535**	**0,000**
	190	**0,569**		**0,831**		**0,532**	

Para 190 ºC, todas as propriedades de todas as madeiras sofreram efeitos significativos, com aumento nas propriedades mecânicas e diminuição na densidade, indicando que o tratamento mais agressivo produz mais efeitos significativos nas propriedades mecânicas da madeira.

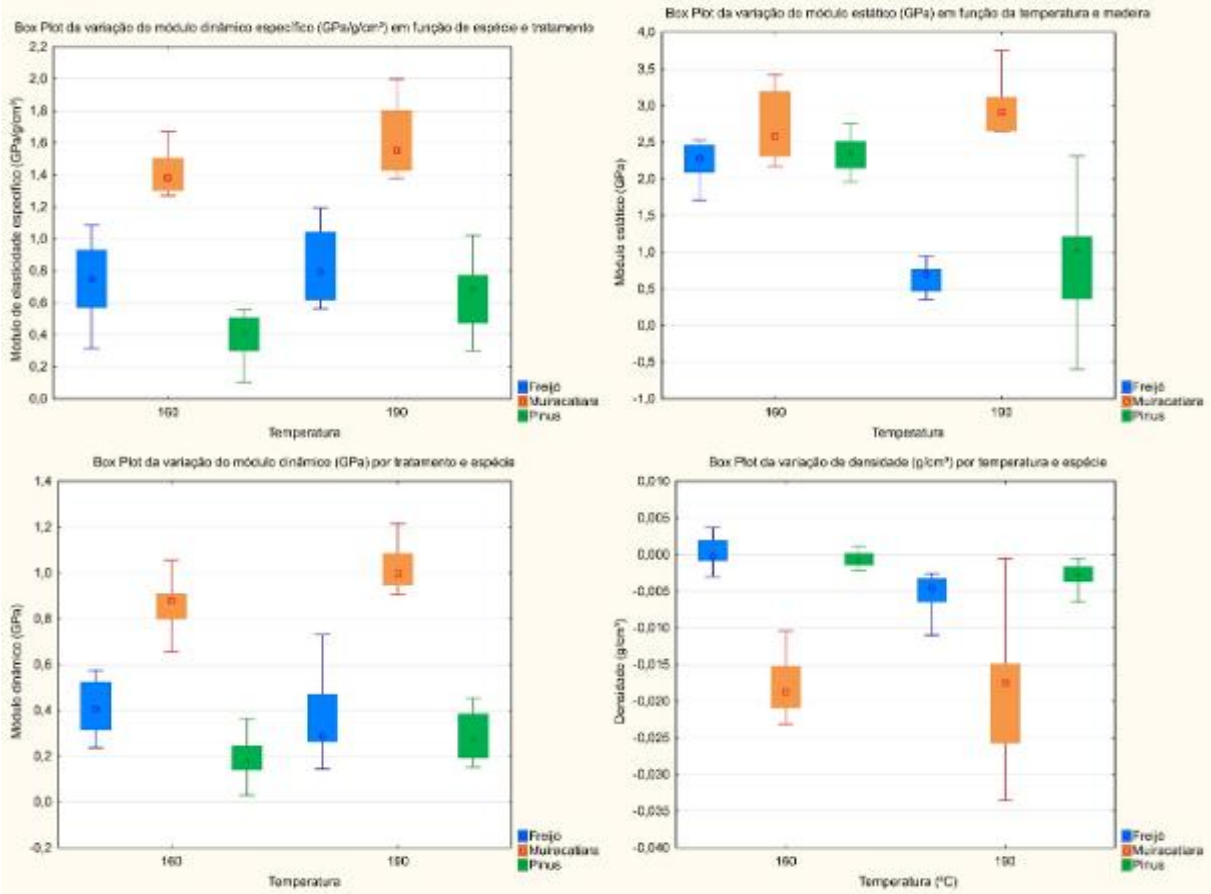


Figura 7 – Medianas da variação das propriedades físicas e mecânicas das madeiras de Freijó, Muiracatiara e Pinus.

Para densidade (g/cm³), Muiracatiara manteve a variação indicando que a temperatura de tratamento não obteve influência, entretanto para Freijó e Pinus, as espécies perderam massa conforme aumenta a temperatura, apesar de ser baixa a variação. As espécies reagiram de maneira diferente em cada tratamentos para densidade, onde que, Freijó e Pinus manteve o comportamento, diferente da Muiracatiara.

O módulo dinâmico em 160 ºC, Muiracatiara aumentou consideravelmente em comparação com as outras espécies e Pinus foi a que menos reagiu a 160 °C. Para 190 °C, a Muiracatiara permaneceu ganhando, inclusive ainda mais do que no tratamento de 160 °C, enquanto Freijó não obteve diferenças entre tratamento e Pinus obteve um leve aumento em comparação com o tratamento de 160 °C.

O mesmo ocorre com o módulo estático, mas de maneira mais equiparada entre espécies na temperatura de 160 ºC. Muiracatiara novamente tem um desempenho melhor com ganho, entretanto Pinus e Freijó também ganham quase o mesmo. Porém no tratamento a 190 ºC, Muiracatiara ganha ainda mais destaque se distanciando das outras espécies. Freijó e Pinus não

se diferenciaram entre si em ambos os tratamentos, entretanto, obtiveram menos ganhos quando submetidos a temperatura mais alta, indicando, que o tratamento mais agressivo, produziu danos as madeiras de Pinus e Freijó.

Para o módulo dinâmico específico praticamente não se obteve diferenças entre tratamentos, apenas entre espécies, Muiracatiara se destacou como a madeira que obteve maior ganho, entretanto, a temperatura de tratamento não obteve diferenças significativas nas três espécies.

4. Conclusões

O tratamento provocou melhoria nas propriedades mecânicas de todas as espécies.

Muiracatiara foi a espécie que melhor reagiu com o tratamento e teve efeito em todas suas propriedades, principalmente no módulo dinâmico, para a densidade quase não houve efeito considerável com Pinus e Freijó.

A temperatura de 190 ºC foi melhor para Muiracatiara, entretanto 160 ºC foi melhor para Pinus e Freijó.

5. Agradecimentos

Agradeço ao Programa de Ciências Ambientais e Florestais e ao Instituto de Florestas da UFRRJ e ao DPF pela disponibilidade das ferramentas e máquinas.

A CAPES/CNPq pela bolsa de fomento que proporcionou, para a realização desse trabalho.

E a todos os coautores que participaram na realização do experimento.

6. Referências bibliográficas

Boonstra, M. J.; Tjeerdsma, B. Chemical analysis of heat treated softwoods. Holz als Roh- und Werkstoff, v. 64, n. 3, p. 204–211, 2006. DOI: 10.1007/s00107-005-0078-4.

Esteves, B. M., & Pereira, H. M. (2009). Wood modification by heat treatment: A review. Bio Resources, 4(1), 370-404. Disponível em: https://bioresources.cnr.ncsu.edu/BioRes_04/BioRes_04_1_0370_Esteves_P_Wood_Mod_Heat_Treatment_Rev_367.pdf.

Hill, C. A. S. (2006). Wood modification: Chemical, thermal and other processes. John Wiley & Sons.

Kollmann, F. F. P., & Côté, W. A. (1968). Principles of wood science and technology: Vol. 1. Solid wood. Springer-Verlag. https://doi.org/10.1007/978-3-642-87928-9.

Laudares, F. A. L. (2022). Efeito do tratamento térmico nas características das madeiras de marupá e freijó para uso em instrumentos musicais. Tese de doutorado, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro.

Medeiros, J. R. de, Nascimento, A. M. do, Batista, D. C., & Souza, N. D. de. (2025). Efeito dos processos de modificação térmica nas propriedades químicas, mecânicas e acústicas da madeira. Caderno Pedagógico. https://doi.org/10.54033/cadpedv22n5-227.

Sandberg, D., Haller, P., & Navi, P. (2013). Thermo-hydro and thermo-hydromechanical wood processing: An opportunity for future environmentally friendly wood products. Wood Material Science and Engineering, 64–88. Doi: 10.1080/17480272.2012.751935.

Tjeerdsma, B. F., & Militz, H. (2005). Chemical changes in hydrothermal treated wood: FTIR analysis of combined hydrothermal and dry heat-treated wood. Holz als Roh- und Werkstoff, *63*, 102–111. https://doi.org/10.1007/s00107-004-0532-8

Yildiz, S., Gezer, E. D., & Yildiz, U. C. (2006). Mechanical and chemical behavior of spruce wood modified by heat. Building and Environment, 1762–1766, DOI:10.1016/j.buildenv.2005.07.017.

701. Emissão de formaldeído em painéis com resina MUF

André Christian Keinert[1]; Isabella Christina de Lina e Santos[1]; Ugo Leandro Belini[1]

[1] Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR)

Resumo: A busca por painéis de madeira mais sustentáveis e duráveis impulsiona alguns fabricantes de painéis de partículas de média densidade a desenvolverem produtos especiais. Contudo, o impacto nos custos é bastante significativo, principalmente devido à utilização de resinas especiais base melamina ureia formaldeído (MUF), aumento nas dosagens de insumos e redução da produtividade. O presente estudo teve como objetivo verificar a influência de variáveis da resina melamina ureia formaldeído, na emissão de formaldeído dos painéis, via perforator conforme NBR 14810-2:2018 Foram fabricadas em laboratório resinas base melamina ureia formaldeído variando a razão molar em 1,05; 1,22 e 1,30 e teores de melamina de 5% e 15% e painéis MDP em laboratório, utilizando partículas coletadas em processo industrial, de Pinus spp, encoladas com 10% de resina sobre peso das partículas secas, além da aplicação de emulsão de parafina e sulfato de amônia como catalisador. As emissões de formaldeído dividiram as resinas em grupos E1 e E2 e aumentaram com o incremento da razão molar e não foram influenciadas diretamente pelos teores de melamina.

Palavras-chave: Pinus spp, resina melamina ureia formol, painel aglomerado

702. Formaldehyde emission in panels with MUF resin

703.

Abstract: The search for more sustainable and durable wood panels is driving some medium-density particleboard (MDP) manufacturers to develop special products. How-ever, the impact on costs is quite significant, mainly due to the use of special melamine urea formaldehyde (MUF) resins, increased input dosages, and reduced productivity. This study aimed to verify the influence of melamine urea formaldehyde resin variables on formaldehyde emission from the panels, via perforator according to NBR 14810-2:2018. Melamine urea formaldehyde resins were manufactured in the laboratory with varying molar ratios of 1.05, 1.22, and 1.30 and melamine contents of 5% and 15%. MDP panels were also manufactured in the laboratory using particles collected from an industrial process, from Pinus spp., bonded with 10% resin by weight of dry particles, in addition to the application of paraffin and ammonium sulfate

emulsion as a catalyst. Formaldehyde emissions divided the resins into groups E1 and E2 and increased with increasing molar ratio, and were not directly influenced by melamine content.

Keywords: Pinus spp, MUF resin, particleboard

1. Introdução

O setor de painéis de madeira reconstituída no Brasil, a partir da instalação da primeira planta de painéis de fibras de média densidade em 1997, apresentou aumento expressivo da produção, incluindo MDP (Medium Density Particleboard), MDF (Medium Density Fiberboard) e Chapas de fibras (Hardboard), conforme relatório da Indústria Brasileira de Árvores IBÁ (2020) passou de 3,5 milhões de metros cúbicos produzidos em 2003 para 8,6 milhões de metros cúbicos produzidos em 2019, alcançando o oitavo lugar no ranking dos países produtores, dos quais aproximadamente 3,2 milhões de metros cúbicos são referentes à produção de painéis de partículas de média densidade, denominado MDP.

No Brasil, em meados de 2010 durante a elaboração da primeira norma brasileira de painéis de partículas de média densidade (MDP), devido à mudanças em regulamentações e normas internacionais de emissão de formaldeído, foi iniciada discussão sobre controle e redução dos limites de emissão de formaldeído dos painéis reconstituídos. As discussões no comitê técnico resultaram em ações efetivas, inicialmente em 2013 com a publicação da NBR 14810 para painéis de partículas de média densidade, eliminando a classificação E3 (emissão >30 mg), criação do Programa Setorial de Qualidade de Painéis de Madeira (PSQPM) que através de laboratório independente controla trimestralmente a emissão de formaldeído dos painéis, e em 2019 a redução do limite máximo da classificação E2 para 20 mg. Além disso, à partir de 2014 se intensificou a exportação de painéis de madeira, principalmente para países que exigem emissões de formaldeído inferiores a 8 mg (classificação E1) utilizando a metodologia perforator.

Conforme Pizzi (2003), as resinas melamina-formaldeído (MF) e melaminaureia-formaldeído (MUF) estão entre os adesivos mais utilizados para painéis de madeira para usos externos/semi-externos e para preparação e colagem de

laminados de papel de baixa (BP) e alta pressão (HPL). A maior resistência à água é sua principal característica e que as difere das resinas uréia-formaldeído (UF), porém os adesivos MF apresentam maior valor e por este motivo, visando redução de custo, são adicionadas uma maior ou menor quantidade de ureia, transformando as resinas MF em MUF.

Inicialmente, o teor de formaldeído em uma mistura adesiva era escolhido para ser suficientemente alto visando garantir uma cura rápida da resina, possibilitando uma cadeia de polímero durante a prensagem. Em geral espera-se que uma razão molar mais baixa de resinas resulte em emissão de formaldeído inferior durante o processo de prensagem a quente. Além disso, as emissões de formaldeído dependem do tipo de ligação de formaldeído dentro da rede de polímero, onde o formaldeído ligado na forma de grupos metilol podem ser liberados mais facilmente em comparação com formaldeído incorporado em pontes de metileno mais estáveis.

Segundo Que et al. (2005), a poluição do ar interno por formaldeído (HCHO) emitido a partir de produtos de madeira colados com resina UF, vem sendo uma grande preocupação na indústria de produtos florestais nos últimos anos. Como resultado, os governos europeus e norte-americanos já impuseram regulamentos que limitam a emissão de formaldeído de materiais de construção e dos materiais usados para a fabricação de móveis e acessórios. Os fatores conhecidos para determinar o potencial formaldeído liberado dos painéis de partículas ligados por UF são a espécie da madeira, tipo de resina (razão molar de formaldeído pela uréia), grau de condensação, umidade das partículas de madeira encoladas antes da prensagem, tipo e quantidade de catalisador, tipo e quantidade de aditivos (sequestrante de formaldeído), condições de prensagem (tempo, temperatura e pressão) e condicionamento. Além disso, o tratamento de pós-produção, também pode ser fornecido por tratamento com gás de amônia. A razão molar da resina UF tem uma influência considerável na liberação de formaldeído da placa durante a prensagem e após a produção.

Neste contexto, o objetivo principal do trabalho foi avaliar, conforme NBR 14810-2:2018, a emissão de formaldeído de painéis de partículas de média densidade fabricados a partir do gênero *Pinus* spp, utilizando cinco resinas base melamina ureia

formaldeído (MUF) produzidas e analisadas em laboratório, com diferentes razões molares e teores de melamina.

2. Material e métodos

Foram fabricadas cinco resinas base melamina ureia formaldeído (MUF) em laboratório, utilizando balão volumétrico e com definição de valores e percentual, respectivamente, da razão molar final e teores de melamina, conforme delineamento indicado na Figura 1.

Resina	Razão Molar Final (mols F / mols (M + U))	Teor de Melamina (g M / g Resina)
T1	1,22	5%
T2	1,22	15%
T3	1,30	15%
T4	1,05	5%
T5	1,05	15%

Figura 1: Delineamentos indicando razão molar final e teor de melamina.

Para fabricação dos painéis MDP, as partículas coletadas de camada externa e interna foram submetidas a testes de umidade até peso constante em analisador de umidade OHAUS, equipado com lâmpada halógena. Com base nas umidades obtidas e características da resina, foram calculadas as quantidades necessárias de partículas,

resina, catalisador, água e emulsão de parafina a serem utilizadas para atenderem os parâmetros de processo conforme tabela 6. Para dosagem de insumos, foi utilizada uma encoladeira de tambor, com capacidade para até 4 Kg, com sistema de pás internas, inicialmente nas partículas da camada interna (maiores) e na sequência nas partículas de camada externa (finas), misturando por 15 minutos.

Para cada condição, a resina misturada com catalisador foi aspergida via pistola de pintura, após a aspersão de emulsão de parafina. Imediatamente após a encolagem de camada interna, evitando o impacto de pré cura das resinas, o colchão foi formado manualmente com 3 camadas em quadro de formação sobre placa de alumínio, e então realizada pré prensagem manual para compactação do colchão evitando deslocamentos de ar (“sopros”) durante a prensagem.

O colchão entre placas metálicas e dois calços mecânicos de 15 mm nas laterais visando limitação da espessura, foi introduzido na prensa marca OMECO. Após a prensagem os painéis foram resfriados a temperatura ambiente e refilados para as dimensões finais 15 x 370 x 370 mm.

Para determinação da emissão de formaldeído, foram realizadas três determinações do teor de formaldeído pelo método perforator para cada tratamento, totalizando quinze determinações, conforme NBR 14810-2:2018. O método consiste em ferver 110 g de corpos de prova com dimensões 25 x 25 mm em um balão de vidro com

600 ml de tolueno. O tolueno durante 2 horas, extrai e arrasta o formaldeído dos corpos de prova na forma de vapor, que após passagem pelo condensador em sistema hermeticamente fechado, se transforma em liquido (gotas tolueno + formaldeído) que é captado em água destilada: o tolueno forma fase e o formaldeído é diluído na água, sendo então 62 possível a extração apenas da água misturada com o formaldeído extraído. A determinação do formaldeído presente na água é realizada pelo método da acetilacetona baseada na reação de Hantzch, na qual o formaldeído reage com íons amônio e acetilacetona, formando diacetil diidrolutidina (DDL), que tem uma absorbância máxima de 412 nm, ou seja, sendo possível a medição via espectrofotômetro.

3. Resultados e discussão

Os resultados de emissão de formaldeído livre, apresentados na Figura 2, demonstram diferenças estatísticas e os resultados corroboram que, quanto maior a razão molar, é observada maior emissão de formaldeído. Porém, o teor de melamina aparentemente não influenciou os resultados, uma vez que o cálculo de razão molar foi realizado considerando mols de F / mols U+M.

Testes	T1 (122/5)	T2 (122/15)	T3 (130/15)	T4 (105/5)	T5 (105/15)	NBR 14810:2 2018
Emissão de formaldeído Perforator (mg CH_2O /100g)	**11,8 b** (12,8 – 10,3) (9,3)	**10,1 b** (11,1 – 9,3) (7,9)	**19,0 a** (20,2 – 16,1) (10,1)	**4,5 c** (4,7 – 4,1) (5,1)	**5,8 c** (6,0 – 5,3) (5,4)	**E1 ≤ 8** **20 ≥ E2 > 8**
Classe	E2	E2	E2	E1	E1	

Valores médios seguidos de (máxima – mínima) e (coeficiente de variação); letras diferentes em uma mesma linha diferem entre si ao nível de 95% de probabilidade (teste Tukey). O número de casas decimais utilizado para médias está conforme NBR 14810-2:2018.

Figura 2: resultados da emissão de formol livre (método “perforator”).

Deve-se ressaltar que todos os tratamentos resultaram em valores de formol livre enquadrados na classe E2 de emissão, classe esta adotada por grande maioria das empresas brasileiras na produção e comercialização de painéis reconstituídos em território nacional. Além disso, os tratamentos 4 e 5 estão enquadrados na classe E1, principal classe utilizada na Europa.

Os valores determinados contribuem de forma decisiva na consolidação de informações referentes à emissão de formol e seus impactos em painéis reconstituídos face escassez, em literatura, destas informações.

4. Conclusões

As emissões de formaldeído atenderam os limites estabelecidos na NBR 14810-2:2018, sendo atingida classificação E1 para painéis produzidos com resinas de razão molar 1,05 e classificação E2 para painéis produzidos com resinas de razão molar 1,22 e 1,30.

Nenhuma condição com classificação E1 atingiu resultados de resistência à umidade após teste cíclico (classificação P3), e para tanto seria necessário possivelmente aumento do teor de melamina além dos 15% utilizados. Os resultados demonstram aumento da emissão com o aumento da razão molar, não sendo influenciados significativamente pelos teores de melamina utilizados

5. Agradecimentos

Os autores agradecem a GPC Química, a Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), o Laboratório de Materiais e Tecnologias Sustentáveis (LabMaTS), e os Programas de Pós Graduação em Sustentabilidade Ambiental Urbana (PPGSAU) e Design Prospectivo (PPGDP).

6. Referências bibliográficas

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 14810-2. Painéis de partículas de média densidade. 2018

IBÁ – Indústria Brasileira de Árvores. Relatório IBA 2020. São Paulo. 2020

PAIVA, N. Desenvolvimento de uma resina ureia formaldeído de baixa emissão de formaldeído fortificada com melamina. 2010. 54 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia, Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2010.

PIZZI, A., MITTAL, K. L. Handbook of Adhesive Technology (2nd ed.). New York: Marcel Dekker. 2003.

QUE, Z.; FURUNO, T.; KATOH, S. Evaluation of three test methods in determination of formaldehyde emission from particleboard bonded with different mole ratio in the urea–formaldehyde resin: Building and Environment. ScienceDirect, Japan,

v. 42, p. 1242-1249, 2005

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

704. Ensaio para ligações em painéis de madeira lamelada cruzada cavilhada (PLCC): desenvolvimento e validação de um modelo

Marcos Cesar M Pereira[1]; Luc A. P. Sohier[2]; Carlito Calil Jr.[3], Thierry Descamps[4]

[1] Instituto de Ciências e Engenharia (ICE), Universidade Estadual Paulista – Unesp, Itapeva, SP.

[2] Circular Timber, Bélgica.

[3] Escola de Engenharia de Sâo Carlos, Universidade de São Paulo – USP, São Carlos, SP.

[4] Faculty of Engineering of Mons, University of Mons, Belgica.

Resumo: Este estudo desenvolveu e validou experimentalmente um novo modelo de ensaio de ligação perpendicular com uma seção de corte (corte simples), destinado à determinação do módulo de deslizamento (K_{ser}) das conexões cavilhadas entre lamelas cruzadas de painéis de madeira lamelada cruzada cavilhada (PLCC), uma vez que os ensaios de corte duplo previstos pelas normas não reproduzem adequadamente o estado de tensão e a cinemática de cisalhamento presentes na interface entre lamelas longitudinais e transversais de um painel sob flexão. Para tanto, foram confeccionados e ensaiados 15 corpos de prova compostos por lamelas de Pinus sp. e cavilhas de Roxinho (Peltogyne spp.), submetidos a um ciclo de carregamento e descarregamento conforme a ABNT NBR 7190-5, com o deslocamento monitorado por um transdutor de deslocamento acoplado a uma máquina universal de ensaios. O valor médio de K_{ser} obtido experimentalmente foi então aplicado ao método analítico do fator gama (γ-method) para estimar a rigidez efetiva à flexão de painéis PLCC de três e cinco camadas, cujos resultados foram comparados a dados experimentais disponíveis na literatura. Os resultados indicaram K_{ser} médio de 1476 N/mm e uma rigidez calculada com boa concordância em relação aos valores experimentais publicados, sobretudo para o painel de cinco camadas (variação de 1,2%), confirmando a adequação do modelo de ensaio proposto para caracterizar o comportamento das ligações cavilhadas em painéis PLCC.

Palavras-chave: Módulo de deslizamento, Ensaio mecânico, Produto engenheirado de madeira

705. Connection Test Method for Dowel-Laminated Cross-Laminated Timber (DCLT) Panels: Development and Validation

Abstract: This study developed and validated a new single-shear test configuration for determining the slip modulus (Kser) of doweled connections between crossed lamellas in Dowel-Laminated Cross-Laminated Timber (DCLT) panels. Unlike the double-shear tests prescribed by current standards, the proposed configuration better represents the stress state and shear kinematics at the interface between longitudinal and transverse lamellas under bending. Fifteen specimens composed of Pinus sp. lamellas and Roxinho (Peltogyne spp.) dowels were manufactured and tested using a loading-unloading cycle based on ABNT NBR 7190-5. Displacements were monitored using a linear variable differential transducer (LVDT) coupled to a universal testing machine. The mean experimental Kser was 1476 N/mm. This value was applied in the analytical gamma method to estimate the effective bending stiffness of three- and five-layer DCLT panels. The calculated stiffness showed good agreement with experimental data reported in the literature, with a deviation of only 1.2% for the five-layer panel. The results confirm the suitability of the proposed single-shear test for characterizing doweled connections and estimating the structural stiffness of DCLT panels

Keywords: Slip module, Mechanical test, Enginered wood product.

1. Introdução

A crescente busca global pela descarbonização da construção civil impulsiona a substituição de materiais de elevado consumo energético, como aço e concreto, por produtos de madeira engenheirada. Dentre as inovações tecnológicas emergentes, destacam-se os Painéis de Lamelas Cruzadas Cavilhadas (PLCC) — internacionalmente conhecidos como *Dowel Laminated Timber* (DLT) ou *Dowel Cross-Laminated Timber* (DCLT) —, constituídos por lamelas de madeira dispostas de forma ortogonal e fixadas exclusivamente por cavilhas de madeira, eliminando o uso de adesivos sintéticos ou conectores metálicos. Esse sistema construtivo alinha-se aos princípios da economia circular e dos conceitos 4R (Reduzir, Reutilizar, Reciclar e Reparar), facilitando o reuso do material ao fim da vida útil e aumentando o tempo de residência do carbono fixado na biosfera (Souza, 2026).

O painel PLCC é formado por camadas sobrepostas e cruzadas de lamelas de madeira de menor densidade, unidas mecanicamente no sentido perpendicular por

cavilhas cilíndricas de madeira de alta densidade, sem o emprego de adesivos sintéticos (Pereira et al., 2021; Pereira, 2019).

Quando um painel PLCC é submetido à flexão, as lamelas longitudinais das camadas extremas sofrem tensões opostas (compressão na camada superior e tração na camada inferior). Esse comportamento gera um deslizamento relativo e uma rotação entre as lamelas longitudinais e a camada central transversal. Diferentemente das ligações calculadas pelos modelos de falhas de Johansen que baseiam os modelos de norma, que são mais comuns em treliças, onde as forças das camadas externas atuam na mesma direção, e a camada central na direção oposta (Johansen, 1949) . A figura 1 ilustra como as ligações são solicitadas pela flexão do painel

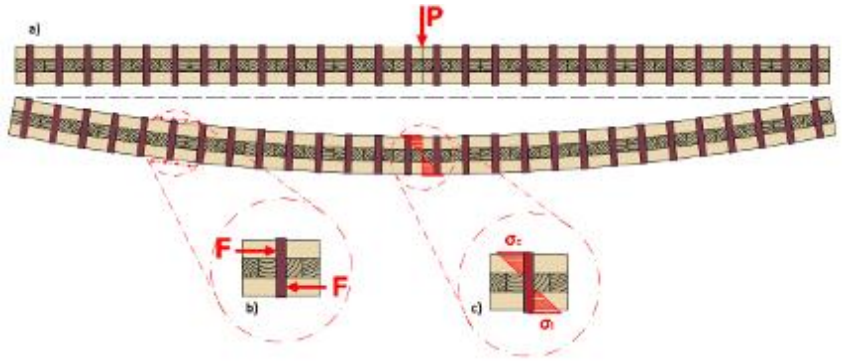


Figura 1 – a) Modelo de um painel de PLCC sob esforços de flexão; b) detalhe das forças de tração e compressão; c) detalhe da distribuição de tensões na conexão cavilhada.

As normas tradicionais de estruturas de madeira normatizam apenas ensaios de ligações com duas seções de corte (corte duplo) submetidas a esforços diretos de tração ou compressão paralela ou perpendicular às fibras. Nesses ensaios padronizados, a mecânica da ligação não simula o efeito de cisalhamento e momentos locais atuantes na cavilha na interface entre camadas cruzadas dispostas a 90°.

Diante dessa lacuna normativa, este estudo modelou um corpo de prova de ligação perpendicular com uma seção de corte, especificamente desenhado para representar o comportamento cinemático e mecânico real de uma célula unitária de conexão de um painel PLCC com o objetivo de sugerir um modelo de ensaio mais adequado.

2. Material e métodos

2.1 Material

Para a produção do modelo de corpo de prova proposto foram utilizadas lamelas de madeira de Pinus sp. nas camadas externas — espécie de baixa densidade e ampla disponibilidade comercial, comumente empregada na fabricação de produtos de madeira engenheirada —, e cavilhas cilíndricas de madeira de Roxinho (Peltogyne spp.), espécie de elevada densidade e resistência mecânica, adequada à função de conector estrutural. A classificação das peças de Pinus sp. quanto à densidade aparente seguiu os procedimentos da ABNT NBR 7190-3, permitindo o agrupamento dos corpos de prova nas quatro faixas de densidade apresentadas na Tabela 1 (item 2.2.2). As cavilhas utilizadas apresentavam diâmetro nominal de ¾” (19,05 mm) e comprimento de 114 mm. Para a colagem rígida das camadas centrais dos corpos de prova foi utilizado adesivo estrutural à base de Fenol-Resorcinol, modelo RS216, fabricado pela Momentive, aplicado conforme as recomendações do fabricante quanto à gramatura, ao tempo de prensagem e à pressão de colagem.

2.2 Métodos

2.2.1 Concepção e montagem do corpo de prova

A concepção do novo ensaio baseou-se em isolar uma única interface de corte perpendicular, permitindo avaliar o efeito combinado da resistência ao embutimento da madeira de Pinus, da rigidez à flexão da cavilha de Pau-roxo e do binário de forças gerado pela excentricidade na transferência do esforço mecânico.

A fim de simular o deslizamento das camadas superiores e inferiores do painel DCLT, o modelo de corpo de prova foi composto por duas seções do painel, contendo três camadas cada. Como ilustra a Figura 2, essas seções foram unidas entre si por colagem rígida com adesivo fenol-resorcinol.

O processo de montagem iniciou-se com a colagem das lamelas centrais; após a cura do adesivo, o corpo de prova foi finalizado com a inserção de duas cavilhas de ¾” x 114 mm em cada lado, posicionadas de modo a simular o seu comportamento no painel.

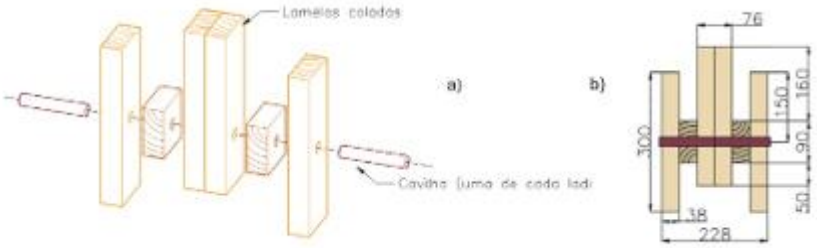


Figura 2 – Corpo de prova para ensaio de ligação perpendicular com uma seção de corte; a) Vista explodida; b) dimensões do corpo de prova.

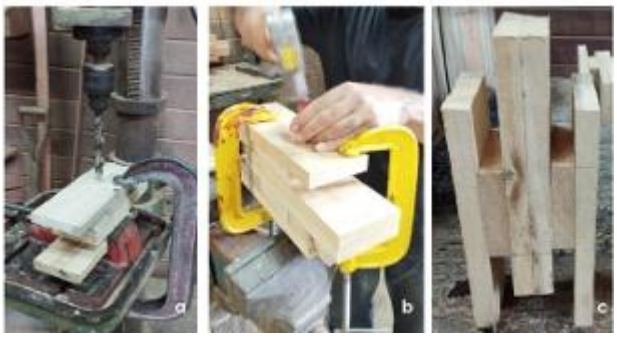


Figura 3 – Etapas de fabricação do corpo de prova; a) furação das peças; b) inserção das cavilhas, c) corpo de prova finalizado.

2.2.2 Ensaio do corpo de prova

Foram ensaiados 15 corpos de prova, e a montagem destes foi feita levando em consideração as densidades de cada peça, de forma a minimizar a influência a variação da densidade durante a flexão do corpo de prova. Portanto, todas as peças foram separadas em 4 grupos, com configurações apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 – *Faixas de densidade para confecção dos corpos de prova*

Grupo	Faixa de Densidade ρ (kg/m³)
1	340 a 370
2	370 a 385
3	385 a 430
4	430 a 480

Fonte: Próprio autor

O procedimento de ensaio seguiu o conceito dos ensaios de ligação constantes na norma ABNT NBR 7190-5 / 2022, na qual é realizado um ciclo de carregamento e descarregamento antes da ruptura completa. Conforme a norma, a força máxima estimada (F_{est}) foi determinada via teste preliminar. Após, ensaiaram-se dezesseis corpos de prova, dos quais um serviu de referência para a determinação da carga máxima e para a estimativa da F_{est} aplicada aos restantes.

A Figura 4 detalha o ciclo de carregamento adotado, composto pelas seguintes etapas:

- Aplicação inicial de carga de $0{,}5 \cdot F_{est}$, mantida por 30 segundos;
- Alívio de carga até $0{,}1 \cdot F_{est}$, mantido por mais 30 segundos;
- Recarregamento contínuo até a ruptura (força última) ou até atingir 15 mm de deslizamento.

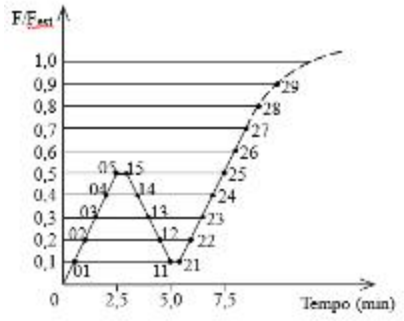


Figura 4 – Ciclo de aplicação do carregamento.

Para a faixa de carregamento abaixo de $0{,}7 \cdot F_{est}$, utilizou-se velocidade constante de força ou deslocamento equivalente a $0{,}2 \cdot F_{est}/\text{min}$. Acima desse limiar ($0{,}7 \cdot F_{est}$), a velocidade foi mantida constante e calibrada para atingir o critério de parada (força última ou 15 mm de deslizamento) em um intervalo adicional de 3 a 5 minutos.

Os testes foram realizados em uma máquina universal de ensaios EMIC (modelo DL3000), cuja automação assegurou rigoroso controle de tempo, velocidade e ciclagem. O deslocamento real das lamelas foi capturado por um transdutor elétrico de deslocamento (LVDT) posicionado abaixo do ponto central do corpo de prova (Figura 5b). Os sinais do LVDT foram enviados a um aquisitor de dados e transmitidos a um

computador, onde um software específico efetuou a aquisição, o tratamento e o armazenamento dos dados

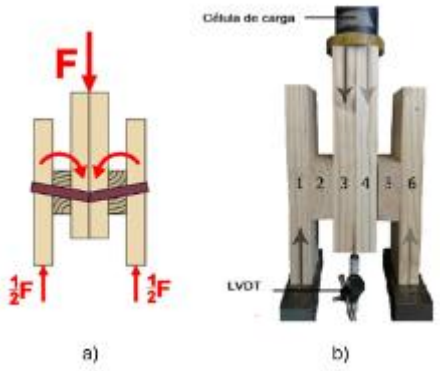


Figura 5 – a) Esquema de aplicação de carga e mecânica do ensaio; b) ensaio real com os componentes na maquina universal de ensaios.

Com os valores F_{est} e $u_{i,mod}$, determinou-se o valor do módulo de deslizamento da ligação, K_{ser}, calculado através da equação 1. É importante ressaltar, que a o K_{ser} foi dividido por 2 pois o ensaio foi realizado com duas cavilhas simultaneamente.

$$K_{ser} = \frac{1}{2} \cdot \frac{0{,}5\,F_{est}}{u_{i,mod}} = \frac{1}{2} \cdot \frac{0{,}5\,F_{est}}{\frac{5}{4}(u_{04} - u_{01})}$$

Equação 11

$$\therefore K_{ser} = \frac{1}{5} \cdot \frac{F_{est}}{(u_{04} - u_{01})}$$

2.2.1 Método analítico: Teoria das Vigas Compostas Mecanicamente ou Método Gamma (γ-method)

O Método Gamma (γ-method) é um procedimento analítico utilizado para determinar a rigidez efetiva à flexão, $(EI)_{ef}$, de elementos estruturais compostos de madeira que apresentam interação parcial ao cisalhamento ou conexões flexíveis. O método introduz um coeficiente de eficiência (γ_i), variando de 0 (sem transferência de esforço cortante) a 1 (conexão perfeitamente rígida), que quantifica a perda de rigidez causada pelo deslizamento entre as camadas. Regulamentada por normas internacionais (como o Eurocode 5) e contemplada pela ABNT NBR 7190-1 / 2022, essa abordagem permite avaliar o comportamento mecânico e as deformações de painéis de lamelas sob

solicitações de flexão. A Equação 2 apresenta o cálculo da regidez por meio do método gamma.

$$EI_{eff} = \sum_{i=1}^{3} \left(E_i \cdot I_i + \gamma \cdot E_i \cdot A_i \cdot a_i^2 \right) \quad \text{Equação 2}$$

Onde:

E_i são os módulos de elasticidade das camadas;

I_i são os momentos de inércias das camadas;

A_i são as áreas das seções transversais das camadas;

a_i são as distâncias dos centroides de cada camadas até a linha neutra do conjunto;

O fator gamma é calculado pela Equação 3

$$\gamma_i = \frac{1}{\left[1 + \frac{\pi^2 \cdot E_i \cdot A_i \cdot S_i}{K_i \cdot L_0^2} \right]} \; para \; i = 1 \; e \; i = 3 \quad \text{Equação 3}$$

Onde:

L_0 = vão livre;

K_i = Kser calculado no ensaio;

S_i = espaçamento entre conectores.

3. Resultados e discussão

A Tabela 2 apresenta os valores obtidos pelo ensaio desenvolvido para simular o comportamento da ligação cavilhada em painéis de PLCC sob esfoços de flexão.

Tabela 2 – Resultados obtidos pelo ensaio desenvolvido para obtenção do Kser

CP	Módulo de deslizamento da ligação K_{ser} [N/mm]
1	1289
2	2563
3	1519

4	1141
5	1660
6	1685
7	1399
8	1497
9	1021
10	1924
11	1061
12	894
13	1552
14	1564
15	1374
$K_{ser,Medio}$	*1476*
Des. Pad.	*410*
C.V.	*27,8*

A partir dos cálculos analíticos fundamentados no Método Gamma utilizando o valor de Kser de 1476 N/mm, obtiveram-se valores de rigidez efetiva à flexão, (Ei_{ef}), de 526 KNm² e 1369 KNm² para os painéis de 3 e 5 camadas, respectivamente. Para fins de validação, esses resultados foram confrontados com os dados experimentais previamente publicados por Pereira et al. (2021) para painéis de PLCC de mesma configuração — compostos por lamelas de *Pinus* sp. e conectores do tipo cavilha de pau-roxo com diâmetro de ¾” —, os quais registraram valores experimentais de (Ei_{ef}) iguais a 727 KNm² (3 camadas) e 1353 KNm² (5 camadas).

A comparação evidenciou uma boa convergência para o painel de 5 camadas, com uma variação analítico-experimental de apenas 1,2%, demonstrando a elevada precisão da formulação analítica para configurações com maior número de camadas. Já para o painel de 3 camadas, o modelo analítico forneceu uma estimativa mais conservadora em relação aos resultados experimentais.

Os valores individuais de K_{ser} apresentados na Tabela 2 revelam uma dispersão importante entre os corpos de prova, com coeficiente de variação (C.V.) de 27,8%. Essa

variabilidade é compatível com o comportamento naturalmente heterogêneo da madeira maciça e reflete, sobretudo, a influência da densidade das lamelas de Pinus sp. sobre a resistência ao embutimento na interface cavilha-madeira, parâmetro determinante para a rigidez da conexão. Os corpos de prova confeccionados com peças de maior densidade (Grupos 3 e 4, Tabela 1) tenderam a apresentar valores de K_{ser} superiores à média, ao passo que os corpos de prova dos Grupos 1 e 2, de menor densidade, concentraram os menores valores registrados (a exemplo dos corpos de prova 4, 9, 11 e 12). Esse comportamento é consistente com a literatura sobre ligações mecânicas em madeira, na qual a densidade constitui um dos principais parâmetros preditores da resistência ao embutimento e, consequentemente, do módulo de deslizamento da conexão.

A maior divergência observada para o painel de três camadas pode estar associada à menor redundância estrutural dessa configuração: com apenas duas interfaces de conexão contribuindo para a rigidez do conjunto, o efeito de eventuais variações locais no embutimento e no ajuste geométrico das cavilhas tende a ser proporcionalmente mais expressivo do que no painel de cinco camadas, no qual a maior quantidade de interfaces resulta em uma resposta global mais homogênea e menos sensível a variações pontuais. Ainda assim, o desvio observado permanece dentro de uma margem tecnicamente aceitável para fins de projeto, reforçando a robustez do procedimento de ensaio proposto mesmo diante da variabilidade inerente ao material.

Do ponto de vista prático, esses resultados indicam que o modelo de ensaio de corte simples proposto é capaz de capturar, de forma consistente, o efeito combinado da resistência ao embutimento, da rigidez à flexão da cavilha e do binário de forças gerado pela excentricidade da ligação — aspectos não representados pelos ensaios tradicionais de corte duplo. Ainda que o procedimento exija controle rigoroso na fabricação dos corpos de prova, em particular na seleção e no agrupamento das peças por faixa de densidade, e demande infraestrutura experimental específica, sua aplicação mostrou-se tecnicamente viável e capaz de gerar um parâmetro de rigidez representativo do comportamento real da conexão sob flexão. A ampliação da base experimental, contemplando diferentes espécies de madeira, diâmetros e geometrias de cavilhas — incluindo avanços recentes em processos de usinagem de cavilhas a partir de madeiras amazônicas abundantes (Souza, 2026) —, bem como distintas configurações de painéis e condições de carregamento, poderá contribuir para o estabelecimento de parâmetros de projeto mais abrangentes e

subsidiar, futuramente, a revisão de procedimentos normativos aplicáveis aos sistemas PLCC.

4. Conclusões

O modelo de ensaio de ligação perpendicular com uma seção de corte desenvolvido neste estudo mostrou-se adequado para caracterizar o módulo de deslizamento (K_{ser}) das conexões cavilhadas em painéis PLCC, tendo fornecido um valor médio de K_{ser} = 1476 N/mm que, quando incorporado ao Método Gamma, resultou em estimativas de rigidez efetiva à flexão com boa concordância em relação a dados experimentais da literatura, sobretudo para painéis de cinco camadas. O procedimento constitui, assim, uma alternativa tecnicamente viável às abordagens tradicionais de ensaio de corte duplo, com potencial aplicação direta na caracterização mecânica de ligações cavilhadas destinadas a sistemas PLCC e no suporte a futuros procedimentos normativos. Como direcionamento para trabalhos futuros, recomenda-se a ampliação da base experimental por meio da avaliação de diferentes espécies de madeira, diâmetros e geometrias de cavilhas, além de distintas configurações de painéis e condições de carregamento.

5. Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001

Ao Instituto de Ciências e Engenharia do Câmpus de Itapeva da Unesp

6. Referências bibliográficas

Associação Brasileira de Normas Técnicas. ABNT NBR 7190-1: Projeto de estruturas de madeira — Parte 1: Critérios de dimensionamento. Rio de Janeiro, 2022

Associação Brasileira de Normas Técnicas. ABNT NBR 7190-5: Projeto de estruturas de madeira — Parte 5: Ensaios de ligações. Rio de Janeiro, 2022.

European Committee For Standardization. EN 1995-1-1 (Eurocode 5): Design of timber structures - Part 1-1: General - Common rules and rules for buildings. Brussels, 2004.

European Committee For Standardization.. EN 26891: Timber structures - Joints made with mechanical fasteners - General principles for the determination of strength and deformation characteristics. Brussels, 1991

Johansen, K. W. (1949). Theory of timber connections. International Association for Bridge and Structural Engineering, 9, 249-262

Pereira, M. C. M. (2019). Painéis de madeira lamelada cavilhada (PLCC): Desenvolvimento e caracterização mecânica de conexões e elementos estruturais (Tese de doutorado). EESC, Universidade de São Paulo, São Carlos SP.

Pereira M.C.M., Sohier L.A.P., Descamps T., Calil Junior C.: Doweled cross laminated timber: Experimental and analytical study, *Construction and Building Materials*, Volume 273, 2021. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.121820

Souza, G. L. de. (2026). Tecnologia na usinagem de madeiras amazônicas abundantes: Estudo e desenvolvimento de equipamentos para a fabricação de cavilhas e painéis PLCC (Tese de doutorado). Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia, Manaus, AM.

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

FIOS ANTIESTÁTICOS DE MICROFIBRILAS DE CELULOSE EM MATRIZ DE ALGINATO

Flavio Rodrigues Lima[1]; Felipe Gabriel Santos Araujo[1]; Gabriel Amado Ferreira Lauria[1]; Tatiana de Fátima Martins Pires[1]; Josy Tainara Silva[1]; Danillo Wisky Silva [2]; Michel Picanço Oliveira[1] e Jordão Cabral Moulin[1]

[1] Departamento de Ciências Florestais e da Madeira, Universidade Federal do Espírito Santo, Brasil.
[2] Klabin – Technology Center,Industrial Research Development and Inovation, Fazenda Monte Alegre, St Harmonia, 03, 84275-000 Telêmaco Borba, PR,Brazil.

Resumo: Este estudo avaliou a influência da incorporação de lignina, carbono de lignina e negro de fumo nas propriedades morfológicas e elétricas de fios produzidos com microfibrilas de celulose (MFC) em matriz de alginato. Os fios foram obtidos por fiação úmida utilizando MFC branqueada e não branqueada e caracterizados por microscopia eletrônica de varredura (MEV) e resistividade elétrica volumétrica (Ω·cm). As análises morfológicas evidenciaram maior porosidade nos fios produzidos com MFC não branqueada, enquanto a incorporação de lignina promoveu estruturas mais compactas. Em contrapartida, o carbono de lignina e o negro de fumo favoreceram o aumento da porosidade. Nos ensaios elétricos, os fios contendo lignina apresentaram os menores valores de resistividade elétrica, atingindo 2,76 × 10^3 Ω·cm, enquanto aqueles contendo negro de fumo apresentaram os maiores valores. Os resultados demonstram que a lignina favorece a compactação estrutural e reduz a resistividade elétrica dos fios, evidenciando seu potencial para o desenvolvimento de fios sustentáveis com propriedades antiestáticas voltados a aplicações têxteis. Esses resultados reforçam a viabilidade da utilização de materiais renováveis em aplicações têxteis funcionais de maior valor agregado.

Palavras-chave: fiação; compósitos; materiais condutores

ANTISTATIC MICROFIBRILLATED CELLULOSE YARNS IN AN ALGINATE MATRIX

Abstract: This study evaluated the influence of lignin, lignin-derived carbon, and carbon black incorporation on the morphological and electrical properties of microfibrillated cellulose (MFC)-alginate yarns. The yarns were produced by wet spinning using bleached and unbleached MFC and characterized by scanning electron microscopy (SEM) and volumetric electrical resistivity (Ω·cm). Morphological analyses revealed greater porosity in yarns produced from unbleached MFC, whereas lignin incorporation promoted more compact structures. In contrast, lignin-derived carbon and carbon black increased yarn porosity. Electrical measurements showed that lignin-containing yarns exhibited the lowest electrical resistivity, reaching 2.76 × 10^3 Ω·cm, while carbon black-containing yarns presented the highest resistivity values. The results demonstrate that lignin enhances structural compactness and reduces the electrical resistivity of the yarns, highlighting its potential for the development of sustainable antistatic yarns for textile applications. These findings further support the feasibility of using renewable materials in high-value functional textile applications.

Keywords: spinning; composites; conductive materials

1. Introdução

A crescente exploração de recursos naturais e a degradação dos ecossistemas têm impulsionado o desenvolvimento de materiais sustentáveis capazes de substituir produtos derivados de fontes não renováveis. Nesse contexto, a celulose destaca-se como o biopolímero mais abundante do planeta e uma alternativa promissora ao petróleo e seus derivados, sendo amplamente encontrada em organismos como plantas, algas, fungos e bactérias (ROCHA et al., 2022; CURVELO, 2020).

Dentre os materiais derivados da celulose, os nanomateriais celulósicos (NMC) têm recebido crescente atenção devido às suas propriedades físicas e mecânicas diferenciadas. Esses materiais abrangem produtos obtidos a partir de diferentes fontes de biomassa em escala nanométrica, incluindo os nanocristais de celulose (NCC) e as microfibrilas de celulose (MFC) (LIU et al., 2021). A MFC, geralmente obtida por processos de fibrilação mecânica de polpas celulósicas, apresenta elevada resistência mecânica, rigidez e área superficial específica, características que favorecem sua aplicação em diversas áreas tecnológicas, incluindo a produção de fibras e fios sustentáveis para o setor têxtil (LIU et al., 2026).

O desenvolvimento de fios à base de MFC representa uma alternativa renovável aos fios convencionais utilizados pela indústria têxtil. Além das propriedades mecânicas adequadas, esses materiais podem ser funcionalizados por meio da incorporação de aditivos capazes de conferir novas funcionalidades, como propriedades antiestáticas e de condução elétrica controlada. Tais características são particularmente importantes em aplicações que exigem dissipação de cargas eletrostáticas, como vestimentas de proteção, ambientes hospitalares, indústrias eletrônicas e áreas com risco de inflamabilidade (CILVELI et al., 2020; XU et al., 2021).

A incorporação de materiais carbonáceos em matrizes celulósicas tem sido investigada como estratégia para reduzir a resistividade elétrica e aumentar a capacidade de dissipação de cargas. Entre os materiais mais promissores destacam-se o negro de fumo e os carbonizados obtidos a partir da lignina. Além de contribuírem para o desempenho elétrico, esses materiais podem agregar valor à subprodutos da cadeia florestal, favorecendo o desenvolvimento de produtos de maior valor agregado e alinhados aos princípios da bioeconomia (CAVALCANTI e SANTOS, 2022).

Dessa forma, a produção de fios de MFC contendo materiais carbonáceos surge como uma alternativa sustentável para obtenção de materiais têxteis funcionais. Nesse contexto, o presente trabalho teve como objetivo avaliar a influência da incorporação de negro de fumo,

lignina e o carbono de lignina nas características ultraestruturais e na resistividade elétrica de fios produzidos a partir das MFC.

2. Material e métodos

2.1 Materiais utilizados

Foram utilizadas MFC provenientes de processamento mecânico industrial e doados por uma empresa brasileira de papel e celulose. Foram usadas MFC de polpa branqueada e não branqueadas de fibras curtas na concentração de 4,5% (m/m), alginato de sódio da marca Êxodo cientifica na concentração de 2% (m/m), cloreto de cálcio na proporção de 1 Mol/L de água destilada, também o hidroxipropilmetilcelulose (HPMC) da marca Sigma na concentração de 1% (m/m), negro fumo, lignina e a carbonácea da lignina em uma concentração de 3% do peso da MFC.

2.2 Preparo das misturas das MFC com as fontes de carbono

O material foi misturado com o auxílio de um agitador mecânico da marca IKA e modelo Eurostar 60 pelo período de 4 horas com uma velocidade de 2000 rpm para que todos os componentes da mistura tenham a melhor interação possível, chegando até uma consistência homogênea. Em seguida no ultra turrax da marca IKA e modelo T18 digital a 10000 rpm por 20 min.

2.3 Composição dos fios

Foram produzidos fios de microfibrilas de celulose (MFC) branqueada e não branqueada em matriz de alginato de sódio (2% m/m) e HPMC (1% m/m), contendo 4,5% m/m de MFC. Além da formulação controle, foram incorporados lignina, carbono de lignina e negro de fumo, previamente peneirados em malha 270 mesh, na proporção de 3% em relação à massa de MFC. As concentrações foram definidas após testes preliminares visando o melhor desempenho mecânico dos fios.

2.4 Produção dos fios

O processo de produção dos fios foi conduzido em (Figura 1) um tubo de ferro galvanizado com aproximadamente 3 metros de comprimento, onde o fio fica submerso em meio a cloreto de cálcio após a injeção dos materiais. Uma bomba periférica ¼ CV para auxiliar o fluxo do material coagulante a uma velocidade constante dentro do tubo, que auxilia na

formação do fio. Uma torneira para o resgate do material de fluxo após a confecção dos fios e um registro que interrompe o fluxo por completo do meio coagulante para o tanque de armazenamento, permitindo assim que a tubulação fique cheia e o fio completamente submerso.

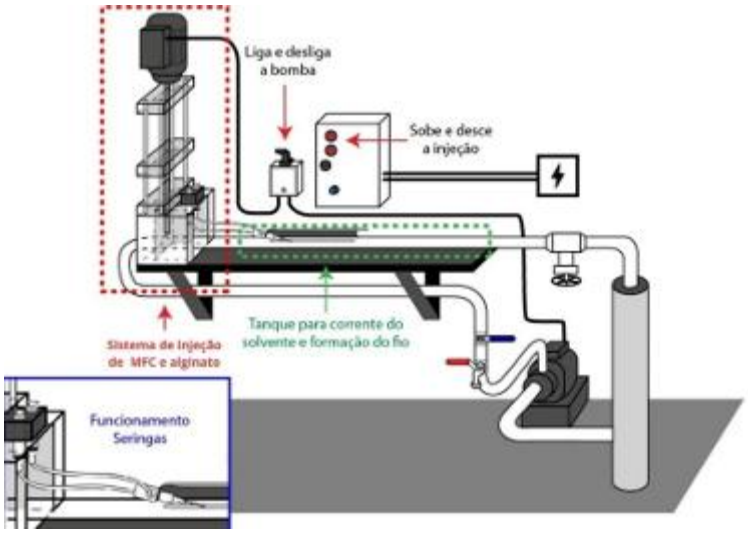


Figura 1. Equipamento utilizado para a produção dos fios. Fonte: Menini et al (2024)., modificado pelo autor.

A injeção dos materiais para a formação do filamento foi feita com o auxílio de uma seringa composta com mistura acoplado a um motor ½ CV acionado por um inversor de frequência com controle de velocidade e sentido de rotação.

Foi utilizado o método de fiação em solução úmida com o solvente em fluxo contínuo. Para isso, o cloreto de cálcio foi mantido em um fluxo com velocidade de 0,242 m/s e a mistura injetada através de uma seringa de 20 mL, acoplada da parte externa de uma agulha 0,806 mm de diâmetro e comprimento de 2,5 cm, a uma taxa constante de 0,5 mL/s. Após sua confecção, os fios foram lavados em um recipiente para retirar o excesso do agente coagulante e posteriormente secos em estufa a uma temperatura de 60 ºC durante 4 horas.

2.5 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

Os fios foram imersos em nitrogênio líquido e cortados em tamanho de aproximadamente 2 cm, colados sob *stubs* metálicos utilizando-se uma fita dupla face de carbono para fixar os fios a base. Posteriormente, foram metalizados utilizando-se ouro, possibilitando assim a obtenção de imagens no MEV JEOL JSM-IT200.

2.6 Resistividade elétrica

A resistividade elétrica dos fios foi determinada utilizando um Megômetro Digital Vonder 5,5 G (100 - 1.000 V). Para cada configuração, o conjunto de cinco fios foram posicionados paralelamente entre as garras do equipamento (Figura 2), mantendo um vão padronizado de 5 cm, que corresponde ao comprimento útil considerado no cálculo elétrico. As medições foram realizadas aplicando-se uma tensão fixa de 250 V, selecionada por apresentar sensibilidade adequada para materiais de alta resistividade.

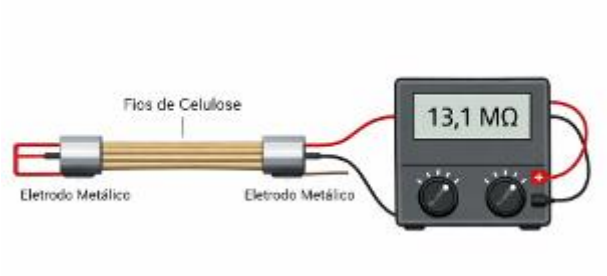


Figura 2. Esquema da análise de resistência elétrica. Fonte: Autoria própria (2026).

Foram realizadas 20 repetições por configuração, registrando-se a resistência elétrica do conjunto de cinco fios. Após a obtenção desses valores, cada fio pertencente às repetições teve seu diâmetro determinado individualmente utilizando microscópio da marca Olympus e modelo LEXT OLS5100, e posteriormente o cálculo da média. A área da seção transversal foi calculada a partir do diâmetro médio e, considerando que a resistência medida se refere a cinco fios em paralelo, utilizou-se a relação equivalente para resistores paralelos, atribuindo ao fio individual uma resistência igual ao valor medido multiplicado por cinco. Todos os fios foram acondicionados em câmara climática em condição de 20ºC e 65% de umidade relativa do ar pelo menos 48 horas antes da análise. A resistividade foi então calculada pela Equação 1.

$$\rho = R \cdot \frac{A}{L} \qquad \textbf{(1)}$$

Em que – ρ: resistividade elétrica (Ω); R: resistência elétrica de um único fio; A: área da seção transversal do fio (m²) L: comprimento do fio entre as garras.

3. Resultados e discussão

3.1 MEV

As imagens de MEV (Figura 3) permitem avaliar a morfologia superficial e a estrutura dos fios, evidenciando a presença de poros, definidos como espaços vazios distribuídos ao longo da matriz polimérica. Todos os fios apresentam uma estrutura interna porosa, onde a distribuição, frequência e tamanho dos poros variam em função do estado de branqueamento da MFC e da fonte de carbono incorporada. Essa porosidade é um indicativo do grau de reorganização das microfibrilas durante a formação do fio e da eficiência de interação entre a matriz celulósica e os aditivos carbonáceos.

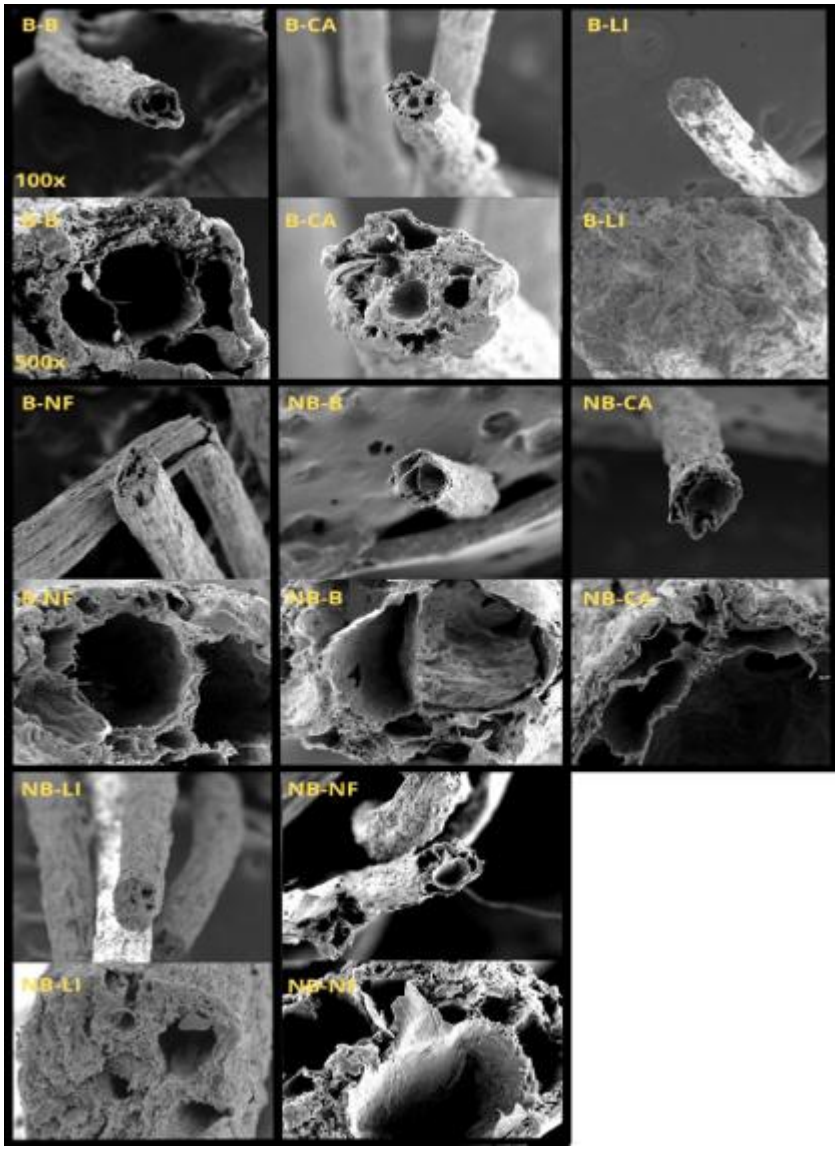


Figura 3. Fios de MFC branqueadas e não branqueadas com as diferentes fontes de carbono. B: sem adição de carbono; CA: Carbonácea de lignina; LI: Lignina; NF: Negro de fumo nas aproximações de 100× e 500×. Fonte: Autoria própria (2026).

Os fios produzidos com MFC não branqueada apresentaram maior frequência de poros e vazios de maiores dimensões quando comparados aos fios produzidos com MFC branqueada, indicando uma estrutura menos homogênea e compacta. Nos fios sem adição de carbono, observou-se elevada porosidade interna, com presença de poros de diferentes tamanhos. Entretanto, o fio produzido com MFC não branqueada (NB-B) apresentou maior incidência de grandes vazios e formato mais arredondado quando comparado ao B-B, sugerindo menor eficiência de empacotamento estrutural.

A adição de lignina (B-LI e NB-LI) promoveu redução da porosidade nos fios, resultando em estruturas mais compactas e contínuas. Esse comportamento sugere que a lignina atuou como agente de preenchimento dos espaços vazios, favorecendo um melhor empacotamento da matriz durante o processo de coagulação e solidificação dos fios.

Nos fios contendo carbono de lignina (B-CA e NB-CA) e negro de fumo (B-NF e NB-NF), observou-se aumento da porosidade superficial, especialmente nos fios contendo negro de fumo. As micrografias evidenciaram regiões com poros de maiores dimensões e paredes irregulares, possivelmente associadas à formação de aglomerados de partículas carbonáceas. Esses aglomerados dificultam a compactação da matriz e favorecem a formação de poros interconectados (NISTICO et al, 2022).

Além disso, a distribuição dos aditivos carbonáceos e a formação de filamentos contínuos dependem fortemente das condições de processamento e da interação entre os componentes da matriz. Conforme descrito por Kafy et al., (2017) as velocidades de injeção da suspensão de MFC e do fluxo do líquido coagulante influenciam diretamente a orientação das fibrilas, afetando a uniformidade estrutural, o grau de preenchimento e a organização interna dos fios. Da mesma forma, segundo Nistico et al., (2022) as propriedades dos compósitos dependem significativamente do teor de enchimento, da distribuição das partículas na matriz e das características intrínsecas dos materiais carbonáceos, como condutividade, geometria, morfologia e relação de aspecto.

3.2 Resistividade elétrica

A resistividade elétrica (Tabela 1), com exceção o negro de fumo, os aditivos carbonáceos na MFC branqueada produziram fios com menor resistividade em comparação com a não branqueada. Isso sugere que a remoção de lignina residual e outras impurezas durante o branqueamento pode favorecer a dispersão e a percolação dos aditivos condutores, que facilitam interações físico-químicas mais homogêneas (KLUNKLIN et al., 2023).

Tabela 1. Resistividade elétrica volumétrica média dos fios.

	Branqueada (Ω·cm)	**Não branqueada (Ω·cm)**
Controle (B)	$5{,}35\times10^{4}$ (-) $2{,}76\times10^{4}$ (+) $1{,}1\times10^{5}$	$1{,}06\times10^{5}$ (-) $4{,}61\times10^{4}$ (+) $2{,}70\times10^{5}$
Carbonácea (CA)	$1{,}87\times10^{4}$ (-) $9{,}22\times10^{3}$ (+) $3{,}32\times10^{4}$	$4{,}64\times10^{4}$ (-) $1{,}24\times10^{4}$ (+) $8{,}23\times10^{4}$
Lignina (LI)	$2{,}76\times10^{3}$ (-) $8{,}88\times10^{2}$ (+) $5{,}91\times10^{3}$	$1{,}90\times10^{4}$ (-) $4{,}75\times10^{3}$ (+) $4{,}17\times10^{4}$
Negro de fumo (NF)	$3{,}47\times10^{5}$ (-) $6{,}85\times10^{4}$ (+) $9{,}23\times10^{5}$	$5{,}19\times10^{4}$ (-)$1{,}47\times10^{4}$ (+) $1{,}56\times10^{5}$

(-) :menor resistividade encontrada; (+): maior resistividade encontrada. Fonte: Autoria própria (2026).

No entanto, a resistividade do fio B-LI ($2{,}76\times10^{3}$ Ω·cm), significativamente menor do que a de compósitos com carbono de lignina e negro de fumo. Isso é contraintuitivo, uma vez que o negro de fumo é classicamente reconhecido como um material condutivo, enquanto a lignina, em sua forma pura, tende a ser mais isolante (ZARE et al., 2026; AMBRICO et al., 2026). Com as imagens do MEV (Figura 3), observa-se que a lignina pode ter formado uma rede mais contínua e aderente à matriz de celulose, enquanto o negro de fumo pode ter sofrido aglomeração e ficou mal disperso, encapsulado e incapaz de estabelecer caminhos condutivos efetivos. Esse fenômeno é corroborado pelo elevado coeficiente de variação (81,19%) do B-NF, que indica alta heterogeneidade e problemas de reprodutibilidade.

Segundo Sankaran et al. (2018), quando o material de enchimento é adicionado à matriz, forma-se uma rede condutora que pode ser descrita pela teoria da percolação que descreve a condutividade. Nessa teoria, o limiar de percolação e a concentração mínima de material de enchimento necessária para formar uma rede condutora contínua, permitindo o transporte de cargas elétricas no compósito. Quanto menor esse limiar, menor é a fração volumétrica exigida para que o material apresente comportamento antiestático. A condutividade desses compósitos é influenciada por dois tipos principais de resistência: a resistência intrínseca, associada às propriedades elétricas do próprio material de enchimento, e a resistência de tunelamento,

relacionada às interações entre partículas de enchimento e entre o enchimento e a matriz polimérica (FOLORUNSO et al., 2021).

As duas resistências são fortemente afetadas pela área superficial, porosidade, estrutura e presença de funcionalidades residuais do material. No negro de fumo, o tunelamento elétrico é o mecanismo elétrico dominante, que envolve a corrente elétrica fluindo entre os aglomerados de negro de fumo que estão próximos, saltando a matriz isolante (NISTICÒ et al. 2022). Estudos de Sánchez-González et al. (2005) observaram um aumento significativo na condutividade elétrica em compósitos com negro de fumo quando o material é submetido à compressão mecânica, uma vez que a compressão causa uma redução na distância entre as partículas de enchimento no compósito.

4. Conclusões

As fontes de carbono avaliadas influenciaram a estrutura e a resistividade elétrica dos fios de MFC. A lignina promoveu maior compactação estrutural e apresentou os menores valores de resistividade elétrica, enquanto o negro de fumo resultou em maior porosidade e menor desempenho de dissipação elétrica. Dessa forma, a lignina mostrou-se a alternativa mais promissora para a produção de fios celulósicos antiestáticos destinados a aplicações têxteis.

5. Agradecimentos

Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação do Espírito Santo (FAPES)

6. Referências bibliográficas

Ambrico, M. et al. (2026). Lignin for sustainable electronics: the interplay of structure, morphology and chemistry in modelling dielectric properties. **Journal of Materials Chemistry A**. https://doi.org/10.1039/D5TA05024C

Cavalcanti, A. M.; dos santos, G. F. (2022). A indústria têxtil no Brasil: uma análise da importância da competitividade frente ao contexto mundial. **Exacta**, v. 20, n. 3, p. 706-726. https://doi.org/10.5585/exactaep.2021.17784

Cilveli, G. et al. (2020). Electrostatic properties of clothing fabrics suitable for different end-uses. **Fibres & Textiles in Eastern Europe**, n. 139, p. 50-57. https://doi.org/10.5604/01.3001.0013.5858

Curvelo, I. C. G. (2020). A sustentabilidade na gestão do portfólio de produtos: um estudo sobre o desenvolvimento de produtos sustentáveis. Tese (Doutorado) – **Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil**. https://doi.org/10.11606/D.12.2020.tde-19122019-154847

Folorunso, O. et al. (2021). Investigation and modeling of the electrical conductivity of graphene nanoplatelets-loaded doped-polypyrrole. **Polymers**, v. 13, n. 7, p. 1034. https://doi.org/10.3390/polym13071034

Kafy, A. et al. (2017). Cellulose long fibers fabricated from cellulose nanofibers and its strong and tough characteristics. **Scientific Reports**, v. 7, n. 1, p. 17683. https://doi.org/10.1038/s41598-017-17713-3

Klunklin, W. et al. (2023). Effect of bleaching processes on physicochemical and functional properties of cellulose and carboxymethyl cellulose from young and mature coconut coir. **Polymers**, v. 15, n. 16, p. 3376. https://doi.org/10.3390/polym15163376

Liu, H. et al. Turning microfibrillated cellulose into continuous filaments through interfacial binding with dissolved cellulose. **Chem Circularity**, v. 1, n. 1, 2026.

Liu, Y. et al. (2021). A review of cellulose and its derivatives in biopolymer-based food packaging application. **Trends in Food Science & Technology**, v. 112, p. 532-546. https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.04.016

Menini, P. D. et al. (2024). Development of microfibrillated cellulose filaments using xanthan and guar gums. **Cellulose**, v. 31, n. 14, p. 8609-8623. https://doi.org/10.1007/s10570-024-06134-x

Nisticò, R. et al. (2022). The role of inorganic fillers in electrostatic discharge composites. **Inorganics**, v. 10, n. 12, p. 222. https://doi.org/10.3390/inorganics10120222

Rocha, J. H. A., Farias, L. N., Siquiera, T. P. L. (2022) Cellulose nanofibers (CNF) as reinforcement for cementitious matrices: A systematic literature review. **Revista ALCONPAT**, v. 12, n. 3, p. 311-327. https://doi.org/10.21041/ra.v12i3.594

Sánchez-González, J. et al. (2005). Electrical conductivity of carbon blacks under compression. **Carbon**, v. 43, n. 4, p. 741-747. https://doi.org/10.1016/j.carbon.2004.10.045

Sankaran, S. et al. (2018). Recent advances in electromagnetic interference shielding properties of metal and carbon filler reinforced flexible polymer composites: A review. Composites Part A: **Applied Science and Manufacturing**, v. 114, p. 49-71. https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2018.08.006

Xu, C. et al. Enhancing anti-static performance of fibers by construction of the hybrid conductive network structure on the fiber surface. **Polymers**, v. 13, n. 14, p. 2248, 2021. https://doi.org/10.3390/polym13142248

Zare, Y. et al. (2026). Estimation of electrical conductivity for polymer composites with carbon black nanoparticles by interphase depth, tunneling characteristics and network percentage. **Scientific Reports**. https://doi.org/10.1038/s41598-026-41789-5

712. Handfeel: Percepção dos Aspectos de Maciez em Papéis Tissue de uso Doméstico

Mariana Correa Dos Santos[1]; Fernando José Borges Gomes[1] Nilton Louvem da Silva Júnior[1]; Larisse Aparecida Ribas Batalha[1]; Roberto Carlos Costa Lelis[1]

[1] Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Instituto de Florestas. Seropédica, Rio de Janeiro, Brasil.

Resumo: Na indústria de papel tissue, uma das características que é muito valorizada é a maciez . Neste contexto, o presente estudo teve como objetivo comparar propriedades físicas e mecânicas de folhas simples e duplas, através da implementação do painel Handfeel em condições fabris. Foram selecionadas 6 marcas nacionais de cada tipo. As amostras foram climatizadas a 23 ± 1 °C e 50 ± 2 % de umidade por 24 h. A metodologia empregou o N-SPT com 10 painelistas não treinados, que preencheram formulários emocionais durante o experimento. Realizaram-se testes de espessura e tração, nas quais, a espessura variou de 0,042 a 0,055 mm para folha simples e 0,085 a 0,1 mm para folha dupla) ea tração variou de 0,12 a 0,21 para folha simples e 0,24 a 0,35 para folha dupla. Os *rankings* do Handfeel foram consistentes entre as classificações inicial e final. O N-SPT mostrou-se acurado para a análise sensorial. Os resultados físicos confirmaram diferenças significativas, com as folhas duplas apresentando maior espessura e resistência.

Palavras-chave: maciez; análise sensorial; resistência mecânica.

a. Handfeel: Perception Of Softness Characteristics In Household Tissue Paper

713.

Abstract:. In the tissue paper industry, softness is one of the most highly valued characteristics. In this context, the objective of this study was to compare the physical and mechanical properties of single-ply and double-ply sheets using the Handfeel panel under manufacturing conditions. Six domestic brands of each type were selected. The samples were conditioned at 23 ± 1 °C and 50 ± 2% humidity for 24 hours. The methodology employed the N-SPT with 10 untrained panelists, who completed emotional rating forms during the experiment. Thickness and tensile strength tests were conducted, in which thickness ranged from 0.042 to 0.055 mm for single-ply and 0.085 to 0.1 mm for double-ply, and tensile strength ranged from 0.12 to 0.21 for single-ply and 0.24 to 0.35 for double-ply. The handfeel rankings were consistent between the initial and final evaluations. The N-SPT proved to be accurate for sensory analysis. The physical

results confirmed significant differences, with double sheets exhibiting greater thickness and strength..

Keywords: softness; sensory analysis; mechanical strength.

1. Introdução

A importância do subsetor tissue, da indústria de celulose e papel tem levado à valorização da opinião do consumidor desses produtos como um indicador chave de qualidade. Entre os atributos mais desejados, destacam-se a maciez e a suavidade, que são cruciais para uma experiência de uso satisfatória e influenciam diretamente o valor do produto. No entanto, a avaliação dessas características é subjetiva, variando conforme a percepção de cada indivíduo, o que dificulta sua medição precisa (PAWLAK *et al.*, 2022).

O papel higiênico, um produto do seguimento *tissue*, é projetado para fins sanitários e inclui também produtos como lenços, papel-toalha e guardanapos. Uma característica do papel *tissue* é sua porosidade, que está diretamente relacionada à capacidade de absorver líquidos (FOELKEL *et al.*, 2016, COUTINHO *et al.*, 2023).

A formação do papel *tissue* depende de uma rede de fibras de celulose, cuja qualidade é influenciada por métodos de produção e pela escolha da matéria-prima empregada. Tais fatores influenciam diretamente a maciez, estrutura das fibras, absorção de água e resistência à tração e à umidade, que são adaptadas de acordo com as necessidades da aplicação final (MILANEZ e ROST, 2005; ISMAIL *et al.*, 2020).

Quando comparadas com as fibras longas, as fibras curtas (encontradas nas espécies *Eucalyptus* spp.) têm vantagens econômicas, em decorrência da menor quantidade de madeira utilizada para a produção de uma tonelada de celulose. Outro ponto, as fibras longas são responsáveis pela maior sensação de aspereza e em contrapartida, as fibras curtas de eucalipto com o mínimo refino apresentam uma excelente sensação tátil de maciez (FOELKEL *et al.*, 2016).

O painel *handfeel* é uma análise sensorial que avalia a maciez de produtos do segmento tissue. Este método mede, qualitativamente, a percepção tátil dos participantes, que são instruídos a classificar as amostras com base na sensação de maciez. O Novo Teste de Painel Sensorial (N-SPT) se diferencia do tradicional SPT por não exigir que os painelistas recebam treinamento prévio em análise sensorial, o que permite uma classificação inicial mais

espontânea (KO *et.al.*, 2017; PAWLAK *et al.*, 2022). O *handfeel* permite classificar e ranquear diferentes marcas de papel, desde a mais macia até a menos macia, visando obter uma avaliação comparativa para entender melhor o produto (PAWLAK *et al.*, 2022);

O presente estudo tem como objetivo avaliar a maciez de diferentes tipos de papéis tissue, por meio do método N-SPT (Novo Teste de Painel Sensorial), descrito por Lee et.al., 2017. .

2. Material e métodos

As amostras de papel tissue nacionais foram adquiridas de forma aleatória em redes de atacado e varejo e, posteriormente, identificadas quanto à marca, totalizando 6 amostras de folhas simples (A, B, C, D, E e F) e 6 de folhas duplas (G, H, I, J, K e L). As 6 amostras passaram pelo processo de climatização em ambiente controlado de umidade 50 ± 2% e temperatura 23 ± 1°C antes dos testes mecânicos e físicos. Para os testes sensoriais de maciez (HandFeel) foram utilizadas em temperatura e condição ambiente e local controlado contra interferências externas às condições de receptividade do consumidor.

2.1. HandFeel – Análise de Maciez

O Novo Teste de Painel Sensorial (NSPT) foi utilizado, por incluir uma etapa inicial de classificação sem treinamento prévio. Dez voluntários participaram de oito sessões, no total:'

Classificação livre – Primeira impressão das amostras.

- **Treinamento** – Duas sessões para familiarização com os critérios de avaliação.
- **Análise final** – Cinco sessões de testes após o treinamento.

Todas as etapas foram realizadas em ambiente controlado para assegurar a consistência dos resultados. Todos os painelistas foram colocados em uma sala de, de maneira que não pudessem ver uns aos outros, e com as mãos dispostas para trás, as amostras foram entregues, realizando, assim, a análise de maciez superficial e estrutural.

No início de cada sessão, os avaliadores preencheram um questionário sobre seu estado emocional (escala de 1 a 5, onde 1 = "péssimo" e 5 = "ótimo"). Essa abordagem permitiu investigar se o humor dos participantes influenciou suas respostas, adicionando uma camada psicométrica à análise.

Questionário aplicado aos avaliadores para avaliar o estado emocional no momento do teste:

Como você classifica o seu sentimento de bem-estar hoje?

Como você classifica o seu nível de atenção hoje?

Como você classifica o seu nível de disposição ao acordar hoje?

Como você classifica a sua condição de saúde hoje?

A rotina dos painelistas durante os 8 dias ocorreu da seguinte forma:

- Dia 1: Classificação Inicial:

Os colaboradores classificaram as amostras por ordem de maciez, sem nenhum nivelamento e, considerando apenas o seu entendimento do conceito**.** Com as classificações apontadas, foi realizada uma avaliação de moda, construindo então um ranking entre as amostras, da mais para a menos macia. A partir desse resultado, foram criados os pares a serem comparados nos painéis seguintes, construindo com os materiais de maciez mais próxima, para assim testar a capacidade dos painelistas após o treinamento e nivelamento de identificação da maciez estrutural e superficial.

- Dia 2:

Os painelistas passaram por um treinamento de nivelamento de conhecimento técnico, teórico e prático, sobre a fabricação e as propriedades do papel tissue e quais destas interferem na maciez do produto, e quanto ao método de análise de HandFeel, comparando amostras de maior e menor discrepância de maciez em uma análise sensorial de superfície e estrutural, aprendendo a identificar a suavidade, maleabilidade e ruídos em cada amostra.

- Dias 3, 4, 5, 6, 7

O 2º passo (treinamento) foi repetido mais duas vezes em dias diferentes, para medir as possibilidades de interferência da situação emocional do colaborador de acordo com diagnóstico realizado em cada etapa, quanto a sua análise sensitiva, entendendo essa relação com a eficiência da análise sensorial e possível associação ao sentimento do consumidor.

- Dia 8 – Classificação Final

Por fim, os painelistas treinados e com determinada experiência adquirida, foram submetidos novamente a uma classificação das amostras, indicando em ordem decrescente dá mais para menos macia, agora utilizando dos conhecimentos técnicos, teóricos e práticos adquiridos.

2.2. Avaliação das propriedades físico- mecânicas das amostras de papel tissue

As amostras foram avaliadas quanto à espessura (TAPPI T 551 om-06), gramatura (TAPPI T 410 om-08), resistência a tração (TAPPI T 494 om-06), volume específico aparente (TAPPI T 220 sp-06).

2.3. Delineamento Inteiramente Casualisado (DIC)

Para a aplicação do tratamento estatístico, as amostras foram coletadas de forma aleatória, a fim de assegurar a casualidade do processo. Esse procedimento foi adotado na análise de tração, abrangendo tanto folhas simples quanto folhas duplas. Foram utilizados 6 tratamentos (marcas dos papéis higiênicos) e 4 repetições por tratamento.

a. 3. Resultados e discussão

3.1 Avaliação Sensorial de Maciez (HandFeel – N-SPT)

O painel sensorial HandFeel permitiu estabelecer um ranqueamento das amostras quanto à percepção de maciez. A classificação obtida após as sessões de treinamento apresentou elevada concordância com a classificação inicial, indicando que o método apresentou boa repetibilidade e consistência entre os avaliadores. Esse resultado demonstra que, mesmo sem treinamento prévio, os participantes foram capazes de identificar diferenças de maciez entre as amostras, enquanto o treinamento contribuiu para reduzir a variabilidade das avaliações e aumentar a confiabilidade dos resultados (PAWLAK et al., 2022).

A aplicação do questionário de diagnóstico emocional ao início de cada sessão, com escala de 1 a 5 pontos para bem-estar, atenção, disposição e condição de saúde, acrescentou uma dimensão psicométrica à análise. Os resultados apontaram que o estado emocional dos painelistas não comprometeu a consistência das avaliações ao longo das oito sessões, sugerindo que o método N-SPT é robusto frente a variações individuais cotidianas. Esse achado é relevante para a aplicação industrial do método, pois indica que um painel não especializado, conduzido em condições de rotina fabril, pode gerar resultados reprodutíveis e confiáveis.

De acordo com Zollner-Croll e Wölfle (2021), a maciez do papel tissue pode ser decomposta em duas dimensões principais: a maciez de superfície (surface softness), relacionada à suavidade ao toque e à rugosidade superficial, e a maciez estrutural (bulk softness), associada à elasticidade, espessura e rigidez à flexão da folha. O método HandFeel, ao incorporar uma etapa de avaliação sensorial de superfície e uma de avaliação estrutural durante as sessões detreinamento, contempla ambas as dimensões, o que torna os resultados do N-SPT

comparáveis àqueles obtidos por instrumentos como o Analisador de Maciez Tissue (TSA), que integra parâmetros mecânicos e acústicos para estimar a maciez global.

3.2 Avaliação das propriedades físico-mecânicas das amostras de papel tissue

3.2.1 Espessura e Gramatura

Os resultados de espessura e gramatura obtidos nas amostras de folha simples variaram, respectivamente, de 0,040 a 0,057 mm e de 15,06 a 17,80 g/m² (Tabela 3), enquanto nas folhas duplas os valores de espessura ficaram entre 0,091 e 0,107 mm e a gramatura entre 26,56 e 30,03 g/m² (Tabelas 4). A distinção entre os dois grupos é esperada e reflete a diferença estrutural intrínseca entre produtos de folha simples e folha dupla. Entretanto, mesmo dentro de cada grupo, observou-se variabilidade, evidenciando que as marcas comerciais analisadas não obedecem a um padrão uniforme de especificação.

Tabela 1. Resultados obtidos nas diferentes propriedades físico-mecânicas de folhas simples

Propriedades	**Amostras**					
	A	B	C	D	E	F
Espessura (mm)	0,046	0,054	0,044	0,044	0,048	0,057
Gramatura (g/m²)	16,93	17,08	16,38	15,06	17,80	17,79
Índice de Tração (kN.m/kg)	5,76	4,45	7,77	4,98	7,68	3,49
Volume Específico Aparente (cm³/g)	2,71	3,16	2,68	2.92	2,69	3,20

Tabela 2 - Resultados das análises das Propriedades Físico-Mecânicas de folhas duplas

Propriedades	**Amostras**					
	G	H	I	J	K	L
Espessura (mm)	0,097	0,091	0,092	0,095	0,107	0,095
Gramatura (g/m²)	29,65	26,56	27,70	28,06	29,36	30,03
Índice de Tração (kN.m/kg)	4,42	5,24	4,03	3,60	4,05	6,98
Volume Específico Aparente (cm³/g)	3,27	3,42	3,32	3,38	3,64	3,16

A espessura é uma propriedade que indica a distância entre as duas faces do papel e está diretamente relacionada ao volume específico aparente e, por consequência, à percepção de maciez estrutural. Foelkel (2007) destaca que, para papéis tipo tissue, são desejáveis fibras de maior espessura de parede e menor colapsabilidade, pois fibras cilíndricas e rígidas promovem uma estrutura porosa e volumosa na folha, aumentando a espessura e a sensação de maciez ao toque. O autor ressalta que polpas kraft de eucalipto com baixo teor de hemiceluloses, baixo IRA (índice de retenção de água) e baixo grau de refino apresentam menor colapsabilidade de fibras, resultando em maior volume específico e maior maciez estrutural, exatamente as características observadas nas amostras de maior espessura e melhor classificação no painel HandFeel.

3.2.2 Volume específico aparente

As figuras anteriores mostram a variabilidade do volume aparente das amostras. Para as folhas simples, esse parâmetro variou de 2,68 (amostra C) a 3,20 cm^3/g (amostra F), enquanto para as folhas duplas os valores oscilaram entre 3,16 (amostra Q) e 3,64 cm^3/g (amostra P). De modo geral, as folhas duplas apresentaram volumes específicos superiores, o que reflete uma estrutura mais porosa e volumosa, favorável à percepção de maciez e absorção.

Segundo Foelkel (2007), o volume específico do papel tissue é inversamente proporcional ao grau de ligação interfibras: menor ligação resulta em estrutura mais frouxa e volumosa, favorecendo a maciez estrutural. O autor recomenda que polpas destinadas à produção de tissue apresentem baixa habilidade de ligação, baixa colapsabilidade de fibras e baixo grau de refino, visando obter folhas com elevado volume e porosidade.

3.2.3 Índice de Tração e Análise Estatística

O índice de tração das folhas simples variou de 3,49 kN·m/kg (amostra F) a 7,77 kN·m/kg (amostra C), enquanto nas folhas duplas os valores situaram-se entre 3,60 (amostra O) e 6,98 kN·m/kg (amostra Q). A análise estatística pelo Delineamento Inteiramente Casualizado (DIC) com o teste de Tukey revelou que, nas folhas simples, as amostras C e E foramestatisticamente superiores à amostra F ($p < 0,05$), não havendo diferença significativa entre C e E. A classificação decrescente obtida foi: C > E > A > D > B > F.

A resistência à tração em papéis tissue deve ser interpretada com cautela, pois reflete uma relação de compromisso com a maciez. Foelkel (2007) explica que, para papéis tissue, a

resistência à tração deve ser "na medida" — suficiente para garantir a integridade funcional do produto durante o uso (resistência à umidade e ao rasgo em uso), mas não tão elevada a ponto de indicar alta ligação interfibras, o que comprimiria as fibras, densificaria a folha e prejudicaria o volume, a porosidade e a maciez. Nessa perspectiva, os valores de índice de tração encontrados nas amostras deste estudo (3,49 a 7,77 kN·m/kg para folhas simples) situam-se em faixas compatíveis com papéis tissue de uso doméstico.

Foelkel (2007) indica como ideal para tissue um índice de tração inferior a 20 Nm/g, pois valores elevados indicam alta ligação interfibras, que densifica a folha e reduz o volume específico e a maciez.

Pawlak et al. (2022) discutem que a maciez de superfície (*surface softness*) é influenciada pela rugosidade superficial e pelo coeficiente de atrito, sendo que folhas com menor resistência à tração tendem a apresentar fibras menos compactadas e maior densidade de fibras livres na superfície, o que reduz o coeficiente de atrito e proporciona maior suavidade ao toque. Os autores citam que, em modelos preditivos de maciez, aproximadamente 60% da percepção subjetiva está associada ao atrito superficial e 40% à rigidez estrutural (*bulk stiffness*), reforçando a relevância de ambos os componentes para a qualidade final do produto.

3.3 Relação entre propriedades físico-mecânicas e percepção sensorial de maciez

A comparação entre o ranqueamento obtido pelo painel HandFeel e os resultados das propriedades físico-mecânicas permite identificar tendências relevantes. As amostras de folha simples que apresentaram maior volume específico aparente (amostras B e F, com 3,16 e 3,20 cm^3/g, respectivamente) não corresponderam necessariamente às mais bem ranqueadas no painel sensorial, sugerindo que a maciez percebida não é determinada por uma única propriedade, mas pela interação entre múltiplos atributos ,volume, espessura, rugosidade superficial e rigidez à flexão. A amostra F, apesar de apresentar o maior volume específico entre as folhas simples (3,20 cm^3/g), obteve o pior resultado no índice de tração (3,49 kN·m/kg) e foi estatisticamente inferior às demais no teste de Tukey, o que indica que a baixa integridade estrutural pode ter influenciado negativamente a percepção sensorial de maciez, possivelmente pelo excesso de rugosidade ou inconsistência ao toque.

3.4 Análise estatística

O teste de Tukey confirmou diferenças significativas entre os tratamentos (Figura 1). Os tratamentos C e E foram estatisticamente superiores ao tratamento F ($p < 0,05$). Não houve

diferenças significativas entre C e E, indicando que ambos são igualmente eficazes. Recomenda-se a adoção do tratamento C ou E para obter os melhores resultados.

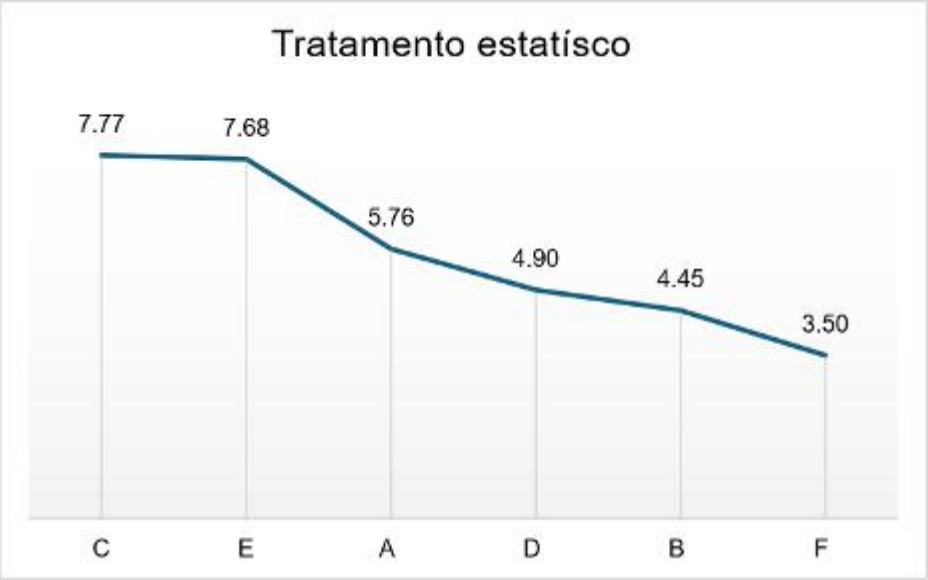


Figura 1 – Análise estatística

b.

4. Conclusões

c. As amostras de papel higiênico de folha simples apresentaram menores gramaturas, o que nos leva a uma maior sensação de aspereza em comparação às amostras de folha dupla. Quanto a classificação ranqueada do Handfeel, os resultados obtidos foram semelhantes na classificação inicial e final demonstrando acuracidade no método.utilizado (N-SPT).

5. Agradecimentos

Este trabalho foi realizado e financiado graças ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), na modalidade ITI-MAI-DAI, com apoio da Fundação Carlos Chagas Filho de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro (FAPERJ).

d.

6. Referências bibliográficas

ALMEIDA, S. L; GRANDI, J.G.R. Aspectos da formação que influenciam sobre a maciez/suavidade (*handfeel*) em papel tissue. Albany international - momento técnico. 13, número 38, 2017.

CABRAL, C. R. A.; PIRES, E. D. Propriedades e características que influenciam o consumidor do papel *tissue*. 2011. Trabalho de conclusão de curso (Tecnólogo em Tecnologia em Processos Químicos) - Faculdade de Pindamonhangaba, Pindamonhangaba, SP. 2011.

COUTINHO, Marcelle Robledo. Avaliação da maciez e das propriedades mecânicas de papéis sanitários comerciais. 36 f. Monografia (Engenharia Florestal) - Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, 2023.

FOELKEL, Celso. As fibras dos eucaliptos e as qualidades requeridas na celulose kraft para a fabricação de papel. Eucalyptus online book & newsletter, v. 79, 2007.

FOELKEL, C. As Fibras Celulósicas de Eucaliptos na Produção de Papéis Tissue de Elevados Níveis de Maciez e Absorção. In: PinusLetter / Eucalyptus Newsletter no 52 – Agosto de 2016

ISMAIL, Mostafa Y. et al. Surface analysis of tissue paper using laser scanning confocal microscopy and micro-computed topography. Cellulose, v. 27, p. 8989-9003, 2020.

KO, Y.C., Park, J.Y., Lee, J.H. and Kim, H.J.. Principles of developing a softness evaluation technology for hygiene paper. Journal of Korea Tappi *49*(4), pp.184-193, 2017

MILANEZ, Augusto F.; ROST, E. M. Antena Tecnológica: Tissue Paper. Relatório técnico, 2005.

PAWLAK, Joel J. *et al*. The softness of hygiene tissue. BioResources, v. 17, n. 2, p. 3509, 2022.

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Influência da concentração de NaOH na polpação soda de *Erythrina poeppigiana* (Walp.) O.F. Cook

Ricardo Gabriel de Almeida Mesquita[1,3]; Paulo Roberto Santos Josino[2]; Adeilson Carvalho[3]; Antônio Claret de Matos[3]; Lina Bufalino[2]; Lourival Marin Mendes[3]; Elisângela Elena Nunes Carvalho[3]; José Benedito Guimarães Júnior[3]

[1] Universidade Federal do Sul da Bahia
[2] Universidade Federal Rural da Amazônia
[3] Universidade Federal de Lavras

Resumo: *Erythrina poeppigiana* (Walp.) O.F. Cook apresenta potencial para produção de polpa celulósica, aplicação ainda pouco explorada. Este trabalho avaliou NaOH a 16, 18 e 20% na polpação soda da espécie e seus efeitos no rendimento e nas propriedades de folhas laboratoriais. A polpação foi realizada a 165 °C por 60 min, com relação licor:material de 8:1. Foram determinados os rendimentos bruto e depurado, rejeitos e propriedades físicas e mecânicas das folhas produzidas. O aumento de NaOH reduziu os rendimentos e elevou os rejeitos. Gramatura, espessura e densidade aparente não diferiram entre os tratamentos, enquanto E18 e E20 apresentaram menor permeância ao ar. Todas as folhas perderam a integridade estrutural durante o ensaio $Cobb_{60}$. Entre as condições avaliadas, 20% de NaOH proporcionou, de modo geral, os maiores valores das propriedades mecânicas, embora associado ao menor rendimento da polpa, indicando efeitos distintos da concentração alcalina sobre o rendimento e as propriedades das folhas.

Palavras-chave: Biomassa lignocelulósica; Folhas laboratoriais; Polpa celulósica.

Influence of NaOH concentration on soda pulping of *Erythrina poeppigiana* (Walp.) O.F. Cook

Abstract: *Erythrina poeppigiana* (Walp.) O.F. Cook has potential for pulp production, an application that remains poorly explored. This study evaluated NaOH concentrations of 16, 18, and 20% in soda pulping of the species and their effects on yield and laboratory handsheet properties. Pulping was performed at 165 °C for 60 min using a liquor-to-material ratio of 8:1. Gross and screened yields, rejects, and physical and mechanical properties of the handsheets were determined. Increasing NaOH concentration reduced pulp yields and increased rejects. Grammage, thickness, and apparent density did not differ among treatments, whereas E18 and E20 showed lower air permeance. All handsheets lost structural integrity during the $Cobb_{60}$ test. Among the evaluated conditions, 20% NaOH generally resulted in the highest mechanical property values, although it was associated with the lowest pulp yield, indicating distinct effects of alkali concentration on pulp yield and handsheet properties.

Keywords: Cellulosic pulp; Laboratory handsheets; Lignocellulosic biomass.

1. Introdução

A indústria de polpa celulósica e papel depende predominantemente da madeira como fonte de fibras, o que tem estimulado a busca por matérias-primas lignocelulósicas alternativas capazes de complementar os recursos florestais convencionais. Resíduos agrícolas, agroflorestais e outras biomassas lignocelulósicas apresentam ampla disponibilidade e podem contribuir para o aproveitamento integral da biomassa, a agregação de valor a subprodutos e desenvolvimento de materiais de base renovável (Abd El-Sayed et al., 2020; Haile et al., 2023; Li et al., 2023; Worku et al., 2023).

Diversos materiais lignocelulósicos têm sido investigados para produção de polpa celulósica e papel, incluindo palha de arroz (Rodríguez et al., 2010), fibras de palmeiras (Hawanis et al., 2025), fibras de açaí (Oliveira et al., 2024), resíduos de fique (Jaramillo et al., 2025) e fibras de bambu (Bonfatti Júnior et al., 2019). Esses estudos evidenciam o potencial de matérias-primas alternativas para ampliar a base de recursos utilizados pela indústria de polpa celulósica e papel.

Entre as espécies florestais de rápido crescimento e ainda subutilizadas destaca-se *Erythrina poeppigiana* (Walp.) O.F. Cook, amplamente empregada como árvore de sombreamento em sistemas agroflorestais, especialmente em cultivos de cacau (Cabruca), apresentando elevada produção de biomassa e potencial para aplicações de maior valor agregado (Custódio et al., 2025; Assane et al., 2026).

Nos últimos anos, o aproveitamento tecnológico de *E. poeppigiana* tem sido direcionado principalmente ao desenvolvimento de produtos engenheirados de madeira. A espécie foi avaliada na produção de compensados, demonstrando viabilidade técnica para essa aplicação (Farias et al., 2024). Posteriormente, sua utilização foi investigada na fabricação de painéis particulados, cujos resultados confirmaram sua viabilidade técnica e ambiental como matéria-prima lignocelulósica alternativa (Farias et al., 2026). Além disso, partículas da espécie foram empregadas na produção de painéis madeira-cimento (Custódio et al., 2025) e, mais recentemente, em compósitos de fibrocimento, nos quais a mineralização das partículas associada à carbonatação acelerada promoveu melhorias nas propriedades físicas e mecânicas dos compósitos (Assane et al., 2026).

Apesar dos avanços observados para produtos engenheirados, a utilização de *E. poeppigiana* para produção de polpa celulósica e papel ainda é pouco explorada. Na polpação soda, o hidróxido de sódio promove a solubilização parcial da lignina e de outros constituintes da parede celular, favorecendo a individualização das fibras e a obtenção da polpa celulósica. A intensidade desse processo depende das condições de cozimento, especialmente da carga

alcalina empregada, que influencia simultaneamente o rendimento da polpa, a formação de rejeitos e as propriedades físicas e mecânicas das folhas laboratoriais produzidas (Li et al., 2023; Oliveira et al., 2026; Rodríguez et al., 2010; Sharma et al., 2020).

Dessa forma, este trabalho teve como objetivo avaliar a influência de três concentrações de hidróxido de sódio (16, 18 e 20%) na polpação soda de *E. poeppigiana*, bem como seus efeitos sobre o rendimento da polpa, a formação de rejeitos e as propriedades físicas e mecânicas de folhas laboratoriais.

2. Material e métodos

2.1 Matéria-prima e polpação soda

A madeira de *Erythrina poeppigiana* (Walp.) O.F. Cook foi utilizada como matéria-prima para produção da polpa celulósica. Inicialmente, a madeira foi transformada em partículas do tipo *slivers*, empregadas nos cozimentos.

A polpação soda foi realizada em digestor rotativo laboratorial (Regmed®, Brasil), utilizando 1 kg de material em base seca por cozimento. Foram avaliadas três concentrações de hidróxido de sódio, correspondentes a 16% (E16), 18% (E18) e 20% (E20), calculadas em relação à massa seca da biomassa. A relação licor:material foi de 8:1. Os cozimentos foram conduzidos a 165 °C durante 60 min, contabilizados após o atingimento da temperatura máxima. Cada condição experimental foi realizada em duplicata.

Após os cozimentos, as polpas foram lavadas até atingir pH aproximadamente neutro, depuradas em depurador Somerville equipado com peneira de 0,20 mm durante 20 min e, posteriormente, desagregadas em desintegrador laboratorial para obtenção de uma suspensão homogênea destinada à produção das folhas laboratoriais.

2.2 Produção das folhas laboratoriais

As folhas laboratoriais foram produzidas em formador de folhas (Regmed®, Brasil), conforme a norma TAPPI T205 sp-95, com gramatura nominal de 60 g m^{-2}. Para cada tratamento foram confeccionadas 25 folhas.

Após a formação, as folhas foram prensadas durante 2 min, fixadas em molduras metálicas e secas em condições ambientais até completa estabilização.

2.3 Caracterização das polpas e das folhas

Após a polpação foram determinados o rendimento bruto, o rendimento depurado e o teor de rejeitos.

As folhas laboratoriais foram caracterizadas quanto à gramatura (TAPPI T410 om-98), espessura (TAPPI T411 om-97), densidade aparente, permeância ao ar (TAPPI T 460 om-96), absorção de água ($Cobb_{60}$) (TAPPI T441 om-98) e propriedades mecânicas sob tração (ISO 1924-2:2008). A densidade aparente foi calculada a partir da gramatura e da espessura das folhas.

2.4 Análise estatística

Inicialmente, os dados foram submetidos aos testes de Shapiro-Wilk e Levene para verificação da normalidade e da homogeneidade das variâncias. Posteriormente, foram submetidos à análise de variância (ANOVA), seguida pelo teste de Tukey, adotando-se nível de significância de 5%.

Os resultados das propriedades físicas e mecânicas foram apresentados como média ± intervalo de confiança de 95%, enquanto o teor de rejeitos foi expresso como média ± desvio-padrão. As análises estatísticas foram realizadas no software R.

O ChatGPT (OpenAI) foi utilizado para revisão gramatical, melhoria da redação e verificação da formatação do manuscrito.

3. Resultados e discussão

O aumento da concentração de NaOH reduziu progressivamente o rendimento da polpa (Tabela 1). O rendimento bruto diminuiu de 42,80% para 37,40%, enquanto o rendimento depurado reduziu de 42,20% para 36,00% com o aumento da concentração alcalina de 16 para 20%. Em paralelo, observou-se aumento gradual do teor de rejeitos, que passou de 1,41% para 3,74%.

Tabela 1 - Rendimento bruto, rendimento depurado e teor de rejeitos das polpas obtidas por polpação soda de *Erythrina poeppigiana*

Tratamento	Rendimento bruto (%)	Rendimento depurado (%)	Rejeitos (%)
E16	42,80	42,20	1,41 ± 0,27
E18	39,80	38,92	2,22 ± 0,29
E20	37,40	36,00	3,74 ± 0,36

Nota: Valores médios de rejeitos seguidos do desvio padrão.

A redução do rendimento está associada à maior solubilização dos componentes da parede celular durante a polpação alcalina, especialmente lignina e parte das hemiceluloses, comportamento amplamente descrito para processos soda. Resultados semelhantes foram observados para resíduos de açaí por Oliveira et al. (2026) e para palha de arroz por Rodríguez et al. (2010), que relataram redução do rendimento da polpa com o aumento da severidade do cozimento. Estudos conduzidos com outras matérias-primas lignocelulósicas, incluindo resíduos de fique, também demonstram comportamento semelhante durante a produção de polpas para papel (Jaramillo et al., 2025).

Por outro lado, o aumento do teor de rejeitos com a concentração de NaOH indica que, nas condições avaliadas, a maior severidade do cozimento não resultou em maior individualização das fibras na etapa de depuração. Esse comportamento merece atenção, uma vez que a maior ação alcalina, isoladamente, não foi suficiente para reduzir a fração de material retido no depurador. A avaliação da composição química da madeira e das características dos rejeitos poderia contribuir para explicar esse resultado.

As propriedades físicas das folhas laboratoriais são apresentadas na Tabela 2. A gramatura, a espessura e a densidade aparente não diferiram significativamente entre os tratamentos ($p \geq 0,05$), indicando que o aumento da concentração de NaOH não alterou a formação das folhas sob as condições avaliadas. Entretanto, a permeância ao ar foi significativamente maior no tratamento E16, enquanto E18 e E20 apresentaram valores inferiores e estatisticamente semelhantes, indicando redução da porosidade das folhas com o aumento da carga alcalina.

Apesar dessa redução na permeância ao ar observada nos tratamentos E18 e E20, todas as folhas laboratoriais perderam a integridade estrutural durante o ensaio de Cobb60, impossibilitando a determinação da absorção de água. Esse comportamento indica que, embora o aumento da concentração de NaOH tenha reduzido a permeância ao ar das folhas, essa alteração não foi suficiente para garantir sua estabilidade estrutural durante a exposição direta à água.

Tabela 2 - Propriedades físicas das folhas laboratoriais

Propriedade	E16	E18	E20
Gramatura (g m^{-2})	56,63 ± 3,47 a	59,05 ± 3,47 a	53,43 ± 3,47 a
Espessura (mm)	0,20 ± 0,01 a	0,20 ± 0,01 a	0,19 ± 0,01 a

Densidade aparente (kg m^{-3})	293,45 ± 26,01 a	293,90 ± 26,01 a	289,88 ± 26,01 a
Permeância ao ar (µm Pa^{-1} s^{-1})	511,06 ± 41,59 a	416,94 ± 41,59 b	398,81 ± 41,59 b
$Cobb_{60}$ (g m^{-2})	Desintegrou durante o ensaio	Desintegrou durante o ensaio	Desintegrou durante o ensaio

Nota: Valores apresentados como média ± intervalo de confiança de 95%. Médias seguidas pela mesma letra na linha não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey ($p \geq 0,05$). O $Cobb_{60}$ não foi submetido à análise inferencial porque as folhas dos três tratamentos se desintegraram durante o ensaio.

As propriedades mecânicas apresentaram, de modo geral, tendência de aumento com a concentração de NaOH (Tabela 3). O tratamento E20 apresentou os maiores valores para módulo de elasticidade, alongamento, índice de tração, TEA e índice TEA. Para força máxima e resistência à tração, E18 apresentou valores significativamente superiores a E16, enquanto E20 não diferiu estatisticamente de E16 ou E18.

Tabela 3 - Propriedades mecânicas das folhas laboratoriais

Propriedade	**E16**	**E18**	**E20**
Força máxima (N)	9,65 ± 0,84 a	11,13 ± 0,84 b	10,94 ± 0,84 ab
Módulo de elasticidade (MPa)	681,56 ± 42,28 a	738,04 ± 42,28 ab	759,00 ± 42,28 b
Alongamento (%)	0,58 ± 0,05 a	0,64 ± 0,05 ab	0,67 ± 0,05 b
Resistência à tração (kN m^{-1})	0,64 ± 0,06 a	0,74 ± 0,06 b	0,73 ± 0,06 ab
Índice de tração (kN m kg^{-1})	11,37 ± 0,97 a	12,56 ± 0,97 ab	13,66 ± 0,97 b
TEA (J m^{-2})	2,06 ± 0,44 a	2,70 ± 0,44 ab	2,81 ± 0,44 b
Índice TEA (J kg^{-1})	36,36 ± 7,59 a	45,63 ± 7,59 ab	52,66 ± 7,59 b

Nota: Valores apresentados como média ± intervalo de confiança de 95%. Médias seguidas pela mesma letra na linha não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey ($p \geq 0,05$).

A melhoria das propriedades mecânicas nas maiores concentrações de NaOH pode estar relacionada às alterações promovidas pelo cozimento alcalino na individualização e nas características superficiais das fibras, favorecendo a formação de ligações interfibras durante a consolidação das folhas laboratoriais (Oliveira et al., 2026).

Embora não tenham sido determinadas diretamente as alterações no teor de lignina ou outros indicadores de deslignificação, o comportamento observado é compatível com os efeitos

esperados do aumento da carga alcalina sobre a qualidade da polpa e sua capacidade de formação de ligações entre as fibras. Tendência semelhante foi observada em diferentes matérias-primas lignocelulósicas submetidas à polpação química, nas quais reduções no rendimento são frequentemente acompanhadas por melhorias nas propriedades mecânicas das folhas produzidas (Abd El-Sayed et al., 2020; Jaramillo et al., 2025; Oliveira et al., 2026).

Além disso, estudos comparando polpas provenientes de madeiras como *Eucalyptus* e *Pinus* demonstram que diferenças nas características das fibras refletem diretamente nas propriedades físicas e mecânicas dos papéis produzidos, reforçando a influência da matéria-prima e das condições de polpação sobre o desempenho final das folhas (Paula et al., 2019).

Os resultados demonstram que *Erythrina poeppigiana* apresenta potencial para produção de folhas laboratoriais por polpação soda. O aumento da concentração de NaOH reduziu o rendimento da polpa e a permeância ao ar, enquanto os maiores valores para a maioria das propriedades mecânicas foram observados nas maiores concentrações alcalinas.

4. Conclusões

A concentração de NaOH influenciou o rendimento da polpa e as propriedades das folhas laboratoriais produzidas a partir de *Erythrina poeppigiana*. O aumento da concentração alcalina reduziu os rendimentos bruto e depurado e a permeância ao ar, enquanto os maiores valores para a maioria das propriedades mecânicas foram observados no tratamento com 20% de NaOH. Entretanto, todas as folhas perderam a integridade durante o ensaio $Cobb_{60}$, impossibilitando a determinação da absorção de água. Entre as condições avaliadas, o tratamento com 20% de NaOH apresentou o melhor desempenho quanto às propriedades mecânicas, embora associado ao menor rendimento da polpa.

5. Agradecimentos

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG), ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Biomateriais da Universidade Federal de Lavras (UFLA), à AmazonCel – Universidade Federal Rural da Amazônia (UFRA) e ao Laboratório Central de Tecnologias de Produtos Florestais da Universidade Federal do Sul da Bahia (LCTPF/UFSB) pelo apoio científico e infraestrutura disponibilizada para a realização desta pesquisa. O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

6. Referências bibliográficas

Abd El-Sayed, E. S., El-Sakhawy, M., & El-Sakhawy, M. A.-M. (2020). Non-wood fibers as raw material for pulp and paper industry. *Nordic Pulp & Paper Research Journal*, *35*(2), 215–230. https://doi.org/10.1515/npprj-2019-0064

Assane, L. M. J., Borges, I. O., Batista, F. G., Arantes, L. S., Innocentini, M. D. M., Mesquita, R. G. A., Guimarães Junior, J. B., & Mendes, L. M. (2026). Effect of mineralization of *Erythrina poeppigiana* particles and accelerated carbonation on the properties of fiber cement. *Environmental Science and Pollution Research*. Advance online publication. https://doi.org/10.1007/s11356-026-37819-4

Bonfatti Júnior, E. A., Lengowski, E. C., Andrade, A. S., Venson, I., Klock, U., Silva Júnior, F. G., Gonçalez, J. C., & Bolzon de Muñiz, G. I. (2019). Bamboo kraft pulping. *Advances in Forestry Science, 6*(4), 791–796. https://doi.org/10.34062/afs.v6i4.8361

Custódio, A. P., Borges, I. O., Arantes, L. S., Batista, F. G., Medeiros, D. T., Mendes, L. M., Mesquita, R. G. A., Azevedo, A. G. S., & Guimarães Junior, J. B. (2025). Effect of accelerated carbonation on the properties of wood-cement panels from the species *Erythrina poeppigiana*. *Ambiente Construído, 25*, e138765. https://doi.org/10.1590/S1678-86212025000100821

Farias, L. B. S., Almeida Neto, J. A., Mesquita, R. G. A., Piotto, D., Valle, M. L. A., Guimarães Junior, J. B., & Mendes, L. M. (2024). Sustainable use of *Erythrina poeppigiana* in formaldehyde-free plywood: Environmental and energy analysis. *Ambiente Construído, 24*, e132136. https://doi.org/10.1590/S1678-86212024000100753

Farias, L. B. S., Almeida Neto, J. A., Mesquita, R. G. A., Piotto, D., Valle, M. L. A., Guimarães Junior, J. B., & Mendes, L. M. (2026). Technical and environmental performance of particleboards from *Erythrina poeppigiana* (Walp.) O.F. Cook in agroforestry systems. *CERNE, 32*, e103736. https://doi.org/10.1590/01047760202632013736

Haile, A., Gebino, G., Tesfaye, T., Mengie, W., Ayele, M., Abuhay, A., & Yilie, D. (2023). Utilization of non-wood biomass for pulp manufacturing in paper industry: Case of Ethiopia. *Biomass Conversion and Biorefinery, 13*, 7441–7459. https://doi.org/10.1007/s13399-021-01424-x

Hawanis, H. S. N., Shamimimraphay, S. H. R., Ilyas, R. A., Jalil, R., Ibrahim, R., Zuhri, M. Y. M., Azriena, H. A. A., Majid, R. A., & Fatriasari, W. (2025). Hybrid alkaline pulping enhances physiochemical, morphological, thermal, and mechanical properties of sugar palm

fiber for papermaking. *Industrial Crops and Products, 224*, 120307. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2024.120307

International Organization for Standardization. (2008). *ISO 1924-2:2008. Paper and board — Determination of tensile properties — Part 2: Constant rate of elongation method (20 mm/min)*. ISO.

Jaramillo, N., Osorio, M. A., Castro, C. I., Restrepo, M. C., Betancur, M., Ríos, A., & Quintana, G. C. (2025). Valorization of fique lignocellulosic residues for sustainable craft paper production. *Sustainability, 17*, 8032. https://doi.org/10.3390/su17178032

Li, P., Xu, Y., Yin, L., Liang, X., Wang, R., & Liu, K. (2023). Development of raw materials and technology for pulping—A brief review. *Polymers, 15*, 4465. https://doi.org/10.3390/polym15224465

Oliveira, D. N. P. S., Matos, L. C., Souza, T. M., Araújo, E. S., Silva, M. G., Cabral, C. P. T., Mendes, L. M., Rocha, Q. S., & Bufalino, L. (2024). Methods for separating the lignocellulosic fibers from the açaí pulping waste: Quality for kraft pulping. *CERNE, 30*, e-103376. https://doi.org/10.1590/01047760202430013376

Oliveira, D. N. P. S., Matos, L. C., Araújo, E. S., Silva, I. A. M., Pereira, V. J., Cabral, C. P. T., Souza, T. M., Mendes, L. M., Tonoli, G. H. D., Lima, M. D. R., Protasio, T. P., Rocha, Q. S., Delucis, R. A., & Bufalino, L. (2026). Converting açaí waste fibers into paper-grade cellulose by soda pulping: Temperature and time effects on efficiency, cost, and sustainability. *Polymers from Renewable Resources*. https://doi.org/10.1177/20412479261457732

Paula, I., Guerta, A. C., & Martinez, R. M. (2019). Comparison of Eucalypt, Pine, and Sugarcane cellulose fibers used for paper production. *Revista Árvore, 43*(4), e430411. https://doi.org/10.1590/1806-90882019000400011

Rodríguez, A., Sánchez, R., Requejo, A., & Ferrer, A. (2010). Feasibility of rice straw as a raw material for the production of soda cellulose pulp. *Journal of Cleaner Production, 18*(11), 1084–1091. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2010.03.011

Sharma, N., Bhawana, Godiyal, R. D., & Thapliyal, B. P. (2020). A review on pulping, bleaching and papermaking processes. *Journal of Graphic Era University, 8*(2), 95–112.

Technical Association of the Pulp and Paper Industry. (2002). *TAPPI T205 sp-02: Forming handsheets for physical tests of pulp*. TAPPI.

Technical Association of the Pulp and Paper Industry. (2008). *TAPPI T410 om-08: Grammage of paper and paperboard*. TAPPI.

Technical Association of the Pulp and Paper Industry. (2009). *TAPPI T441 om-09: Water absorptiveness of sized (non-bibulous) paper and paperboard (Cobb test)*. TAPPI.

Technical Association of the Pulp and Paper Industry. (2010). *TAPPI T411 om-10: Thickness (caliper) of paper, paperboard, and combined board*. TAPPI.

Technical Association of the Pulp and Paper Industry. (2011). *TAPPI T460 om-11: Air resistance of paper (Gurley method)*. TAPPI.

Worku, L. A., Bachheti, A., Bachheti, R. K., Rodrigues Reis, C. E., & Chandel, A. K. (2023). Agricultural residues as raw materials for pulp and paper production: Overview and applications on membrane fabrication. *Membranes, 13*, 228. https://doi.org/10.3390/membranes13020228

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Influência da gramatura de adesivo tanino-formaldeído de *Mimosa tenuiflora* nas propriedades mecânicas de painéis MLCC de *Cedrela fissilis*

Bruna Rafaella Ferreira da Silva[1]; João Gilberto Meza Ucella-Filho[2]; Tatiane Kelly Barbosa de Azevêdo[3]; Elaine Cristina Alves da Silva[3]; Daniela Minini[1]; Thaís Brito Sousa[4]

[1] Universidade Federal de Campina Grande
[2] Universidade Federal de Viçosa
[3] Universidade Federal do Rio Grande do Norte
[4] Universidade do Estado de Minas Gerais

Resumo: O uso de adesivos à base de taninos representa uma alternativa renovável para a produção de painéis de madeira engenheirada. Neste trabalho objetivou-se avaliar a influência de diferentes gramaturas de adesivo tanino-formaldeído de *Mimosa tenuiflora* nas propriedades mecânicas de painéis de Madeira Laminada Cruzada Colada (MLCC) confeccionados com madeira de *Cedrela fissilis*. Foram produzidos painéis com gramaturas de 250, 300 e 350 g m^{-2} e avaliadas as propriedades mecânicas por meio dos ensaios de cisalhamento da linha de cola, módulo de elasticidade (MOE), módulo de ruptura (MOR), compressão paralela às fibras e dureza Janka. As diferentes gramaturas não promoveram diferenças estatisticamente significativas nas propriedades mecânicas. Entretanto, observou-se tendência de aumento da resistência ao cisalhamento com o incremento da gramatura, sendo o maior valor médio obtido para 350 g m^{-2}. Os resultados demonstram o potencial do adesivo à base de taninos de *M. tenuiflora* para aplicação na fabricação de painéis MLCC.

Palavras-chave: Adesivo natural; Jurema preta; Caatinga.

Influence of *Mimosa tenuiflora* Tannin-Formaldehyde Adhesive Spread Rate on the Mechanical Properties of *Cedrela fissilis* Cross-Laminated Timber (CLT) Panels

Abstract: The use of tannin-based adhesives represents a renewable alternative for the production of engineered wood products. This study evaluated the influence of different spread rates of a tannin-formaldehyde adhesive produced from *Mimosa tenuiflora* bark on the mechanical properties of Cross-Laminated Timber (CLT) panels manufactured from *Cedrela fissilis* wood. Panels were produced using adhesive spread rates of 250, 300, and 350 g m^{-2} and evaluated through glue line shear strength, modulus of elasticity (MOE), modulus of rupture (MOR), compression parallel to the grain, and Janka hardness tests. The different adhesive spread rates did not significantly affect the mechanical properties of the panels. However, an increasing trend in glue line shear strength was observed with increasing adhesive spread rate, with the highest mean value obtained for 350 g m^{-2}. The results demonstrate the potential of the *M. tenuiflora* tannin-based adhesive for the manufacture of CLT panels.

Keywords: Natural adhesive; Black jurema; Caatinga.

1. Introdução

A crescente demanda por materiais sustentáveis para a construção civil e para a indústria de produtos florestais tem impulsionado o desenvolvimento de produtos de madeira engenheirada capazes de conciliar elevado desempenho mecânico com o uso eficiente da matéria-prima florestal. Entre esses produtos, destaca-se a Madeira Laminada Cruzada Colada (MLCC), constituída por lâminas de madeira dispostas em camadas ortogonais e unidas por adesivos estruturais, apresentando elevada rigidez, estabilidade dimensional e bom desempenho mecânico (Emberley et al., 2017; Amorim et al., 2017; Junda e Málaga-Chuquitaype, 2025; Li et al., 2026).

A eficiência da ligação adesiva é determinante para a transferência de esforços entre as lâminas e para a integridade estrutural dos painéis, sendo influenciada por fatores relacionados à madeira, às condições de prensagem e às características do adesivo, especialmente sua gramatura (Segundinho et al., 2017; Biazzon et al., 2019). Quantidades insuficientes podem resultar em cobertura incompleta da superfície e redução da resistência da união, enquanto gramaturas elevadas aumentam o consumo de adesivo sem necessariamente promover ganhos proporcionais nas propriedades mecânicas, evidenciando a necessidade de definir níveis adequados de aplicação para cada sistema adesivo e espécie de madeira (Bianche et al., 2017; Iwakiri et al., 2021; Nociar et al., 2024).

Nesse contexto, cresce o interesse por adesivos de origem renovável em substituição às resinas sintéticas derivadas de fontes petroquímicas (Kumar e Leggate, 2022). Os taninos condensados destacam-se por sua elevada reatividade química e potencial para formulação de adesivos estruturais (Lourenço et al., 2025; Silva et al., 2022). Entre as espécies de interesse, a *Mimosa tenuiflora* (Willd.) Poir. apresenta elevado teor de taninos condensados na casca e tem demonstrado desempenho promissor em adesivos para madeira, com propriedades tecnológicas adequadas e boa resistência da linha de cola (Azevêdo et al., 2015; Lopes et al., 2021; Silva et al., 2022).

Entretanto, ainda são escassas as informações sobre o efeito da gramatura de adesivos à base de taninos de *M. tenuiflora* no desempenho mecânico de painéis MLCC produzidos com madeira de *Cedrela fissilis*. Assim, este trabalho teve como objetivo avaliar a influência de três gramaturas de adesivo tanino-formaldeído obtido da casca de *M. tenuiflora* sobre as propriedades mecânicas de painéis MLCC confeccionados com madeira de *C. fissilis*.

2. Material e métodos

2.1. Obtenção dos taninos vegetais

As cascas de *Mimosa tenuiflora* (Willd.) Poir. (jurema-preta) foram coletadas em indivíduos com boas condições fitossanitárias no município de Macaíba, Rio Grande do Norte, Brasil. Após a coleta, o material foi transportado ao Laboratório de Tecnologia e Produtos Florestais da Unidade Acadêmica Especializada em Ciências Agrárias da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), onde foi triturado, homogeneizado e submetido à determinação do teor de umidade.

A extração das substâncias tânicas foi realizada utilizando-se 1,0 kg de casca e 10 L de água destilada (relação 1:10), em autoclave a 100 °C e pressão ambiente. Foram realizados dois ciclos consecutivos de extração, visando à máxima recuperação dos compostos tânicos, resultando em uma relação final casca:solução de 1:20. O extrato obtido foi filtrado em flanela e peneira de 60 mesh para remoção de partículas finas, homogeneizado e submetido à secagem até completa evaporação da água. Posteriormente, o material seco foi moído em almofariz e peneirado em malha de 60 mesh, sendo utilizado na produção do adesivo tanino-formaldeído.

2.2. Produção e caracterização do adesivo

O adesivo tanino-formaldeído foi produzido no Laboratório de Anatomia da Madeira da Universidade Federal de Lavras (UFLA), em Lavras, Minas Gerais. A formulação foi preparada pela mistura de 156 g de tanino em pó, 170 mL de água destilada e 14 g de paraformaldeído, em balão de vidro de duas bocas com capacidade de 500 mL. A mistura foi aquecida a 50 °C sob agitação constante de 500 rpm até completa homogeneização dos componentes. Após o resfriamento à temperatura ambiente, o adesivo foi imediatamente utilizado na confecção dos painéis MLCC, não sendo adicionados extensores ou cargas à formulação.

As propriedades tecnológicas do adesivo foram determinadas em triplicata. A viscosidade foi determinada por viscosímetro Brookfield, conforme a norma ASTM D1084 (ASTM, 1997), enquanto o teor de sólidos foi determinado de acordo com a ASTM D1490 (ASTM, 2006). O tempo de gel foi determinado em gelímetro Marconi MA560, utilizando amostras de 6 g de adesivo em banho de glicerina a 120 °C. O pH foi determinado com o auxílio de pHmetro digital.

2.3. Fabricação dos painéis MLCC

Os painéis de Madeira Laminada Cruzada Colada (MLCC) foram confeccionados utilizando madeira de *Cedrela fissilis* (cedro), sendo selecionadas lâminas isentas de rachaduras e nós aparentes. Cada painel foi constituído por três lâminas dispostas em orientação cruzada,

com dimensões de 7 cm x 1 cm x 20 cm (largura x espessura x comprimento), resultando em painéis com dimensões finais de 20 cm x 21 cm.

Para a colagem foi empregado o adesivo tanino-formaldeído de *Mimosa tenuiflora*, aplicado em linha simples sobre uma das superfícies de colagem das lâminas. Foram avaliadas três gramaturas do adesivo (250, 300 e 350 g m^{-2}), constituindo três tratamentos, cada um com três repetições. Após a aplicação uniforme do adesivo com auxílio de espátula, os painéis permaneceram em tempo de assemblagem por 15 minutos para favorecer a absorção do adesivo pela madeira.

A prensagem foi realizada em prensa hidráulica de pratos planos aquecidos, utilizando pressão específica de 10 kgf cm^{-2}, temperatura de 150 °C e tempo de prensagem de 10 minutos. Após a prensagem, os painéis foram climatizados em câmara com temperatura de 20 ± 2 °C e umidade relativa de 65 ± 5%. Posteriormente, os painéis foram esquadrejados e confeccionaram-se os corpos de prova destinados aos ensaios mecânicos.

2.4. Avaliação das propriedades mecânicas

Os corpos de prova obtidos dos painéis MLCC foram submetidos aos ensaios de resistência ao cisalhamento da linha de cola, flexão estática, compressão paralela às fibras e dureza Janka. O ensaio de flexão estática, utilizado para determinação do módulo de elasticidade (MOE) e do módulo de ruptura (MOR), bem como o ensaio de resistência ao cisalhamento da linha de cola, foi realizado conforme a ASTM D198 (ASTM, 2009). A dureza Janka foi determinada de acordo com a ABNT NBR 7190 (ABNT, 1997).

2.5. Análise estatística

Inicialmente, foi realizada análise estatística descritiva para todas as propriedades mecânicas avaliadas. Posteriormente, os dados foram submetidos à análise de variância (ANOVA) e, quando constatadas diferenças entre os tratamentos, as médias foram comparadas pelo teste de Tukey, ao nível de 5% de probabilidade. Também foi calculado o coeficiente de correlação de Pearson entre as propriedades mecânicas avaliadas e ajustado um modelo de regressão linear para as variáveis que apresentaram correlação significativa.

3. Resultados e discussão

3.1. Caracterização do adesivo

O adesivo tanino-formaldeído produzido a partir da casca de *Mimosa tenuiflora* apresentou pH de 3,93, teor de sólidos de 50,64%, tempo em gel de 460 s e viscosidade superior

a 6000 cP (Tabela 1). Essas propriedades são importantes para o desempenho da colagem, uma vez que influenciam diretamente o espalhamento do adesivo sobre a superfície da madeira, sua penetração no substrato e a formação da linha de cola.

Tabela 1 – Parâmetros do adesivo tanino-formaldeído produzido a partir da casca de *Mimosa tenuiflora*

Adesivo	pH	Teor de sólidos (%)	Tempo em gel (s)	Viscosidade (cP)
M. tenuiflora	3,93	50,64	460	>6.000

O valor de pH encontra-se na faixa considerada adequada para adesivos à base de taninos (3 a 4), favorecendo a reatividade do sistema sem acelerar excessivamente a polimerização, além de reduzir possíveis efeitos de degradação da linha de cola (Vieira et al., 2014). O teor de sólidos foi semelhante ao observado para adesivos comerciais produzidos com taninos de *Acacia mearnsii* e próximo ao valor recomendado para a produção de painéis de madeira, contribuindo para a formação de uma linha de cola resistente (Carvalho et al., 2016; Santiago et al., 2018). O tempo em gel foi superior ao reportado por Santiago et al. (2018), que observaram 297,48 s para adesivos de taninos de *A. mearnsii*, indicando maior tempo de processamento antes da cura, característica que pode favorecer as operações de aplicação e prensagem em escala industrial (Carvalho et al., 2014).

3.2. Propriedades mecânicas do painel MLCC

Os valores médios das propriedades mecânicas dos painéis MLCC produzidos com diferentes gramaturas do adesivo tanino-formaldeído são apresentados na Tabela 2. De modo geral, não foram observadas diferenças estatisticamente significativas entre as gramaturas avaliadas para as propriedades mecânicas analisadas ($p > 0,05$).

Tabela 2 – Propriedades mecânicas dos painéis MLCC de *Cedrela fissilis* em função da gramatura do adesivo tanino-formaldeído

Gramatura (g m^{-2})	MOE (MPa)	MOR (MPa)	Cisalhamento (MPa)	Compressão (MPa)	Dureza Janka
250	2278,58 ± 50,01a	9,43 ± 3,19a	0,59 ± 0,26a	10,09 ± 1,66a	14,70 ± 5,64a
300	2955,21 ± 251,18a	8,18 ± 2,71a	0,31 ± 0,13a	11,01 ± 1,33a	14,89 ± 2,56a
350	2708,00 ± 1069,07a	8,53 ± 4,18a	1,05 ± 0,55a	9,59 ± 1,39a	15,31 ± 1,81a

Os valores de MOE variaram de 2278,58 a 2955,21 MPa, enquanto o MOR apresentou médias entre 8,18 e 9,43 MPa, sem diferenças significativas entre os tratamentos. Esses

resultados indicam que o aumento da gramatura do adesivo não influenciou de forma expressiva a rigidez nem a resistência à flexão dos painéis MLCC. Esse comportamento era esperado, uma vez que essas propriedades dependem predominantemente das características da madeira utilizada, enquanto a gramatura do adesivo atua principalmente na interface de colagem (Khoo et al., 2021; Samih et al., 2025).

De forma semelhante, a resistência à compressão paralela às fibras e a dureza Janka não apresentaram diferenças significativas entre as gramaturas. A pequena variação observada entre os tratamentos sugere que a quantidade de adesivo aplicada não exerceu influência relevante sobre essas propriedades, uma vez que ambas estão fortemente relacionadas às características anatômicas e físicas da madeira (Faria et al., 2020).

Entre as propriedades avaliadas, a resistência ao cisalhamento da linha de cola foi a que apresentou maior variação entre os tratamentos (Figura 1). Embora não tenha sido observada diferença estatística significativa ($p = 0,061$), verificou-se uma tendência de aumento de resistência ao cisalhamento com o incremento da gramatura do adesivo, sendo o maior valor médio obtido para painéis produzidos com 350 g m^{-2}.

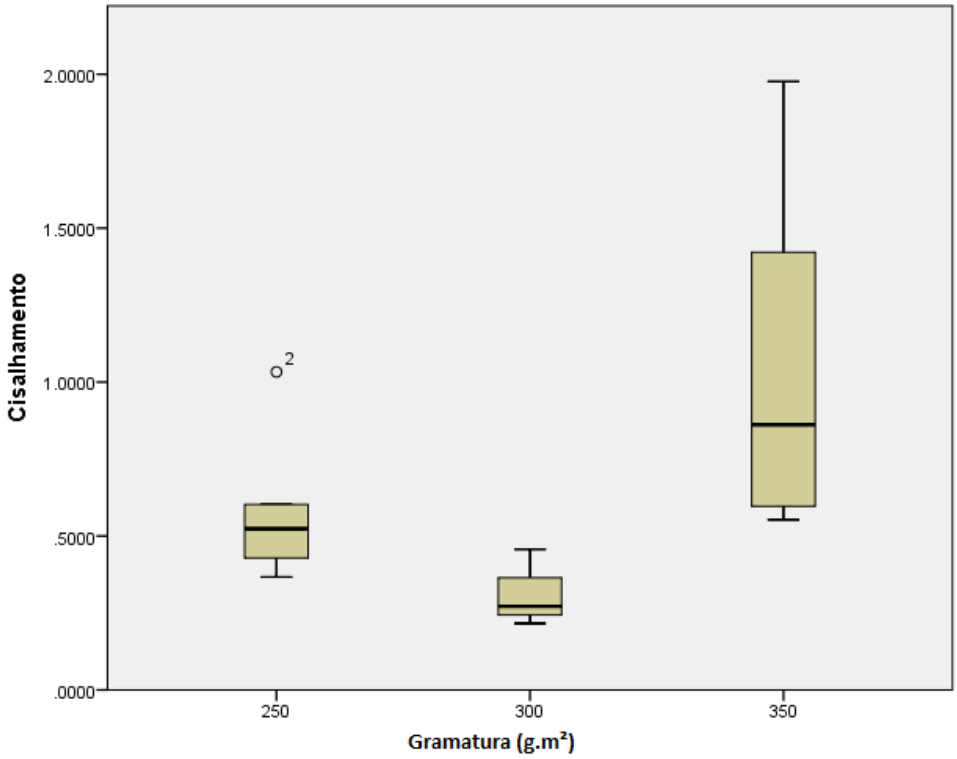


Figura 1 – Boxplot da resistência ao cisalhamento da linha de cola dos painéis produzidos com diferentes gramaturas.

Esse comportamento pode ser atribuído à maior disponibilidade de adesivo para molhar a superfície e formar uma linha de cola mais contínua, favorecendo a transferência de esforços

entre as lâminas (Pimentel et al., 2021). Adicionalmente, as propriedades físico-químicas do adesivo, como teor de sólidos próximo de 50% e tempo em gel adequado, indicam condições favoráveis à formação de uma interface mais resistente (Silva et al., 2022).

O valor médio de resistência ao cisalhamento obtido neste estudo para a gramatura de 350 g m^{-2} foi próximo ao observado em painéis MLCC de *Eucalyptus* spp. colados com adesivo tanino-formaldeído de *Mimosa tenuiflora* (Silva et al., 2022). Todavia, em estudo realizado por Goulart et al. (2012), utilizando adesivo à base de taninos de barbatimão (*Stryphnodendron adstringens*), obteve-se uma resistência ao cisalhamento de 2,24 MPa, apresentando uma resistência superior ao obtido neste estudo (1,05 MPa).

O desempenho de formulações comerciais geralmente apresenta altas resistências ao cisalhamento, conforme observado por Gonçalves et al. (2016), todavia, a formulação de origem tânica apresenta como diferencial o emprego de matéria-prima renovável, de modo que sua viabilidade deve considerar conjuntamente o desempenho mecânico, a disponibilidade da matéria-prima e a possibilidade de otimização da formulação. Assim, embora a gramatura de 350 g m^{-2} tenha apresentado tendência de melhor desempenho, estudos adicionais envolvendo maior número de repetições e diferentes condições de processamento são necessários para confirmar a influência da quantidade de adesivo sobre a resistência ao cisalhamento de painéis MLCC produzidos com madeira de *C. fissilis*.

4. Conclusões

O adesivo tanino-formaldeído produzido a partir da casca de *Mimosa tenuiflora* apresentou propriedades adequadas para aplicação na fabricação de painéis MLCC. Embora as diferentes gramaturas avaliadas não tenham promovido diferenças estatisticamente significativas nas propriedades mecânicas dos painéis, observou-se tendência de aumento da resistência ao cisalhamento da linha de cola com o incremento da gramatura do adesivo, indicando que a aplicação de 350 g m^{-2} pode favorecer o desempenho da colagem. Os resultados obtidos evidenciam o potencial do adesivo à base de taninos de *M. tenuiflora* como alternativa renovável para a produção de painéis estruturais de madeira, reforçando a necessidade de estudos futuros envolvendo diferentes gramaturas e condições de prensagem para otimização do sistema de colagem.

5. Agradecimentos

Os autores agradecem ao Laboratório de Painéis de Madeira da Universidade Federal de Lavras (UFLA) pelo apoio na realização desta pesquisa.

6. Referências bibliográficas

Amorim, S. T. A., Mantilla, J. N. R., & Carrasco, E. V. M. A madeira laminada cruzada: aspectos tecnológicos, construtivos e de dimensionamento. (2017). Matéria (Rio J.), 22(Suppl 1). https://doi.org/10.1590/S1517-707620170005.0273

Azevêdo, T. K. B., Paes, J. B., Calegari, L., & Nascimento, J. W. B. (2015). Qualidade dos taninos de Jurema-preta (*Mimosa tenuiflora*) para produção de adesivo tanino formaldeído. Ciênc. Florest., 25(2). https://doi.org/10.5902/1980509818470

Bianche, J. J., Teixeira, A. P. M., Ladeira, J. P. S., Carneiro, A. C. O., Castro, R. V. O., Della Lucia, R. M. (2017). Cisalhamento na Linha de Cola de Eucalyptus sp. Colado com Diferentes Adesivos e Diferentes Gramaturas. Floresta Ambient., 24:e00077114. https://doi.org/10.1590/2179-8087.077114

Biazzon, J. C., Araujo, V. A., Alves, P. R. G., Morales, E. A. M., Gonçalves, M. T. T., & Valarelli, I. D. (2019). Resistência mecânica à adesão em superfícies de madeira de pinus aplainadas e unidas por adesivos PVAc. Matéria (Rio J.), 24(1). https://doi.org/10.1590/S1517-707620190001.0606

Emberley, R., Putynska, C.G., Bolanos, A., Lucherini, A., Solarte, A., Soriguer, D., Gonzalez, M. G., & Humphreys, K. (2017) Description of small and large-scale cross laminated timber fire tests. Fire Saf. J., 91:327–335. https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2017.03.024

Faria, D. L., Ribeiro, L. P., Oliveira, K. M., Guimarães Júnior, J. B. (2020). Propriedades físicas e mecânicas de painéis de lâminas paralelas (PLP) produzidos com madeira de *Hevea brasiliensis*. Ciência da Madeira, 10(3).

Gonçalves, F. G., Segundinho, P. G. A., Schayder, L. F., Tinti, V. P., & Santiago, S. B. (2016). Avaliação da resistência ao cisalhamento da madeira de *Pinus* sp. coladas em temperatura ambiente. Ciência da Madeira, 7(1). https://doi.org/10.12953/2177-6830/rcm.v7n1p42-50

Goulart, S. L., Mori, F. A., Almeida, N. F., Mendes, R. F., & Mendes, L. M. (2012). Resistência ao Cisalhamento de Painéis Compensados Produzidos com Adesivo à Base de Taninos de *Stryphnodendron adstringens* (barbatimão). Floresta Ambient., 19(3). https://doi.org/10.4322/floram.2012.036

Iwakiri, S., Trianoski, R., Zunta, R. R., Pereira, G. F., Rosa, T. S. (2021). Avaliação dos efeitos do adesivo, gramatura e pressão na qualidade de painéis EGP de *Eucalyptus badjensis*. Scientia Forestalis, 49(129). https://doi.org/10.18671/scifor.v49n129.20

Junda, E., & Málaga-Chuquitaype, C. (2025). Life cycle impacts of structural deterioration and seismic events on cross-laminated timber buildings. J. Build Eng., 104:112282. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2025.112282

Khoo, P. S., Chin, K. L., Lee, C. L., H'ng, P. S., & Hafizuddin, M. S. (2021). Effect of Glue Spreads on the Structural Properties of Laminated Veneer Lumber from Spindleless Rotary Veneers Recovered from Short Rotation Hevea Plantation Logs. Polimers, 13:3799. https://doi.org/10.3390/polym13213799

Kumar, C., & Leggate, W. (2022). An overview of bio-adhesives for engineered wood products. International Journal of Adhesion and Adhesives, 118:103187. https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2022.103187

Li, H., Semple, K. E. & Dai, C. (2026). Embedment strength of cross-laminated timber: brief review and data-driven investigation. Eur. J. Wood Prod., 84(44). https://doi.org/10.1007/s00107-026-02380-x.

Lim, H., Tripathi, S., & Tang, J. D. Bonding performance of adhesive systems for cross-laminated timber treated with micronized copper azole type C (MCA-C). Construction and Building Materials, 232:117208. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117208

Lopes, P. J. G., Calegari, L., Silva, W.A. M., Gatto, D. A., Medeiros Neto, P. N.; Melo, R. R., Bakke, I. A., Delucis, R. A., & Missio, A. L. (2021). Tannin-based extracts of *Mimosa tenuiflora* bark: features and prospecting as wood adhesives. Appl Adhes Sci, 9(3). https://doi.org/10.1186/s40563-021-00133-y

Lourenço, Y. B. C., Santos, C. A., Furtini, A. C. C., Arantes, L. S., Andrade, G. M., Silva, K. C. A., Ramos, T. S., Mesquita, R. G. A., Mendes, L. M., & Guimarães Júnior, J. B. (2025). Partial replacement of tannin with nanolignin in adhesive formulations for bonding plywood produced with *Erythrina poeppigiana* wood. Cerne, 31:e103546. https://doi.org/10.1590/01047760202531013546

Nociar, M., Pipíška, T., Král, P., Grbec, S., & Šernek, M. (2024). Effect of the percentage of MUF adhesive coverage on shear strength when bonding different wood species. BioResources, 19(3), 5672-5684. https://doi.org/10.15376/biores.19.3.5672-5684

Pimentel, T. S., Wimmer, P., Carvalho, H. R., Roitman, L., & Del Menezzi, C. H. S. (2021). Resistência ao cisalhamento da linha de cola em madeiras tropicais amazônicas. Scientia Forestalis, 49(132), e3753. https://doi.org/10.18671/scifor.v49n132.19

Samih, Y. E. I., Shahrulnizam, R. N. Z., Idrus, N. S., Yunus, A. A. M., Jesuet, M. S. G., Ghani, M. A, & Alamjuri, R. H. (2025). Evaluating the Impact of Species and Glue

Spread Rate on Hybrid Plywood Bonding Strength. J. Korean Wood Sci. Technol., 53(4). https://doi.org/10.5658/WOOD.2025.53.4.429

Santiago, S. B., Gonçalves, F. G., Lelis, R. C. C., Segundinho, P. G. A., Paes, J. B., Arantes, M. D. C. (2018). Colagem de madeira de eucalipto com adesivos naturais. Matéria, 23(3). https://doi.org/10.1590/S1517707620180003.0485

Segundinho, P. G. A., Gonçalves, F. G., Gava, G. C., Tinti, V. P., Alves, S. D., & Regazzi, A. J. (2017). Eficiência da colagem de madeira tratada de *Eucalyptus cloeziana* F. Muell para produção de madeira laminada colada (MLC). MatéRIA (Rio J.), 22 (2). https://doi.org/10.1590/S1517-707620170002.0140

Silva, B. R. F., Ucella-Filho, J. G. M., Souza, E. C., Costa, T. L. N., Azevêdo, T. K. B., Mori, F. A., & Pimenta, A. S. (2022). Properties of Cross-Laminated Timber bonded with an adhesive based on tannins from the bark of *Mimosa tenuiflora* trees. Revista Árvore, 46. https://doi.org/10.1590/1806-908820220000020

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Influência da Proporção de Partículas na Molhabilidade Superficial de Painéis Compósitos

José Patrício Santana de Almeida[1]; Fabricio Gomes Gonçalves[1]; Gilmara Pires de Moura Palermo[1]; Sinval do Santos Marques[1]; Antônio Thiago Soares[1]; Nédia Pereira Correia Mendes Correia[1]; Alexandre Monteiro de Carvalho[2]; Roberto Carlos Costa Lelis[2]

[1] Universidade Federal do Espírito Santo - UFES
[2] Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro - UFRRJ

Resumo: A molhabilidade superficial é uma propriedade determinante para o desempenho de painéis compósitos, influenciando processos como adesão, revestimento e absorção de água. Este estudo teve como objetivo avaliar a influência de diferentes proporções de partículas de endocarpo de macadâmia e de *Eucalyptus* sp. na molhabilidade superficial de painéis compósitos por meio do ângulo de contato. Foram produzidos dois tratamentos, diferenciados pela proporção dos materiais lignocelulósicos, mantendo constantes os demais constituintes e parâmetros de fabricação. A molhabilidade foi determinada pelo método do ângulo de contato com água destilada, enquanto a densidade aparente e o perfil de densidade foram avaliados por densitometria de raio-X. O painel com maior proporção de partículas de *Eucalyptus* sp. apresentou maior ângulo de contato, indicando menor molhabilidade superficial. Os resultados demonstraram que a molhabilidade depende não apenas da composição química dos materiais, mas também da distribuição da densidade ao longo da espessura, evidenciando a influência do perfil de densidade sobre a interação entre água e superfície. Conclui-se que a proporção das partículas altera o comportamento superficial dos compósitos e que estudos envolvendo geometria e granulometria das partículas podem ampliar a compreensão desse fenômeno.
Palavras-chave: Materiais Lignocelulósicos; Perfil de Densidade; Endocarpo de Macadâmia

Influence of Particle Proportion on the Surface Wettability of Composite Panels

Abstract: Surface wettability is a key property affecting the performance of composite panels, influencing processes such as adhesion, coating, and water absorption. This study aimed to evaluate the influence of different proportions of macadamia nutshell and *Eucalyptus* sp. particles on the surface wettability of composite panels using contact angle measurements. Two treatments were manufactured with different proportions of lignocellulosic materials while maintaining the same constituents and processing conditions. Wettability was determined by the water contact angle method, whereas apparent density and density profile were assessed using X-ray densitometry. The panel containing a higher proportion of *Eucalyptus* sp. particles exhibited a higher contact angle, indicating lower surface wettability. The results showed that wettability depends not only on the chemical composition of the raw materials but also on the density distribution throughout the panel thickness, highlighting the influence of the density profile on the interaction between water and the composite surface. It is concluded that particle proportion significantly affects the surface behavior of composite panels and that future studies addressing particle geometry and granulometry may contribute to a better understanding of this phenomenon.
Keywords: Lignocellulosic Materials; Density Profile; Macadamia Endocarp

1. Introdução

A molhabilidade é um fenômeno que ocorre na superfície dos materiais e que descreve a interação entre um líquido e uma superfície sólida, sendo determinada pelo equilíbrio entre as forças de adesão e coesão no sistema sólido-líquido (Padday; Uffindell, 1968).

O crescente interesse por essa propriedade está relacionado tanto à sua importância em processos tecnológicos que dependem da interação entre líquidos e superfícies sólidas, como revestimentos e colagem, quanto à utilização do ângulo de contato como um método rápido e de baixo custo para avaliar a eficiência de tratamentos superficiais (Beketov; Shynkarenko, 2022). Dessa forma, as propriedades físico-químicas de ambas as fases envolvidas, ou seja, do líquido e da superfície sólida são determinantes para a molhabilidade (Aveyard, 2019).

Nesse contexto, Taghiyari *et al*. (2021) demonstraram que líquidos com diferentes polaridades interagem de maneira distinta com a superfície de compósitos à base de madeira, em razão das diferenças nas interações químicas estabelecidas entre o líquido e os constituintes do material. Segundo Wei *et al.* (2019) e Ayrilmis *et al.* (2012) a densidade, a porosidade, o tamanho das partículas e a proporção de madeira utilizadas no painel são característica físicas e tecnológicas que devem ser levadas em consideração ao se estudar a molhabilidade.

Dentre esses fatores, a proporção dos materiais que compõem o painel exerce papel fundamental, uma vez que determina a participação relativa de cada matéria-prima na superfície do compósito. Como cada material apresenta composição química e características próprias, alterações em sua proporção podem modificar a afinidade da superfície por líquidos e, consequentemente, sua molhabilidade (Tarigan *et al.*, 2025).

Diante do exposto, este estudo teve como objetivo avaliar a influência de diferentes proporções de partículas de endocarpo de macadâmia e partículas madeira de *Eucalyptus* sp. na molhabilidade superficial de painéis compósitos.

2. Material e métodos

A classificação das partículas, bem como a preparação, a prensagem e a aclimatação dos painéis compósitos, seguiram a metodologia descrita por Almeida (2025). As partículas de endocarpo de macadâmia foram obtidas por moagem em moinho de martelos, seguida de processamento em moinho de facas e classificação granulométrica em peneiras ASTM 20, sendo utilizadas aquelas retidas na malha de 0,85 mm. As partículas de *Eucalyptus* sp. foram

classificadas no mesmo conjunto de peneiras, sendo empregadas as frações retidas nas malhas de 1,70 e 0,85 mm.

Os painéis compósitos, com dimensões de 43 × 43 × 1,28 cm, foram produzidos utilizando adesivo bicomponente à base de poliuretano derivado do óleo de mamona (AGT-1315) e lignossulfonato. Após a homogeneização dos constituintes, os colchões foram formados, prensados a quente a 120 °C, sob pressão de 45 kgf cm^{-2}, durante 8 min, e posteriormente aclimatados em câmara climática (20ºC, 65% Umidade) até atingirem a umidade de equilíbrio para a confecção dos corpos-de-prova.

Os tratamentos, produzidos em triplicata, diferiram apenas quanto à proporção dos materiais lignocelulósicos. O tratamento T1 foi constituído por 65% de partículas de endocarpo de macadâmia e 20% de partículas de *Eucalyptus* sp., enquanto T2 foi composto por 65% de partículas de *Eucalyptus* sp. e 20% de partículas de endocarpo de macadâmia. Em ambos os tratamentos foram adicionados 10% de partículas de calçado do tipo ‘chinelo de dedo’ e 5% de lignossulfonato.

A molhabilidade superficial foi determinada pelo método do ângulo de contato, conforme a metodologia proposta por Dias (2025), baseada na ASTM D7334 (2022). Foram utilizados três corpos de prova (5 × 5 cm) por tratamento. O ensaio foi realizado em goniômetro equipado com câmera de alta resolução e software para análise de imagens. Uma gota de 5 µL de água destilada foi depositada sobre a superfície utilizando uma seringa de alta precisão Injekt–F (DS-D 1000 SF) acoplada à agulha SNS-D 051/025. As imagens foram capturadas em intervalos de 1 s durante 60 s, sendo os ângulos de contato determinados nos tempos de 0 e 60 s. Para cada corpo de prova, foram realizadas três leituras em diferentes pontos da superfície, sendo os resultados expressos pela média e desvio-padrão. Os dados foram submetidos à análise de variância (ANOVA) e as médias comparadas pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

A densidade aparente e o perfil densidade foi determinada em densitômetro de raio-X (DAX6000, GreCon), utilizando-se doze corpos de prova de 50 × 50 × 12,8 mm para cada tratamento.

3. Resultados e discussão

Na Tabela 1, o painel com maior proporção de *Eucalyptus* sp. apresentou o maior ângulo de contato.

Tabela 1 – Comportamento do ângulo de contato (º) para ambios tratamentos avaliados

Parâmetro Estatístico	Ângulo de contato (°)	
	T1	T2
Média	70,58 (a)	92,97 (b)
C.V (%)	7,08	2,41

Médias seguidas por letras distintas diferem entre si (ANOVA, $F < 0,05$).

A água, como líquido polar, forma ligações de hidrogênio fortes com a celulose, que apresenta grande quantidade de grupos hidroxílicos, resultando em maior tempo de penetração e área molhada em comparação com solventes apolares (Grundke *et al.* 1996).

Quanto maior a disponibilidade desses grupos hidroxilas acessíveis, maior tende a ser a adsorção inicial da água e, consequentemente, maior o tempo de permanência da gota sobre a superfície antes da penetração completa, como podemos ver na Figura 1.

Esse comportamento foi observado por Taghiyari *et al.* (2021), que atribuíram o maior tempo de penetração da água, em comparação com etanol e querosene, à formação de ligações de hidrogênio mais fortes e estáveis entre os grupos hidroxila da água e os grupos hidroxila da celulose.

O formato de uma gota sobre uma superfície sólida, quantificado pelo ângulo de contato, indica a molhabilidade (Beketov; Shynkarenko, 2022). Segundo Huhtamäki *et al.* (2018), ângulos baixos indicam a propensão dos líquidos a se espalhar pela superfície, o que pode comprometer a estabilidade dimensional do painel, já que a absorção de água causa expansão das partículas (Tarigan *et al.* 2025). Além disso, a baixa molhabilidade, evidenciada pelo alto ângulo de contato, pode resultar em ligações interparticulares mais fracas, em menores forças de adesão e desenvolvimento de tensões de cisalhamento na interface fibra-matriz (Tarigan *et al.* 2025; Sahu; Gupta, 2022).

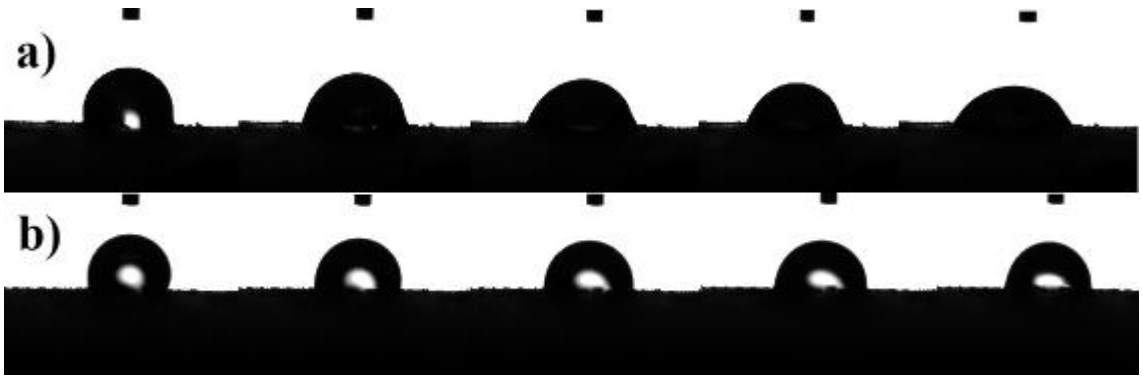


Figura 1 - Perfil das gotas sobre a superfície dos compósitos produzidos. a) T1: 65% de partículas de endocarpo de macadâmia e 20% de partículas de *Eucalyptus* sp. b) T2: composto por 65% de partículas de *Eucalyptus* sp. e 20% de partículas de endocarpo de macadâmia

A janela de 60 segundos é crítica para avaliar a transição da molhabilidade inicial para a absorção capilar ativa. Segundo Betlej *et al.* (2025) em compósitos de PLA com 60% de partículas lignocelulósicas, o ângulo de contato diminuiu significativamente aos 60 segundos, evidenciando absorção ativa de água pela superfície, como visto na Figura 2.

Figura 2 – Ângulo de Contato (º) em função do Tempo (s), para os tratamentos avaliados

Entretanto, o tempo de penetração não deve ser interpretado isoladamente, pois também reflete a intensidade das interações entre a água e a superfície. Dessa forma, a avaliação da molhabilidade deve considerar conjuntamente o ângulo de contato e as características físicas do material, como a densidade (Ayrilmis *et al*. 2012).

Podemos observar esse fato descrito na Figura 3, que ilustra o perfil de densidade aparente dos compósitos. Segundo De Ligne *et al.* (2022), o aumento da densidade resulta em uma estrutura mais compacta, com menor conectividade entre os poros, dificultando a penetração da água. Os autores verificaram ainda que a densificação superficial reduz a absorção inicial, porém ressaltam que esse comportamento não é explicado exclusivamente pela densidade da camada superficial, mas também pela maior coesão entre as partículas, que atua como barreira à entrada de água.

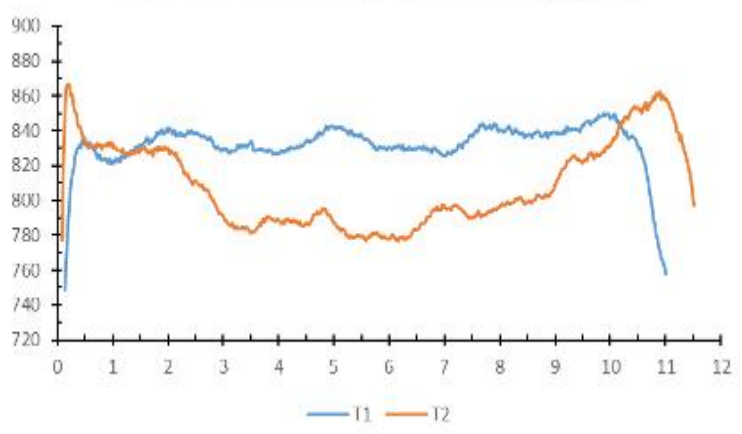


Figura 3 – Perfil de densidade aparente para ambos os tratamentos avaliados. T1: 65% de partículas de endocarpo de macadâmia e 20% de partículas de *Eucalyptus* sp. T2: composto por 65% de partículas de *Eucalyptus* sp. e 20% de partículas de endocarpo de macadâmia.

Para T1, a granulometria das partículas e sua geometria pode explicar o fato de o perfil de densidade apresenta-se com certa linearidade, pois, segundo Auriga *et al*. (2022), as características das partículas, como tamanho e geometria, influenciam a formação do perfil de densidade dos painéis, uma vez que determinam o grau de compactação durante a prensagem e a distribuição da densidade ao longo da espessura.

Wong et al. (1999) demonstraram que a distribuição da densidade ao longo da espessura do painel influencia significativamente suas propriedades, de modo que painéis com a mesma densidade média podem apresentar comportamentos distintos em função do perfil vertical de densidade. No presente estudo, os tratamentos apresentaram densidades aparentes médias semelhantes, de 0,80 g cm^{-3} (T1) e 0,82 g cm^{-3} (T2).

4. Conclusões

A proporção de partículas de endocarpo de macadâmia e *Eucalyptus* sp. influenciou a molhabilidade superficial dos painéis compósitos. O tratamento T2, com maior proporção de partículas de Eucalyptus sp., apresentou maior ângulo de contato (92,97°), diferindo significativamente do T1 (70,58°), indicando menor molhabilidade superficial. Os resultados evidenciam que a molhabilidade está relacionada à interação entre a composição dos painéis e o perfil de densidade, sendo recomendados estudos futuros sobre a geometria, granulometria e morfologia das partículas para melhor compreender esses efeitos.

5. Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

6. Referências bibliográficas

Almeida, J. P. S. (2025). Compósito de material residual encolado com lignosulfonato. 44 f. Monografia (Bacharelado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro.

American Society For Testing And Materials - ASTM (2022). Standard practice for surface wettability of coatings, substrates and pigments by advancing contact angle measurement (D7334-08). https://www.astm.org/d7334-08r22.html.

Auriga, R., Auriga, A., Borysiuk, P., Wilkowski, J., Fornalczyk, O., & Ochmian, I. (2022). Lignocellulosic biomass from grapevines as raw material for particleboard production. Polymers, 14: 2483. https://doi.org/ 10.3390/polym14122483.

Aveyard, B. (2019). Wetting, E. B. Ayeyard, (Ed.), Surfactants: In Solution, at interfaces and in colloidal dispersions (427-464). Editora Oxford Academic.

Ayrilmis, N., Benthien, J. T., & Thoemen, H. (2012). Effects of formulation variables on surface properties of wood plastic composites. Composites Part B: Engineering, 43(2):325-331. https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2011.07.011.

Beketov, G. V., & Shynkarenko, O. V. (2022). Surface wetting and contact angle: basics and characterisation. Chemistry, Physics and Technology of Surface, 13(1):3–35. https://doi.org/10.15407/hftp13.01.003.

De Ligne, L., Van, A. J., Baetens, J. M., Omar, S., De Baets, B., Thygesen, L. G., Van den Bulcke, J., & Thybring, E. E. (2022) Moisture dynamics of wood-based panels and wood fibre insulation materials. Frontiers in Plant Science, 13:951175. https://doi.org/10.3389/fpls.2022.951175.

Dias, N. G. F. (2025). Avaliação dos efeitos da modificação térmica nas propriedades de diferentes madeiras. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Universidade Federal do Espírito Santo.

Padday, J. F., & Uffindell, N. D. (1968). The calculation of cohesive and adhesive energies from intermolecular forces at a surface. The Journal of Physical Chemistry, 72(5):1407–1414. https://doi.org/10.1021/j100851a002.

Taghiyari, H. R., Majidi, R., Arsalan, M. G., Moradiyan, A., Militz, H., Ntalos, G., & Papadopoulos, A. N. (2021). Penetration of different liquids in wood-based composites: The Effect of Adsorption Energy. Forests, 12(1):63. https://doi.org/10.3390/f12010063.

Tarigan, F. O., Hakim, L.; Purwoko, A.; Sucipto, T.; Nasution, H.; Fatriasari, W.; Lubis, M. A. R.; Sutiawan, J.; Bakhsi, M. I., Kim, N.-H., Antov, P., Lee, S. H., Selvasembian, R., Hussin, M. H., Aristri, M. A., &Iswanto, A. H. (2025). Development and characterization of novel hybrid particleboard made from several non-wood lignocellulosic materials. Polymers, 17(4): 512. https://doi.org/10.3390/polym17040512.

Wei, J., Lin, Q., Zhang, Y., Yu, W., Hse, C.-Y., & Shupe, T. (2019). Surface properties of pine scrimber panels with varying density. Coatings, 9(6):397. https://doi.org/10.3390/coatings9060397.

Wong, E. D., Zhang, M., Wang, Q., & Kawai, S. (1999). Formation of the density profile and its effects on the properties of particleboard. Wood Science and Technology 33(1): 327–340. https://doi.org/10.1007/s002260050119.

Huhtamäki, T., Tian, X., Korhonen, J. T., & Ras, R. H. A. (2018). Surface-wetting characterization using contact-angle measurements. Nature Protocols, 13(7), 1521–1538. https://doi.org/10.1038/s41596-018-0003-z.

Tarigan, F. O., Hakim, L., Purwoko, A., Sucipto, T., Nasution, H., Fatriasari, W., Lubis, M. A. R., Sutiawan, J., Bakhsi, M. I., Kim, N. H., Antov, P., Lee, S. H., Selvasembian, R., Hussin, M. H., Aristri, M. A., & Iswanto, A. H. (2025). Development and characterization of novel hybrid particleboard made from several non-wood lignocellulosic materials. Polymers, 17(4), 512. https://doi.org/10.3390/polym17040512.

Sahu, P., & Gupta, M. K. (2022). Water absorption behavior of cellulosic fibres polymer composites: A review on its effects and remedies. Journal of Industrial Textiles, 51(5_suppl), 7480S–7512S. https://doi.org/10.1177/1528083720974424.

Grundke, K., Bogumil, T., Werner, C., Janke, A., Pöschel, K., & Jacobasch, H.-J. (1996). Liquid–fluid contact angle measurements on hydrophilic cellulosic materials. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 116(1–2), 79–91. https://doi.org/10.1016/S0927-7757(96)03587-X.

Betlej, I., Barlak, M., Lipska, K., Boruszewski, P., & Borysiuk, P. (2025). Application of argon ion implantation to improve the surface properties of materials based on PLA and lignocellulosic particles. Molecules, 30(9), 1948. https://doi.org/10.3390/molecules30091948

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Influência de Revestimentos e Desmoldante no Desempenho de Compensados Externos Utilizados como Fôrmas de Concreto

Tarcisio Francisco de Camargo[1]; Sandiane Carla Krefta[1]; Camila Alves Corrêa[1]; Maickele Aparecida Muniz[1]; Marine Alves Antonello[1]; Nicolas Costa Pucci[1]; José Fellip Catique Marinho[1]; Alexsandro Bayesrtorff da Cunha[1]

[1] Universidade do Estado de Santa Catarina

Resumo: O presente estudo avaliou a influência de diferentes revestimentos e do uso de desmoldante no desempenho de painéis compensados de *Pinus* spp. utilizados como fôrmas de concreto, considerando a qualidade superficial ao longo de vinte reusos. Foram testados cinco tratamentos: sem revestimento, óleo vegetal, resina melamínica, filme melamínico e tego filme. Os painéis receberam aplicação manual ou prensagem dos revestimentos e foram submetidos a vinte ciclos de moldagem com concreto preparado na proporção 1:1 entre cimento e areia. A qualidade superficial das fôrmas e do concreto foi classificada com base em critérios definidos em conjunto com profissionais da construção civil. Os resultados mostraram que todos os revestimentos tiveram desempenho semelhante nos ciclos iniciais, mas o filme melamínico apresentou queda acentuada a partir do 8º ciclo, falhando no 15º. O óleo vegetal foi o revestimento mais durável, mantendo melhores notas e maior número de reusos, seguido pela resina melamínica. O desmoldante aumentou o número de reutilizações apenas em revestimentos menos estáveis. Assim, o óleo vegetal se destacou como a alternativa mais eficiente para fôrmas de concreto em painéis compensados não estruturais.

Palavras-chave: Durabilidade; Desempenho Superficial; Reutilização.

Influence of Coatings and Release Agent on the Performance of Exterior Plywood Used as Concrete Formwork

Abstract: This study evaluated the influence of different coatings and the use of release agent on the performance of *Pinus* spp. plywood panels used as concrete forms, considering surface quality over twenty reuses. Five treatments were tested: no coating, vegetable oil, melamine resin, melamine film, and Tego film. The panels had the coatings applied manually or by pressing and were subjected to twenty casting cycles with concrete prepared in a 1:1 ratio of cement to sand. The surface quality of the forms and the concrete was classified based on criteria defined in collaboration with construction professionals. The results showed that all coatings performed similarly in the initial cycles, but the melamine film exhibited a sharp decline starting in the 8th cycle, failing in the 15th. Vegetable oil was the most durable coating, maintaining the highest ratings and the greatest number of reuses, followed by melamine resin. The release agent increased the number of reuses only for less stable coatings. Thus, vegetable oil stood out as the most efficient alternative for concrete forms made of non-structural plywood panels.

Keywords: Durability; Surface Performance; Reuse.

1. Introdução

Na construção civil, produtos estruturais à base de lâminas de madeira, como o compensado e a madeira laminada colada (LVL), têm sido amplamente empregados devido à sua eficiência e desempenho (Bekhta et al., 2023). Entre as diversas aplicações do compensado, destaca-se o uso na fabricação de fôrmas para concreto (Iwakiri e Trianoski, 2020). Para essa finalidade, são utilizados compensados laminados de uso externo, produzidos com resinas resistentes à água, como o fenol formaldeído, em razão da exposição à umidade do concreto e ao intemperismo (Baldwin, 1995).

Quando expostos às intempéries, os painéis podem sofrer alterações em suas características, comprometendo o desempenho das fôrmas. Por isso, os revestimentos aplicados têm a função de impedir a penetração de agentes no concreto e preservar sua qualidade (Almeida e Ferreira, 2006). Entre os revestimentos aplicados aos painéis para fôrmas de concreto, destacam se os produtos líquidos, como óleos formulados com bases vegetais e minerais acrescidas de sequestrantes, bactericidas e fungicidas. Também são utilizados revestimentos à base de resina melamínica, em versões aquosas ou solventes, que oferecem boa retenção de cor, resistência à água, além de apresentarem relação custo-benefício favorável e desempenho adequado em ambientes úmidos (Carvalho et al., 2012; Carneiro, 2017; Barros Filho, 2009).

O tegofilme destaca-se entre os revestimentos plastificados, produzido a partir de celulose impregnada com resina fenol-formaldeído em gramaturas entre 120 e 220 $g \cdot m^{-2}$, cuja maior massa aumenta a resistência e permite uso externo e em fôrmas de concreto com maior número de reusos (Iwakiri e Trianoski, 2020; Iwakiri et al., 2012; Sanches, 2012; Sanches e Iwakiri, 2013). Outro revestimento é o filme melamínico, termofundido de baixa pressão que confere resistência à abrasão, impacto e fungos, embora ainda pouco estudado na literatura apesar de amplamente utilizado comercialmente (Sousa e Barata, 2011).

Para avaliação de materiais expostos a condições de radiação solar e precipitação, pode ser utilizada a norma ASTM G154 (2006) que de forma mais específica, os procedimentos descritos no ciclo sete que é destinado a produtos madeiráveis naturais ou revestidos. A principal vantagem da utilização desse método é o tempo, pois o mesmo ocorre de forma mais rápida em relação a exposição ao ambiente, resultando na análise do comportamento de materiais ao longo do tempo, de forma rápida e eficiente (Yildiz et al., 2013). Assim sendo, o objetivo deste estudo foi avaliar como diferentes revestimentos e o uso de desmoldante influenciam o desempenho de painéis compensados não estruturais de uso exterior, produzidos

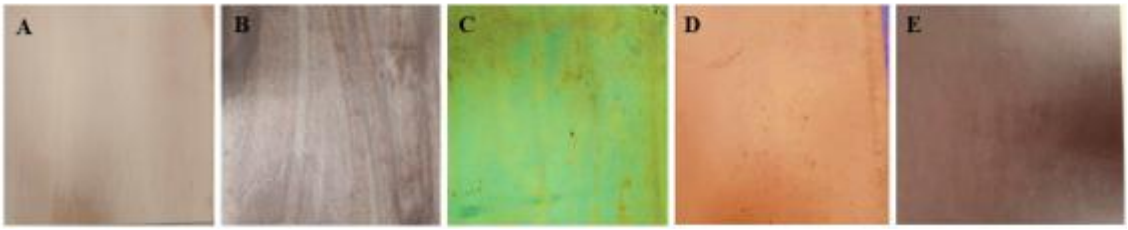
com *Pinus* spp., empregados como fôrmas de concreto, considerando a qualidade superficial ao longo de vinte reusos.

2. Material e métodos

2.1 Matéria-prima

O estudo utilizou 20 painéis compensados de *Pinus spp.* (2440 × 1220 × 18 mm), sendo 16 sem revestimento e 4 originalmente revestidos com tego filme. Após o corte em peças de 500 × 500 mm, obtiveram-se 80 unidades: 64 sem revestimento e 16 com tego filme. As peças sem revestimento foram distribuídas em quatro grupos de 16 unidades, sendo: Natural, Óleo, Resina melamínica e Filme melamínico. As 16 peças já revestidas com tego filme formaram o quinto grupo experimental (Figura 1).

Figura 1 – Painéis compensados utilizados: (A) natural, sem revestimento; (B) com óleo vegetal; (C) resina melamínica; (D) filme melamínico e (E) tego filme.



2.2 Aplicação dos revestimentos nos painéis

A aplicação dos revestimentos foi realizada da seguinte forma: o óleo foi aplicado manualmente com pincel até atingir 200 g/m², seguido de secagem ao ar por 24 horas; a resina melamínica foi preparada por mistura de 85% resina, 10% farinha de trigo, 5% cloreto de amônio e corante, sendo aplicada manualmente até 15 g/m² e posteriormente curada em prensa hidráulica a 120°C, 4 kgf/cm² por 5 minutos. Já o filme melamínico foi posicionado diretamente sobre a superfície dos painéis e consolidado em prensa a 125°C, 12 kgf/cm² por 7 minutos.

2.3 Análise qualitativa

A Tabela 1 apresenta os tratamentos avaliados, resultantes da combinação entre cinco tipos de painéis, sendo: um sem revestimento e quatro revestidos e dois níveis de aplicação de desmoldante (com e sem). Para a análise qualitativa, os painéis já revestidos foram seccionados em peças de 95 × 65 × 65 mm. Cada conjunto de cinco peças formou uma fôrma (Figura 2A), montada com tiras de borracha e preenchida com concreto até metade da altura (Figura 2B). O concreto foi preparado na proporção 1:1 entre cimento Portland e areia grossa, adicionando-se 3600 ml de água. Nos tratamentos com desmoldante, o produto era aplicado nas superfícies internas imediatamente antes do preenchimento. Cada conjunto de cinco peças constituiu uma fôrma, que representou a unidade experimental. Para cada tratamento foram realizadas três repetições, totalizando três fôrmas por combinação entre tipo de revestimento e uso de desmoldante.

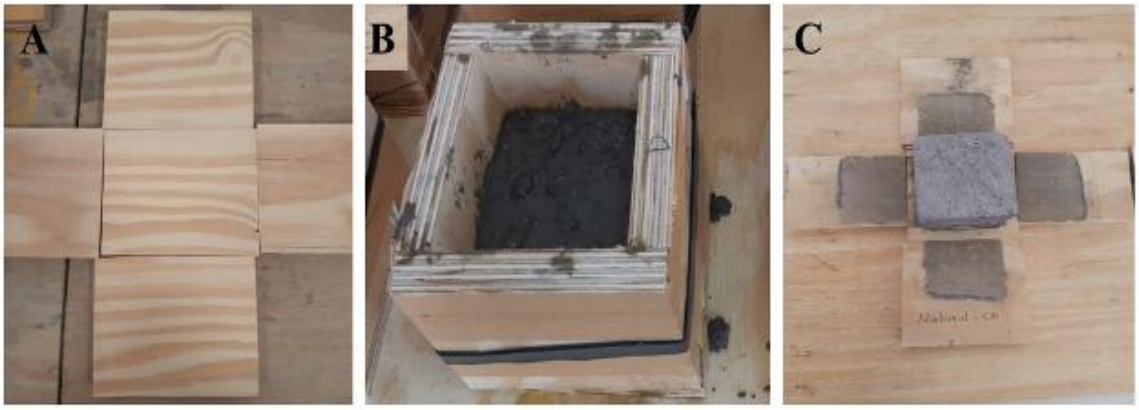
Tabela 15 – Plano experimental da análise qualitativa

Tipo de revestimento	Com desmoldante	Sem desmoldante
Sem revestimento (s/r)	T1	T6
Óleo vegetal (r/o)	T2	T7
Resina melamínica (r/rm)	T3	T8
Filme melamínico (r/fm)	T4	T9
Tego filme (r/tf)	T5	T10

Legenda: T: tratamento; s/r: sem revestimento; r/o: revestimento com óleo; r/rm: revestimento com resina melamínica; r/fm: revestimento com filme melamínico; r/tf: revestimento com tego filme.

Ao todo, foram confeccionadas 30 fôrmas, mantidas preenchidas por cinco dias até o desmolde (Figura 2C). Cada período de cinco dias correspondeu a um ciclo, no qual se registravam as superfícies e, nos tratamentos 6 a 10, reaplicava-se o desmoldante. Esse ciclo foi repetido 20 vezes, definindo o número de reusos avaliados.

Figura 13 - Fôrmas para concreto. (A) composição das fôrmas de concreto; (B) fôrmas de concreto durante ensaio; (C) fôrmas de concreto após desmolde.



Os critérios de avaliação das superfícies internas das fôrmas foram definidos a partir de reuniões realizadas ao longo de cerca de 100 dias com engenheiros civis, mestres e encarregados de obras, cujas contribuições orientaram o processo. Com base nos relatos, foram estabelecidas as classes de qualidade, apresentadas na Tabela 3.

Tabela 2 – Classes de qualidade para avaliação das superfícies das fôrmas

Classe	Avaliação	Características de referência
5	Muito bom	Cimento impregnado no revestimento em até 10% das superfícies.
4	Bom	Cimento impregnado entre 10% e 20% das superfícies.
3	Regular	Cimento impregnado entre 20% e 50% das superfícies
2	Ruim	Cimento impregnado entre 50% e 70% das superfícies
1	Muito ruim	Cimento impregnado acima de 80% das superfícies
0	Inutilizado	Revestimento removido gerando problemas no produto final, como farpas ou revestimentos presos no cimento.

Com base nestas classes os materiais com notas de entre 5 e 3 foram classificados como sem imperfeições no concreto, já aqueles com notas entre 1 e 2,9 foram classificados como materiais com imperfeições.

2.3 Análise estatística

O delineamento foi bi-fatorial, composto por cinco tipos de revestimento e dois níveis referentes ao uso ou não de desmoldante. As notas atribuídas após cada reutilização das fôrmas foram avaliadas quanto à presença de outliers, normalidade (Shapiro–Wilk e Kolmogorov–Smirnov) e homogeneidade das variâncias (Levene) para verificar a adequação da estatística paramétrica. Atendidos os pressupostos, aplicou-se Análise de Variância e, quando necessário, o teste de Tukey a 95% de confiança, utilizando os softwares Microsoft Excel® e SISVAR.

3. Resultados e discussão

A Tabela 3 mostra que todos os revestimentos tiveram desempenho semelhante até o 6º ciclo. A partir do 8º, o filme melamínico passou a apresentar queda acentuada na qualidade, com incrustamento de concreto, arrancamento de fibras e pior acabamento, chegando a nota zero no 15º ciclo devido ao descolamento do revestimento.

Ao final dos 20 ciclos, apenas os painéis com óleo mantiveram nota ≥ 1, sendo os mais duráveis, seguidos pela resina melamínica, que apresentou desempenho estatisticamente semelhante. Embora a literatura indique que revestimentos plastificados como filme melamínico e tego filme podem alcançar até 20 reusos quando bem manejados (Peres, 2013), no presente estudo esses materiais tiveram desempenho inferior, destacando a superioridade do óleo vegetal, cuja durabilidade está associada à sua insolubilidade em água e maior estabilidade dimensional (Dubey *et al*., 2012).

Tabela 3 – Notas aplicadas aos painéis ao longo do tempo de uso

Tratamento	**Número de dias de exposição dos painéis a condições do ciclo 7 da ASTM G154 (2006)**							
	5 (1 ciclo)	**30** (6 ciclos)	**40** (8 ciclos)	**55** (11 ciclos)	**70** (14 ciclos)	**75** (15 ciclos)	**85** (17 ciclos)	**100** (20 ciclos)
s/r	5,0 Aa	4,0 Aab	3,0 ABb	3,0 Ab	1,0 Cc	1,0 Bc	1,0 Ac	0,0 Bc
r/o	5,0 Aa	5,0 Aab	4,0 Aab	4,0 Abc	3,0 Ac	3,0 Ac	2,0 Ad	1,0 Ad
r/rm	5,0 Aa	4,0 Aa	4,0 Aa	3,0 ABb	2,0 Bbc	2,0 Bbc	1,0 Ac	1,0 Ad
r/fm	5,0 Aa	4,0 Aa	3,0 Bb	2,0 Bbc	1,0 Cc	0,0 Cd	0,0 Bd	0,0 Bd
r/tf	5,0 Aa	4,0 Ab	4,0 Ab	3,0 Abc	2,0 Bc	2,0 Bc	1,0 Ad	0,0 Bd
Média	5,0	3,6	3,6	3,0	1,8	1,6	1,0	0,4

Legenda: s/r: sem revestimento; r/o: revestimento com óleo; r/rm: revestimento com resina melamínica; r/fm: revestimento com filme melamínico; r/tf: revestimento com tego filme. Médias seguidas de mesma letra maiúscula na coluna, não diferem estatisticamente entre si para revestimento dentro de um mesmo ciclo (intervalo de tempo); médias seguidas de mesma letra minúscula na linha não diferem entre si para intervalo de tempo, dentro de um mesmo revestimento; ambos pelo Teste de Tukey (<0,05).

Ainda na Tabela 3 é possível verificar que todos os revestimentos iniciaram com nota 5, mas a manutenção dessa nota variou: óleo e resina melamínica até 10 ciclos, sem revestimento e filme melamínico até 7 ciclos, e tego filme até 5 ciclos. A partir do 8º ciclo, o filme melamínico apresentou queda acentuada, atingindo nota 1 no 14º ciclo e zero no 15º, devido ao descolamento do revestimento e forte incrustação de cimento.

Os painéis sem revestimento e com resina melamínica também tiveram redução em suas notas, porém de forma menos severa, enquanto o óleo apresentou a redução mais gradual, alcançando nota 3 apenas no 14º ciclo. A impregnação de cimento observada nas notas 4 e 3 está associada à capilaridade e ao modo de lançamento do concreto, conforme descrito por Ciotta & Machado (2018) e Marvila et al. (2017).

A Tabela 4 mostra que o desmoldante não alterou a qualidade superficial dos painéis e do concreto nos primeiros ciclos: até 13 usos (65 dias) para painéis sem revestimento e com óleo, até 10 usos (50 dias) para resina melamínica e tego filme, e até 7 usos (35 dias) para filme melamínico, que apresentou desempenho inferior independentemente da aplicação do produto. Esse fato pode ter sido originado pela falta de remoção adequada do desmoldante, uma vez que quando não removidos adequadamente, podem gerar descolamento do revestimento devido à falta de ancoragem do concreto à superfície, vale salientar, que devido à dificuldade de realização desse procedimento, isso não ocorre na maioria das obras, acarretando problemas futuros (Assali, 2012).

Tabela 4 – Influência do desmoldante nos painéis ao longo do tempo de uso

Revestimento	Tratamento	5 dias	30 dias	40 dias	55 dias	70 dias	75 dias	85 dias	100 dias
s/r	CD (T1)	5,0 A	4,0 A	3,3 A	3,0 A	1,3 A	1,3 A	0,7 A	0,3 A
	SD (T6)	5,0 A	4,7 A	4,0 A	3,7 A	3,3 B	2,3 A	1,3 A	1,0 A
r/o	CD (T2)	5,0 A	4,6 A	4,0 A	3,7 A	3,0 B	3,0 C	1,7 B	1,0 B
	SD (T7)	5,0 A	5,0 A	4,7 A	4,7 A	4,3 A	3,3 A	3,3 A	2,7 A
r/rm	CD (T3)	5,0 A	4,0 A	4,0 A	2,7 B	2,0 B	2,0 A	1,3 A	1,0 A
	SD (T8)	5,0 A	4,7 A	4,3 A	4,0 A	3,7 A	3,0 A	2,0 A	1,3 A
r/fm	CD (T4)	5,0 A	4,3 A	2,7 B	1,7 B	0,7 B	0,0 B	0,0 A	0,0 A
	SD (T9)	5,0 A	4,7 A	4,7 A	4,0 A	3,3 A	2,3 A	0,0 A	0,0 A
r/tf	CD (T5)	5,0 A	4,0 A	4,0 A	3,0 B	2,0 B	1,7 B	0,7 A	0,0 A
	SD (T10)	5,0 A	5,0 A	4,7 A	4,7 A	4,3 A	3,3 A	1,7 A	0,7 A

Legenda: s/r: sem revestimento; r/o: revestimento com óleo; r/rm: revestimento com resina melamínica; r/fm: revestimento com filme melamínico; r/tf: revestimento com tego filme. SD: sem desmoldante; CD: com desmoldade; T: tratamento; médias seguidas de mesma letra maiúscula na coluna, dentro de um mesmo revestimento, não diferem estatisticamente para um mesmo ciclo de uso pelo Teste de Tukey (<0,05).

A Tabela 5 mostra que o desmoldante não alterou o número de reusos dos painéis com óleo vegetal, que permaneceram com 15 reusos na classe sem imperfeições e 20 na classe com imperfeições. O mesmo ocorreu para a resina melamínica na classe superior, já para os demais revestimentos, o desmoldante aumentou o número de reusos.

Tabela 5 – Número de reusos recomendados para cada tipo de revestimento

Tratamento	Desmoldante	Sem imperfeições no concreto (notas entre 5 e 3)	Com imperfeições no concreto (notas entre 1 e 5)
Sem revestimento	S/D	11	15 (11 + 4)
	C/D	14	20
Óleo vegetal	S/D	15	20
	C/D	15	20
Resina melamínica	S/D	8	20
	C/D	15	20
Filme melamínico	S/D	6	11
	C/D	14	15
Tegofilme	S/D	11	15
	C/D	15	17

Legenda: S/D: sem desmoldante; C/D:

Os maiores números de reutilização obtidos foram 15 reusos (concreto sem imperfeições) para resina melamínica, tego filme e óleo vegetal com desmoldante; e 20 reusos (concreto com imperfeições) para painéis sem revestimento com desmoldante, óleo vegetal e resina melamínica. Esses resultados estão alinhados com Courard et al. (2012), que também observaram que o desmoldante não influencia significativamente o total de reutilizações em fôrmas de madeira.

4. Conclusões

Os resultados mostram que o tipo de revestimento exerce influência decisiva na durabilidade e na qualidade superficial dos painéis compensados ao longo de vinte reusos. O óleo vegetal apresentou o melhor desempenho, mantendo notas superiores por mais ciclos e garantindo maior número de reutilizações, seguido pela resina melamínica. Revestimentos plastificados, especialmente o filme melamínico, tiveram queda acentuada de qualidade e menor resistência ao uso contínuo. O desmoldante contribuiu pontualmente para aumentar o número de reusos em alguns revestimentos, mas não alterou o desempenho dos painéis mais estáveis, como os revestidos com óleo. Assim, para painéis compensados não estruturais de uso exterior empregados como fôrmas de concreto, o óleo vegetal se destaca como a solução mais eficiente e durável.

5. Agradecimentos

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal da Universidade do Estado de Santa Catarina – UDESC; à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - CAPES e à Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação de Santa Catarina – FAPESC.

6. Referências bibliográficas

Almeida, A. E., & Ferreira, O. P. (2006). Poliuretana derivada de óleos vegetais exposta ao intemperismo artificial. Polímeros, 16(3), 252–256. https://doi.org/10.1590/S0104-14282006000300017

Assali, M. P., & Loh, K. (2011). Viabilidade do emprego de agentes retardadores em substituição aos desmoldantes convencionais na moldagem de concreto para aplicação de argamassas de revestimento. Ambiente Construído, 11(4), 7–23. https://doi.org/10.1590/S1678-86212011000400002

Barros Filho, B. M. (2009). Painéis aglomerados a base de bagaço de cana-de-açúcar e resinas ureia-formaldeído e melamina-formaldeído (Dissertação de Mestrado). Universidade Federal de Ouro Preto.

Courard, L., Goffinet, C., & Migeotte, N. (2012). Influence of the reuse of OSB and marine plywood formworks on concrete surface aesthetics. Materials and Structures, 45, 1331–1343. https://doi.org/10.1617/s11527-012-9835-0

Bekhta, P., Pipíška, T., Gryc, V., Sedliačik, J., Král, P., Ráheľ, J., & Vaněrek, J. (2023). Properties of plywood panels composed of thermally densified and non-densified alder and birch veneers. Forests, 14(1), 96. https://doi.org/10.3390/f14010096

Baldwin, R. F. (1995). Plywood and veneer-based products: Manufacturing practices (388 p.). M. Freeman.

Carvalho, L., Magalhães, F., & Ferra, J. (2012). Formaldehyde emissions from wood-based panels: Testing methods and industrial perspectives. Em Formaldehyde: Chemistry, applications and role in polymerization (pp. 1–45).

Carneiro, T. L. A. (2017). Influência da mescla de resinas ureia-formaldeído e difenilmetano 4,4’-diisocianato (MDI) nas propriedades mecânicas e emissão de formaldeído de painéis de madeira aglomerada (Dissertação de Mestrado). Universidade Federal de São Carlos.

Ciotta, P. H., & Junior, F. R. S. M. (2018). A importância do controle de qualidade e rastreabilidade do concreto armado usinado in loco. Revista Tecnológica, 7(1), 1–18.

Dubey, M. K., Pang, S., & Walker, J. (2012). Changes in chemistry, color, dimensional stability and fungal resistance of Pinus radiata D. Don wood with oil heat-treatment. Holzforschung, 66(1), 49. https://doi.org/10.1515/HF.2011.117

Iwakiri, S., Andrade, A. S. D., Junior, A. A. C., Saks, D. D. C. O., Prata, J. G., Krambeck, L. B. P., & Walter, S. M. M. (2012). Produção de compensado estrutural de Pinus taeda L. com utilização de papel impregnado com resina fenólica. Floresta e Ambiente, 11(1), 25–28.

Iwakiri, S., & Trianoski, R. (2020). Painéis de madeira reconstituída (2ª ed., 259 p.). Fundação de Pesquisas Florestais do Paraná.

Marvila, M. T., Azevedo, A. R. G., Alexandre, J., Zanelato, E. B., Azeredo, N. G., Simonassi, N. T., & Monteiro, S. N. (2019). Correlation between the properties of structural clay blocks obtained by destructive tests and ultrasonic pulse tests. Journal of Building Engineering, 26. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2019.100869

Peres, P. O. (2013). Um estudo comparativo sobre os sistemas de fôrmas: mesa voadora x convencional (Projeto de final de curso, Bacharelado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio de Janeiro.

Sanches, F. G., & Iwakiri, S. (2013). Influência dos parâmetros do ciclo de prensagem na qualidade do revestimento de painéis compensados plastificados. Floresta e Ambiente, 20(4), 564–575. https://doi.org/10.4322/floram.2013.038

Sanches, F. G. (2012). Avaliação dos parâmetros do processo de revestimento de painéis compensados com filme fenólico para uso como fôrmas de concreto (Dissertação de Mestrado). Universidade Federal do Paraná.

Souza, C. S. M., & Barata, T. Q. F. (2011). Materiais derivados da madeira (p. 37). Departamento de Tecnologia e Arquitetura, Faculdade de Arquitetura e Urbanismo.

Yildiz, S., Tomak, E. D., Yildiz, U. C., & Ustaomer, D. (2013). Effect of artificial weathering on the properties of heat treated wood. Polymer Degradation and Stability, 98(8), 1419–1427. https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2013.05.004

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Influência do teor de umidade nas propriedades tecnológicas da madeira de Tauari-vermelho (*Cariniana micrantha*)

Leonardo Amador Cruz[1]; Geraldo Bortoletto Junior[1]; Ivaldo Pontes Jankowsky[1]

[1] Universidade de São Paulo (USP), Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" (ESALQ)

Resumo: A caracterização tecnológica da madeira é fundamental para sua utilização segura em aplicações estruturais, sendo o teor de umidade um dos principais fatores que influenciam suas propriedades físicas e mecânicas. Entretanto, informações sobre espécies nativas brasileiras, como *Cariniana micrantha* (tauari-vermelho), ainda são limitadas. Este estudo objetivou caracterizar as propriedades físicas e mecânicas dessa espécie e avaliar a influência do teor de umidade sobre seu comportamento mecânico. As propriedades físicas foram determinadas nas condições saturada e a 12% de umidade, enquanto as propriedades mecânicas foram avaliadas por meio dos ensaios de flexão estática e compressão paralela às fibras. As diferenças entre as condições de umidade foram analisadas por testes estatísticos pareados. O aumento do teor de umidade promoveu alterações significativas nas propriedades físicas da madeira e reduziu em 33,9% o módulo de ruptura (MOR), em 26,2% o módulo de elasticidade (MOE) e em 38,7% a resistência à compressão paralela às fibras ($p < 0,05$). Os resultados demonstram que o teor de umidade reduz significativamente a resistência e a rigidez da madeira de *Cariniana micrantha* e fornecem subsídios para sua caracterização tecnológica e utilização estrutural, contribuindo para a diferenciação da espécie dentro do grupo comercial denominado tauari.
Palavras-chave: Caracterização Tecnológica; Flexão Estática; Compressão Paralela às Fibras.

Influence of Moisture Content on the Technological Properties of Tauari-vermelho (*Cariniana micrantha*) Wood

Abstract: Wood characterization is essential for its safe use in structural applications, and moisture content is one of the main factors affecting its physical and mechanical properties. However, information on native Brazilian species such as *Cariniana micrantha* (red tauari) remains limited. This study aimed to characterize the physical and mechanical properties of this species and evaluate the influence of moisture content on its mechanical behavior. Physical properties were determined under saturated and 12% moisture content conditions, whereas mechanical properties were evaluated through static bending and compression parallel to the grain tests. Differences between moisture conditions were assessed using paired statistical tests. Increased moisture content significantly affected the physical properties of the wood and reduced the modulus of rupture (MOR), modulus of elasticity (MOE), and compression strength parallel to the grain by 33.9%, 26.2%, and 38.7%, respectively ($p < 0.05$). These findings demonstrate that moisture content significantly reduces the strength and stiffness of *Cariniana micrantha* wood and provide valuable information for its technological characterization and structural use, contributing to the differentiation of this species within the commercial group known as tauari.
Keywords: Technological Characterization; Static Bending; Compression Parallel to the Grain.

1. Introdução

O Brasil possui uma das maiores diversidades de espécies florestais do mundo, muitas das quais apresentam elevado potencial para aplicações estruturais e industriais em razão de

suas propriedades tecnológicas. O aproveitamento racional dessas madeiras, entretanto, depende da adequada caracterização de suas propriedades físicas e mecânicas, fundamentais para garantir desempenho, segurança e ampliar sua utilização em produtos de maior valor agregado (Baraúna; Oliveira, 2009; Asdrubali et al., 2017).

Entre os fatores que condicionam o desempenho da madeira, o teor de umidade exerce papel determinante. Por se tratar de um material biológico, a madeira apresenta comportamento anisotrópico e higroscópico, com propriedades influenciadas pela direção anatômica e pela quantidade de água presente na parede celular (Logsdon, 1998; Arriaga et al., 2021). Abaixo do ponto de saturação das fibras, a água adsorvida interfere nas interações entre os polímeros estruturais, modificando a resistência mecânica e promovendo retração e inchamento, principalmente nas direções tangencial e radial (Skaar, 1984; Almeida & Hernández, 2006; Gerhards, 2007; Vidaurre et al., 2018; Mascarenhas et al., 2021). Dessa forma, o controle do teor de umidade constitui etapa essencial da caracterização tecnológica da madeira e da avaliação de seu desempenho em diferentes condições de utilização (Andrade et al., 2024).

A caracterização tecnológica fundamenta-se na determinação integrada de propriedades físicas e mecânicas, como massa específica, densidade básica, estabilidade dimensional, resistência à compressão paralela às fibras e flexão estática. Esses parâmetros são amplamente empregados na avaliação da qualidade tecnológica da madeira e fornecem subsídios para sua classificação e utilização em aplicações estruturais (Ballarin & Palma, 2003; Batista et al., 2010; Marques et al., 2012; Almeida et al., 2014; Eleotério et al., 2018; Faria et al., 2019; Ehrhart et al., 2020; De Lima Araujo et al., 2023).

Apesar da ampla utilização comercial de espécies nativas amazônicas, muitas ainda apresentam informações limitadas quanto às suas propriedades tecnológicas. Entre elas destaca-se o tauari-vermelho (*Cariniana micrantha*), espécie utilizada na construção civil e na fabricação de produtos de maior valor agregado em função das características de sua madeira (IPT, 2013). Além disso, a denominação comercial "tauari" engloba espécies dos gêneros *Allantoma*, *Cariniana* e *Couratari*, agrupadas em razão de suas características dendrológicas semelhantes, o que reforça a necessidade de caracterizações individualizadas para ampliar o conhecimento sobre suas propriedades e subsidiar sua utilização tecnológica (Procópio & Secco, 2008).

Diante desse contexto, este estudo teve como objetivo caracterizar as propriedades físicas e mecânicas da madeira de tauari-vermelho (*Cariniana micrantha*) e avaliar a influência do teor de umidade sobre seu comportamento mecânico por meio dos ensaios de flexão estática

e compressão paralela às fibras, contribuindo para o conhecimento tecnológico da espécie e para seu emprego mais seguro em aplicações estruturais e industriais.

2. Material e métodos

2.1. Materiais

Foram utilizados 12 corpos de prova de madeira de tauari-vermelho (*Cariniana micrantha*) em cada ensaio para a determinação das propriedades físicas e dos ensaios mecânicos de compressão paralela às fibras e flexão estática. Os ensaios foram realizados nos Laboratórios de Secagem e Tratamento de Madeiras e de Ensaios Mecânicos de Madeira e Derivados da Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo (ESALQ/USP).

2.2. Determinação das propriedades físicas

A variação dimensional, a massa específica, a densidade básica e o teor de umidade foram determinados conforme os procedimentos da ABNT NBR 7190-3:2022. As dimensões lineares e as massas dos corpos de prova foram determinadas nas condições seca ao ar, saturada e seca em estufa (103 ± 2 °C), permitindo o cálculo do teor de umidade (U), da massa específica aparente nas condições seca ao ar (ρ_{ar}) e saturada (ρ_{sat}), e da densidade básica (ρ_b), conforme as Equações (1) a (4).

$$U(\%) = \left(\frac{m_i - m_0}{m_0}\right) \times 100 \quad (1)$$

em que m_i é a massa da amostra na condição inicial e m_0 é a massa seca em estufa.

$$\rho_{ar} = \frac{m_{ar}}{V_{ar}} \quad (2)$$

$$\rho_{sat} = \frac{m_{sat}}{V_{sat}} \quad (3)$$

$$\rho_b = \frac{m_0}{V_{sat}} \quad (4)$$

em que m_{ar}, m_{sat} e m_0 representam as massas da madeira nas condições seca ao ar, saturada e seca em estufa, respectivamente, enquanto V_{ar} e V_{sat} correspondem aos volumes nas condições seca ao ar e saturada, respectivamente.

A variação dimensional foi determinada nas direções radial, tangencial e longitudinal por meio do cálculo da retração linear (R) e do inchamento linear (I), considerando as condições saturada e seca em estufa, conforme as Equações (5) e (6).

$$(5) R(\%) = \left(\frac{L_{sat} - L_0}{L_{sat}}\right) \times 100 \quad ¿$$

$$(6) I(\%) = \left(\frac{L_{sat} - L_0}{L_0}\right) \times 100 \quad ¿$$

em que L_{sat} e L_0 correspondem às dimensões lineares da amostra nas condições saturada e seca em estufa, respectivamente.

Os cálculos foram realizados separadamente para cada direção anatômica, permitindo a avaliação do comportamento dimensional e da anisotropia da madeira.

2.3. Flexão estática

Os ensaios de flexão estática foram realizados para avaliar a influência do teor de umidade sobre o módulo de ruptura (MOR) e o módulo de elasticidade (MOE) da madeira de tauari-vermelho (*Cariniana micrantha*), conforme os procedimentos da ABNT NBR 7190-1:2022. Foram utilizados corpos de prova com dimensões nominais de 2 × 2 × 45 cm e vão de ensaio de 42 cm. Antes dos ensaios, foram determinadas as dimensões geométricas e as massas dos corpos de prova para o cálculo da massa específica aparente. Os ensaios foram conduzidos em máquina universal de ensaios, com o deslocamento monitorado por transdutor de deslocamento linear (LVDT). Foram registrados a força máxima aplicada e os valores de força e deslocamento correspondentes a 10% e 50% da carga máxima para determinação do MOR e do MOE. O módulo de ruptura (MOR) e o módulo de elasticidade (MOE) foram determinados conforme as Equações (7) e (8).

$$(7)\ MOR = \frac{3 \cdot F_{max} \cdot L}{2 \cdot b \cdot h^2}$$

$$(8)\ MOE = \frac{\left(F_{50\%} - F_{10\%}\right) \cdot L^3}{\left(d_{50\%} - d_{10\%}\right) \cdot 4 \cdot b \cdot h^3}$$

em que $F_{máx}$ corresponde à força máxima aplicada; L ao vão entre os apoios; b e h à base e à altura da seção transversal do corpo de prova, respectivamente; $F_{50\%}$ e $F_{10\%}$ às forças correspondentes a 50% e 10% da carga máxima, respectivamente; e $d_{50\%}$ e $d_{10\%}$ aos deslocamentos correspondentes a essas cargas.

Após os ensaios, os corpos de prova foram secos em estufa a 103 ± 2 °C até massa constante para determinação do teor de umidade. Os valores de MOR e MOE obtidos na condição seca ao ar foram corrigidos para 12% de umidade, conforme os fatores de correção estabelecidos na ABNT NBR 7190-1:2022.

2.4. Compressão paralela às fibras

Os ensaios de compressão paralela às fibras foram realizados para determinar a resistência à compressão paralela às fibras (F_{Co}) da madeira de tauari-vermelho (*Cariniana micrantha*), nas condições saturada em água e seca ao ar, conforme os procedimentos da ABNT NBR 7190-1:2022. Foram utilizados corpos de prova com dimensões nominais de 2 × 2 × 3 cm. Embora inferiores às dimensões padronizadas pela norma, essas dimensões atenderam ao critério de estabilidade geométrica, apresentando índice de esbeltez inferior ao limite recomendado ($\lambda \leq 21$), assegurando a ruptura por compressão sem influência de flambagem. Antes dos ensaios, foram determinadas as dimensões da seção transversal e as massas dos corpos de prova para o cálculo da área resistente e da massa específica aparente. Os ensaios foram conduzidos em máquina universal de ensaios, com aplicação de carga axial paralela às fibras até a ruptura. A resistência à compressão paralela às fibras (F_{Co}) foi determinada conforme a Equação (10).

$$(10)\ F_{Co} = \frac{F_{max}}{A}$$

em que $F_{máx}$ corresponde à força máxima aplicada e A à área da seção transversal do corpo de prova.

Após os ensaios, os corpos de prova foram secos em estufa a 103 ± 2 °C até massa constante para determinação do teor de umidade. Os valores de F_{Co} obtidos na condição seca ao ar foram corrigidos para 12% de umidade, conforme os procedimentos da ABNT NBR 7190-1:2022.

2.5. Análise estatística

As análises estatísticas foram realizadas no ambiente R (R Core Team, 2024), versão 4.4.2. Foram obtidas estatísticas descritivas para as propriedades físicas e mecânicas e realizadas comparações pareadas entre as condições saturada e seca ao ar (corrigida para 12% de umidade) por meio dos testes *t* pareado e de Wilcoxon. Também foram calculadas as reduções percentuais das propriedades mecânicas. O nível de significância adotado foi de 5% ($\alpha = 0,05$).

3. Resultados e discussão

3.1. Propriedades físicas da madeira

As propriedades físicas da madeira de *Cariniana micrantha* são apresentadas na Tabela 1. As propriedades relacionadas à densidade apresentaram baixa variabilidade (CV < 5%), indicando elevada homogeneidade entre as amostras, enquanto as propriedades dimensionais

apresentaram maior dispersão, especialmente a retração longitudinal, devido à reduzida magnitude dessa propriedade. A densidade básica média foi de 0,581 ± 0,026 g cm^{-3}, valor consistente com os reportados por Procópio e Secco (2008), Barros et al. (2014), Lima et al. (2022) e Serviço Florestal Brasileiro (2025), enquadrando a espécie na faixa de densidade intermediária descrita pelo IPT (2013). A massa específica aumentou da condição seca para a saturada, evidenciando a influência do teor de umidade sobre essa propriedade, conforme descrito por Skaar (1984) e observado por Cruz et al. (2019) e Laskowska et al. (2021). Esses resultados reforçam o potencial da espécie para aplicações que demandam equilíbrio entre resistência mecânica, trabalhabilidade e estabilidade dimensional.

Tabela 1 – Estatística descritiva das propriedades físicas da madeira de *Cariniana micrantha*.

Propriedade	**Unidade**	**Média ± DP**	**CV (%)**
Densidade básica	g cm^{-3}	0,581 ± 0,026	4,50
Massa específica (seca)	g cm^{-3}	0,675 ± 0,032	4,71
Massa específica (12%)	g cm^{-3}	0,741 ± 0,035	4,66
Massa específica (seca ao ar)	g cm^{-3}	0,726 ± 0,030	4,18
Massa específica (saturada)	g cm^{-3}	0,925 ± 0,034	3,67
Retração radial	%	6,41 ± 0,82	12,70
Retração tangencial	%	7,62 ± 0,84	10,96
Retração longitudinal	%	0,34 ± 0,13	38,10
Retração volumétrica	%	13,80 ± 1,26	9,09
Índice T/R	–	1,20 ± 0,14	11,60

Os valores de retração e inchamento confirmaram o comportamento anisotrópico característico da madeira, com maiores variações nas direções tangencial e radial e menores na longitudinal. A retração volumétrica média foi de 13,8%, próxima ao valor de 14,0% reportado por Procópio e Secco (2008), enquanto o índice de anisotropia (T/R) foi de 1,20, inferior ao observado pelos autores (1,60), indicando maior estabilidade dimensional da madeira avaliada. A Figura 1 apresenta os valores médios de retração e inchamento nas diferentes direções anatômicas (Figura 1A) e a relação entre retração e teor de umidade (Figura 1B). Conforme descrito por Skaar (1984), as alterações dimensionais ocorrem abaixo do ponto de saturação das fibras, quando a perda de água de ligação promove a contração da parede celular. A estimativa do ponto de saturação em torno de 30% corroborou esse comportamento, evidenciando que a madeira de *Cariniana micrantha* apresenta estabilidade dimensional compatível com a literatura e potencial para aplicações estruturais e industriais.

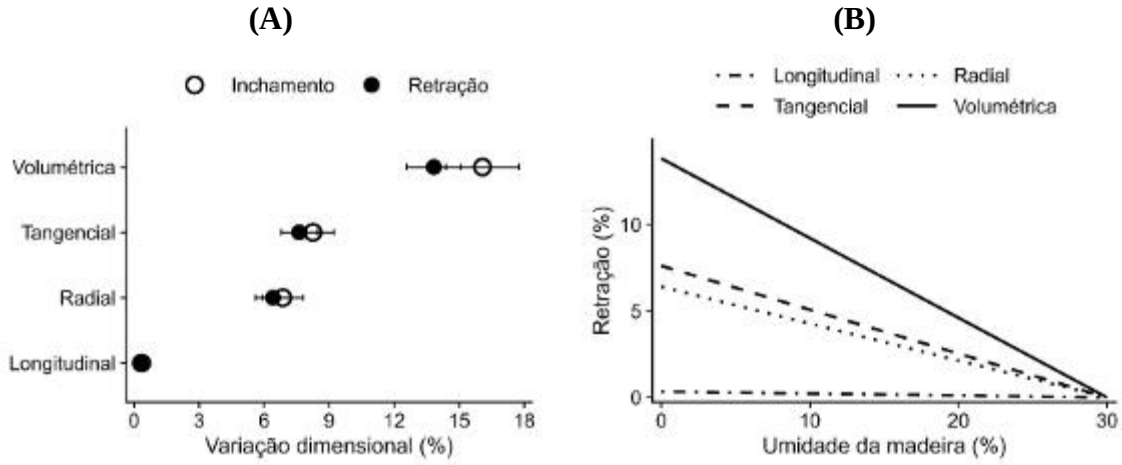


Figura 1 – *Inchamento e retração da madeira de Cariniana micrantha*. **(A)** Valores médios de inchamento e retração nas direções longitudinal, radial, tangencial e volumétrica. **(B)** Comportamento da retração em função do teor de umidade da madeira.

3.2. Efeito da umidade sobre as propriedades mecânicas

3.2.1. Flexão estática

A condição higroscópica influenciou significativamente o comportamento mecânico da madeira de *Cariniana micrantha* sob flexão estática. A saturação promoveu redução de 33,95% no módulo de ruptura (MOR) e de 26,18% no módulo de elasticidade (MOE) em relação à condição de 12% de umidade (Tabela 2), indicando maior sensibilidade da resistência à flexão ao aumento do teor de umidade em comparação à rigidez da madeira.

Tabela 2 – Valores médios (± desvio-padrão) e comparação estatística do módulo de ruptura (MOR) e do módulo de elasticidade (MOE) da madeira de *Cariniana micrantha* nas condições de 12% de umidade e saturada.

Propriedade	**12%**	**Saturada**	**Δ (%)**	***p* (teste *t*)**	***p* (Wilcoxon)**
MOR (MPa)	110,2 ± 6,0	72,8 ± 6,2	-33,95	<0,001	0,002
MOE (MPa)	13213 ± 1280	9754 ± 2336	-26,18	<0,001	0,002

A Figura 2 apresenta a comparação pareada dos valores de MOR e MOE nas condições de 12% de umidade e saturada. Observa-se redução consistente em todos os corpos de prova, evidenciando o efeito uniforme da saturação sobre as propriedades mecânicas. Os valores obtidos a 12% de umidade situam-se na faixa reportada para madeiras tropicais de uso estrutural, em concordância com Laskowska et al. (2021). A redução do MOR e do MOE é atribuída ao efeito plastificante da água na parede celular, comprometendo a transferência de esforços entre seus componentes estruturais (Gerhards, 2007), o que reforça a importância do

controle do teor de umidade para a caracterização mecânica e a utilização estrutural da madeira (Skaar, 1984).

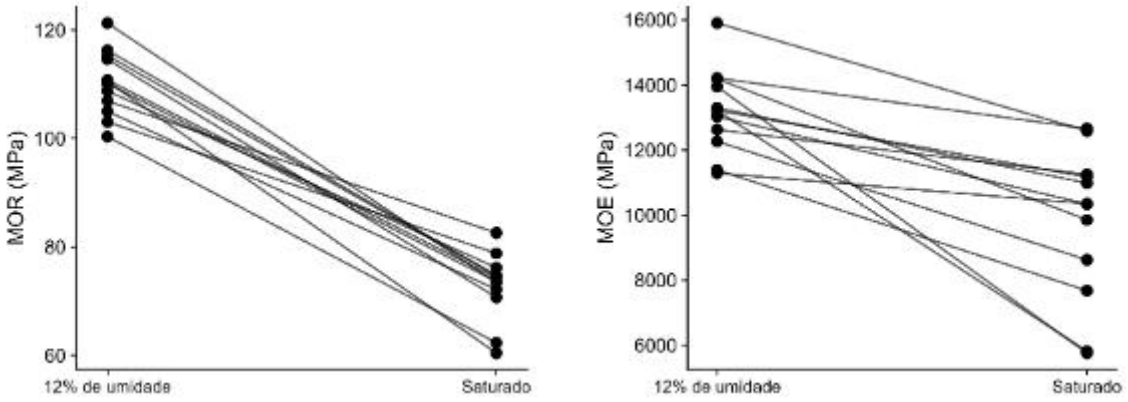


Figura 2 – Comparação pareada dos valores do módulo de ruptura (MOR) e do módulo de elasticidade (MOE) da madeira de *Cariniana micrantha* nas condições de 12% de umidade e saturada.

3.2.2. Compressão paralela às fibras

A condição higroscópica influenciou significativamente a resistência à compressão paralela às fibras da madeira de *Cariniana micrantha*. A saturação promoveu redução de 38,73% na resistência em relação à condição de 12% de umidade (Tabela 3), evidenciando elevada sensibilidade dessa propriedade ao aumento do teor de umidade.

Tabela 3 – Valores médios (± desvio-padrão) da resistência à compressão paralela às fibras da madeira de *Cariniana micrantha* e resultados da comparação estatística entre as condições de umidade.

Condição	**Resist. (MPa)**	**Δ (%)**	***p* (teste *t*)**	***p* (Wilcoxon)**
12%	53,7 ± 3,5	—	—	—
Saturada	32,9 ± 3,3	-38,73	<0,001	0,0025

A Figura 3 apresenta a comparação pareada da resistência à compressão paralela às fibras nas duas condições de umidade. Observa-se redução consistente para todos os corpos de prova, indicando efeito uniforme da saturação. Esse comportamento é atribuído ao efeito plastificante da água ligada na parede celular, reduzindo a resistência mecânica da madeira (Carrasco et al., 2016), em concordância com os resultados de Carrasco et al. (2008) e Lenzi et al. (2017).

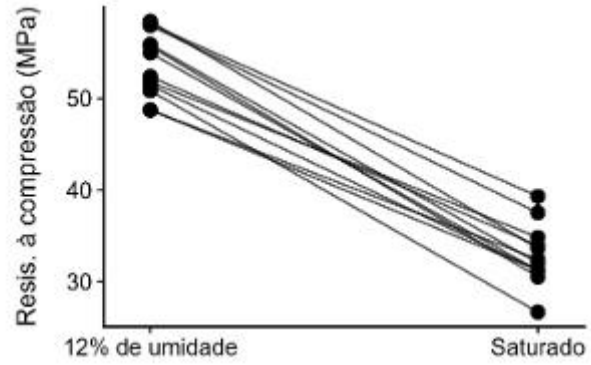


Figura 3 – Comparação pareada da resistência à compressão paralela às fibras da madeira de *Cariniana micrantha* nas condições a 12% de umidade e saturada.

4. Conclusões

O presente estudo caracterizou as propriedades físicas e mecânicas da madeira de *Cariniana micrantha* e demonstrou que o aumento do teor de umidade influencia significativamente seu comportamento, promovendo alterações nas propriedades físicas e redução da resistência à compressão paralela às fibras, da resistência e da rigidez em flexão estática. Os resultados reforçam a importância do controle do teor de umidade na caracterização tecnológica e na utilização estrutural da madeira, além de ampliar a base de dados disponível para a espécie, contribuindo para sua caracterização.

5. Agradecimentos

Os autores agradecem ao auxiliar de laboratório Alex Canele pelo apoio e dedicação na preparação das amostras e na execução dos ensaios experimentais.

6. Referências bibliográficas

Almeida, D. H., Scaliante, R. M., Christoforo, A. L., Varanda, L. D., Lahr, F. A. R., Dias, A. A., & Júnior, C. C. (2014). Tenacidade da madeira como função da densidade aparente. Revista Árvore, 38(1), 203–207. https://doi.org/10.1590/S0100-67622014000100020

Almeida, G., & Hernández, R. (2006). Changes in physical properties of tropical and temperate hardwoods below and above the fiber saturation point. Wood Science and Technology, 40, 599–613. https://doi.org/10.1007/S00226-006-0083-8

Andrade, M., Ornaghi, H., Monticeli, F., Poletto, M., & Zattera, A. (2024). A survey on the effect of the chemical composition on the thermal, physical, mechanical, and dynamic mechanical thermal analysis of three Brazilian wood species. Polymers, 16. https://doi.org/10.3390/polym16182651

Arriaga, F., Esteban, M., Relea, E., & Íñiguez-González, G. (2021). Timber structures: Design, materials and structural applications (2nd ed.). Springer.

Asdrubali, F., D'Alessandro, F., Schiavoni, S., & Ricci, M. (2017). A review of structural, thermo-physical, acoustical, and environmental properties of wooden materials for building applications. Building and Environment, 114, 307–332. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.12.033

Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2022). ABNT NBR 7190:2022 – Projeto de estruturas de madeira. ABNT.

Ballarin, A. W., & Palma, H. A. L. (2003). Propriedades de resistência e rigidez da madeira juvenil e adulta de *Pinus taeda* L. Revista Árvore, 27(3), 371–380. https://doi.org/10.1590/S0100-67622003000300014

Baraúna, E. E. P., & Oliveira, V. S. de. (2009). Umidade de equilíbrio da madeira de angelim vermelho (*Dinizia excelsa* Ducke), guariúba (*Clarisia racemosa* Ruiz & Pav.) e tauarí vermelho (*Cariniana micrantha* Ducke) em

diferentes condições de temperatura e umidade relativa. Acta Amazonica, 39(1), 91–95. https://doi.org/10.1590/S0044-59672009000100009

Barros, S. V. S., Muniz, G. I. B., & Matos, J. L. M. (2014). Caracterização colorimétrica das madeiras de três espécies florestais da Amazônia. Cerne, 20(3), 337–342. https://doi.org/10.1590/01047760201420031421

Batista, D. C., Klitzke, R. J., & Santos, C. P. (2010). Densidade básica e retratibilidade da madeira de clones de três espécies de Eucalyptus. Ciência Florestal, 20(4), 665–674. https://doi.org/10.5902/198050982425

Carrasco, E., Carvalho, E. M., & Oliveira, A. C. (2008). Determinação da incerteza de medição nos ensaios de compressão paralela às fibras. Revista Árvore, 32(1), 119–127. https://doi.org/10.1590/S0100-67622008000100014

Carrasco, E., Oliveira, A. C., & Mantilla, J. N. R. (2016). Influência da temperatura na resistência e no módulo de elasticidade em madeira de híbridos de eucaliptos. Ciência Florestal, 26(2), 389–400. https://doi.org/10.5902/1980509822740

Cruz, G. A., Pio, N. S., & Iwakiri, S. (2019). Longitudinal and transverse variation in the physical properties of red tauari wood. Floresta e Ambiente, 26. https://doi.org/10.1590/2179-8087.033617

De Lima Araujo, S., Melo, A. A., De Jesus Oliveira, L., Da Silva, J. R., Almeida, M. N. F., Da Silva, P. R., Vidaurre, G. B., & Godinho, T. P. (2023). Cor, grã e propriedades físico-mecânicas da madeira de Corymbia e Eucalyptus não tradicionais. Scientia Forestalis, 51, e28. https://doi.org/10.18671/SCIFOR.V51.28

Ehrhart, T., Steiger, R., Palma, P., Gehri, E., & Frangi, A. (2020). Glulam columns made of European beech timber: compressive strength and stiffness parallel to the grain, buckling resistance and adaptation of the effective-length method according to Eurocode 5. Materials and Structures, 53, 1–12. https://doi.org/10.1617/S11527-020-01524-6

Eleotério, J. R., Vibrans, A. C., Kollross, P. R., Uller, H. F., & Klitzke, R. J. (2018). Perfil axial e radial da massa específica básica da madeira de *Miconia* cinnamomifolia (DC.) Naudin. Revista Ciência da Madeira, 9(3), 170–180. https://doi.org/10.12953/2177-6830/rcm.v9n3p170-180

Faria, D. L., Ribeiro, L. F., Oliveira, K. P., & Júnior, J. C. (2019). Propriedades físicas e mecânicas de painéis de lâminas paralelas (PLP) produzidos com madeira de *Hevea brasiliensis*. Revista Ciência da Madeira, 10(3), 237–254. https://doi.org/10.12953/2177-6830/RCM.V10N3P237-254

Gerhards, C. C. (2007). Effect of moisture content and temperature on the mechanical properties of wood: An analysis of immediate effects. Wood and Fiber Science, 14(1), 4–36.

Instituto de Pesquisas Tecnológicas. (2013). *Catálogo de madeiras brasileiras para a construção civil*. IPT. https://www.ipt.br/publicacoes/3-catalogo_de_madeiras_brasileiras_para_a_construcao_civil.htm

Laskowska, A., Marchwicka, M., Trzaska, A., & Boruszewski, P. (2021). Surface and physical features of thermo-mechanically modified iroko and tauari wood for flooring application. Coatings, 11(12). https://doi.org/10.3390/coatings11121528

Lenzi, F., De Oliveira Matias, P., & Risson, A. (2017). Análise da utilização de fibras de vidro em vigas de madeira laminada colada submetidas à flexão simples. REEC – Revista Eletrônica de Engenharia Civil, 14(1). https://doi.org/10.5216/REEC.V14I1.44320

Lima, E. A. C. de, Sattler, A. de B., Santos, L. K. B., Jansen, D. C., & Corrêa, V. M. (2022). Determinação do teor de umidade e densidade básica para madeira de *Cariniana micrantha* Ducke baseado na norma da ABNT NBR 7190-3/2022. Conjecturas, 22(18), 324–336. https://doi.org/10.53660/CONJ-2121-2X10

Logsdon, N. B. (1998). Influência da umidade nas propriedades de resistência e rigidez da madeira (Tese de doutorado). Universidade de São Paulo.

Marques, S. S., Silva Oliveira, J. T. da, Paes, J. B., Alves, E. S., Silva, A. G., & Fiedler, N. C. (2012). Estudo comparativo da massa específica aparente e da retratibilidade da madeira de pau-brasil (*Caesalpinia echinata* Lam.) nativa e de reflorestamento. Revista Árvore, 36(2), 373–380. https://doi.org/10.1590/S0100-67622012000200019

Mascarenhas, A. R. P., Lobão, M. S., Silva, J. R. M., Santos, R. C., & Garcia, R. A. (2021). Variação dimensional e anisotropia da madeira de espécies tropicais. Floresta, 51(2), 413–421. https://doi.org/10.5380/RF.V51I2.69978

Procópio, L. C., & Secco, R. S. (2008). A importância da identificação botânica nos inventários florestais: O exemplo do "tauari" (*Couratari* spp. e *Cariniana* spp. – Lecythidaceae) em duas áreas manejadas no estado do Pará. Acta Amazonica, 38(1), 31–44.

Serviço Florestal Brasileiro. (2025). *Tauari (Couratari spp.)*. Laboratório de Produtos Florestais. https://lpf.florestal.gov.br/pt-br/?option=com_madeirasbrasileiras&view=especieestudada&especieestudadaid=52

Skaar, C. (1984). Wood–water relations. Springer-Verlag.

Vidaurre, G. B., Carvalho, A. M., Carvalho, D. E., Moulin, J. C., & Gonçalez, J. C. (2018). Propriedades físicas e anatômicas da madeira e suas relações com a estabilidade dimensional. Ciência Florestal, 28(1), 1–12. https://doi.org/10.5902/1980509831583

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

INFLUÊNCIA DO TRATAMENTO ENZIMÁTICO NAS PROPRIEDADES DOS FIOS DE MICROFIBRILAS DE CELULOSE DE BAGAÇO DE CANA

Gabriel Amado Ferreira Lauria[1]; Flavio Rodrigues Lima[1]; Felipe Gabriel Santos Araujo[1]; Josy Tainara Silva Silva[1]; Tatiana de Fátima Martins Pires[1]; Luciana Ferreira Zortea[2]; Michel Picanço Oliveira[1]; Jordão Cabral Moulin[1]

[1] Departamento de Ciências Florestais e da Madeira, Universidade Federal do Espírito Santo, Brasil.
[2] Mogai Tecnologia de Informação, MOGAI, Brasil.

Resumo: O bagaço de cana-de-açúcar é um resíduo abundante e com potencial para a produção de materiais sustentáveis de maior valor agregado. Neste trabalho, o bagaço foi submetido a tratamento enzimático para obtenção de microfibrilas de celulose (MFC), utilizadas na produção de fios biodegradáveis por fiação úmida com alginato de sódio. O objetivo foi avaliar a influência da hidrólise nas propriedades morfológicas, físicas e estruturais dos fios produzidos. As amostras foram caracterizadas por microscopia eletrônica de varredura (MEV), densidade, absorção de água e difratometria de raios X (DRX). As análises de MEV evidenciaram que os fios produzidos com MFC submetida à hidrólise apresentaram estrutura mais compacta e organizada. A densidade apresentou diferença estatística entre os tratamentos, aumentando de 1,601 ± 0,004 para 1,632 ± 0,002 g/cm³ após a hidrólise, enquanto a absorção de água permaneceu estatisticamente semelhante, com valores próximos de 3,0 g/g. Os difratogramas indicaram a preservação da estrutura cristalina da celulose, com índices de cristalinidade próximos de 35% para ambas as amostras.

Palavras-chave: fiação; materiais lignocelulósicos; nanocelulose; resíduos agroindustriais; sustentabilidade.

INFLUENCE OF ENZYMATIC TREATMENT ON THE PROPERTIES OF CELLULOSE MICROFIBRIL FILAMENTS PRODUCED FROM SUGARCANE BAGASSE

Abstract: Sugarcane bagasse is an abundant residue with great potential for the production of sustainable value-added materials. In this study, bagasse was subjected to enzymatic treatment to obtain microfibrillated cellulose (MFC), which was used to produce biodegradable filaments through wet spinning with sodium alginate. The objective was to evaluate the influence of hydrolysis on the morphological, physical, and structural properties of the produced filaments. The samples were characterized by scanning electron microscopy (SEM), density, water absorption, and X-ray diffraction (XRD). SEM analyses revealed that filaments produced from hydrolyzed MFC exhibited a more compact and organized structure. Density showed a statistically significant difference between treatments, increasing from 1.601 ± 0.004 to 1.632 ± 0.002 g/cm³ after hydrolysis, while water absorption did not differ statistically, with values close to 3.0 g/g. The diffractograms indicated the preservation of the crystalline structure of cellulose, with crystallinity index values close to 35% for both samples.

Keywords: wet spinning; lignocellulosic materials; nanocellulose; agro-industrial residues; sustainability.

1. Introdução

A crescente preocupação com os impactos ambientais associados ao uso de recursos não renováveis tem impulsionado a busca por materiais sustentáveis obtidos a partir da biomassa. Nesse contexto, a celulose destaca-se como o biopolímero mais abundante da Terra, apresentando características como biodegradabilidade, biocompatibilidade e renovabilidade, que a tornam uma alternativa promissora para o desenvolvimento de novos materiais (Riseh et al., 2024).

Entre as principais fontes de celulose disponíveis, o bagaço de cana-de-açúcar possui grande relevância devido à elevada produção dessa cultura no Brasil. Além de liderar a produção mundial de cana-de-açúcar, o país gera anualmente grandes quantidades de resíduos lignocelulósicos, cuja valorização representa uma oportunidade para a produção de materiais de maior valor agregado (Cherubin et al., 2021; Vivian et al., 2022). Embora parte desse resíduo seja utilizada para geração de energia, novas aplicações vêm sendo estudadas visando ampliar seu aproveitamento e reduzir impactos ambientais associados ao seu descarte ou queima (Vasconcelos et al., 2022).

Dentre essas aplicações, destaca-se a obtenção de microfibrilas de celulose (MFC), materiais caracterizados por elevada área superficial, alta razão de aspecto e abundância de grupos hidroxila, propriedades que favorecem a formação de estruturas com potencial para diversas aplicações tecnológicas (Hjorth et al., 2023). Recentemente, a utilização de MFC na produção de filamentos por fiação úmida tem despertado interesse devido à possibilidade de obtenção de materiais biodegradáveis destinados aos setores têxtil, embalagens e compósitos funcionais (Menini et al., 2024; Mulin et al., 2025). Entretanto, o desempenho desses materiais está diretamente relacionado à sua organização estrutural. Parâmetros como morfologia, porosidade, densidade, cristalinidade e interação com a água influenciam significativamente suas propriedades e potenciais aplicações.

Nesse sentido, tratamentos enzimáticos podem promover modificações na estrutura, alterando a exposição das microfibrilas e a organização da rede celulósica formada durante a fiação. Dessa forma, o presente trabalho teve como objetivo avaliar a influência da hidrólise

enzimática sobre as características morfológicas, cristalinas e físicas de fios produzidos a partir de MFC obtidas do bagaço de cana-de-açúcar.

2. Material e métodos

2.5 Materiais utilizados

O bagaço de cana-de-açúcar foi obtido na Usina Paineiras S.A., localizada em Itapemirim, Espírito Santo, Brasil. O resíduo foi seco em estufa de circulação e renovação de ar, modelo SL-102 da Solab, por 48 horas a 50 °C. Em seguida, passou por tratamentos de deslignificação e branqueamento, também passou por tratamento enzimático e em seguida as MFC foram produzidas para a confecção dos fios.

2.6 Pré tratamento químico

Inicialmente, 50g de bagaço de cana-de-açúcar seco foram adicionados a uma solução de ácido sulfúrico (H_2SO_4) a 9,6% na proporção de 1:10 (m/v). O sistema foi conduzido em autoclave vertical, modelo AV-100 da Phoenix Luterco, a 1 bar e 120 °C por 10 minutos. Em seguida, o material foi lavado com água destilada até atingir pH neutro. Posteriormente, o bagaço tratado foi transferido para outro béquer, novamente em quantidade de 50g, e submetido a solução de NaOH a 1% na proporção de 1:10 (m/v). O sistema foi novamente levado à autoclave, nas mesmas condições anteriores. Por fim, o material foi lavado até pH neutro e seco em estufa de circulação de ar por 48 horas a 40 °C.

2.7 Deslignificação e branqueamento

Após o tratamento químico inicial, o bagaço seco foi moído e peneirado em malha 80, sendo utilizada a fração passante. Em seguida, o material foi submetido a uma segunda etapa de deslignificação com solução de NaOH a 4% na proporção de 1:10 (m/v), a 70 °C por 60 min sob agitação constante. Posteriormente, foi realizado o branqueamento utilizando solução de NaOH a 4% e H_2O_2 a 24%, a 50 °C por 60 min. Ao final do processo, o material foi lavado com água destilada até obtenção de filtrado translúcido e seco em estufa a 40 °C por 24 h.

2.8 Tratamento enzimático

A hidrólise foi realizada utilizando um complexo enzimático comercial da marca Celluclast®, com carga de 7,5 FPU/g de substrato. O bagaço de cana-de-açúcar branqueado foi incubado em tampão citrato de sódio 0,05 M (pH 4,8), sob agitação de 300 rpm por 24 h. Após a

hidrólise, a reação foi interrompida por aquecimento, seguida de resfriamento em banho de gelo. O material foi então centrifugado e o precipitado armazenado sob refrigeração para as etapas posteriores.

2.7 Produção das MFC

A polpa celulósica produzida por meio de hidrólise enzimática e o bagaço de cana-de-açúcar branqueado foi ajustada a concentração em 2% (m/m) e mantida por 6 dias. Posteriormente foram submetidos a fibrilação mecânica utilizando o fibrilador Super MassColloider, MasukoSangyo, (MKCA6-2), o material foi submetido a 5 passagens pelo fibrilador mecânico a 1.500 rpm (Martins et al., 2021).

2.8 Composição e produção dos fios

Os fios foram produzidos com MFC tratada e não tratada enzimaticamente. As misturas continham 4,5 wt% de MFC e 4,0 wt% de alginato de sódio, sendo ambos os componentes homogeneizados conjuntamente em agitador mecânico (Fisatom 715W) a 2000 rpm por 120 min. A produção dos fios foi realizada pelo método de fiação úmida proposto por Hakansson et al., 2014, utilizando o sistema ilustrado na (Figura 1) com injeção da suspensão a 0,5 $mL \cdot s^{-1}$ em banho coagulante de $CaCl_2$ 1 $mol \cdot L^{-1}$. Após a coagulação, os fios foram coletados e secos em estufa a 60 °C por 4 h.

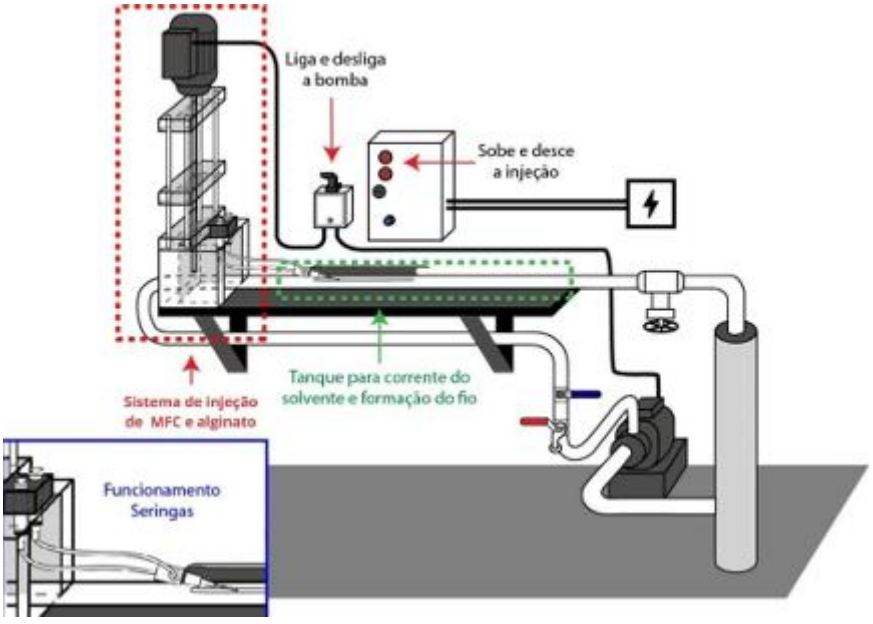


Figura 1. Equipamento utilizado para a produção dos fios. Fonte: Menini et al (2024)., modificado pelo autor.

2.9 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

Os fios foram imersos em nitrogênio líquido e cortados em tamanho de aproximadamente 2 cm, colados sob *stubs* metálicos utilizando-se uma fita dupla face de carbono para fixar os fios a base. Posteriormente, foram metalizados utilizando-se ouro, possibilitando assim a obtenção de imagens no MEV JEOL JSM-IT200.

2.10 Densidade

A densidade do fio foi obtida em picnômetro a gás, utilizando o equipamento Ultrapyc 3000 da marca Anton-paar. Este picnômetro a gás automático usa tecnologia TruPyc para resultados precisos com quantidades de amostra de 4.5 a 135 cm³ e sua tampa TruLock garante resultados repetíveis com um movimento simples de usar. Foi utilizado 1g de fios para a análise. O ensaio foi realizado em 5 repetições.

2.11 Absorção de água

A absorção de água foi determinada pelo método *tea-bag*, conforme descrito por Liu *et al*. (2022). Para isso, os saquinhos foram inicialmente imersos em água por 1 hora, em seguida deixados à temperatura ambiente por 10 minutos para remoção do excesso de água e pesados. Posteriormente, foram secos em estufa a 60 °C por 3 horas para possibilitar sua reutilização. Na etapa seguinte, 0,2 g de fios, previamente cortados em fragmentos menores que 1 cm, foram acondicionados em cada saquinho seco. As amostras foram submetidas novamente ao mesmo processo de imersão em água. O ensaio foi realizado em 5 repetições, e as pesagens foram efetuadas em balança analítica de alta precisão, com aproximação de 0,0001 g. A absorção de água foi calculada utilizando a Equação 1:

$$A_{H_2O} = \frac{m_{tbf} - (m_{tb} + m_f)}{m_f} \quad (1)$$

Onde, A_{H_2O} = absorção de água; m_f = massa do fio; m_{tb} = massa do saco de chá úmido; m_{tbf} = massa do saco de chá com fios úmidos.

2.12 Difratometria de raio-X (DRX)

A análise de DRX foi realizada para avaliar a estrutura cristalina dos fios produzidos. Os ensaios foram conduzidos em um difratômetro (Rigaku MiniFlex 600) utilizando radiação Cu Kα (λ = 1,5406 Å), operando a 40 kV e 15 mA. As amostras foram analisadas na faixa de 2θ de 5° a 40°, com passo de varredura de 0,02° e velocidade de $2°\cdot min^{-1}$. Os difratogramas obtidos foram utilizados para a identificação das fases cristalinas e avaliação do grau de cristalinidade dos materiais.

O índice de cristalinidade (IC) foi estimado pelo método de Segal *et al*. (1959), conforme a Equação 2, considerando a intensidade máxima do pico cristalino (I200) e a intensidade mínima associada à fração amorfa (Iam).

$$Crl = \frac{\left(I_{200} - I_{am}\right)}{I_{200}} * 100 \qquad (2)$$

Onde I200 é a intensidade máxima do pico principal com plano cristalográfico 200, que se refere à fração de celulose cristalina no material, cerca de 22,5°; I_{am} é a intensidade no mínimo entre os picos 110 e 200, cerca de 18,5°, que representa a celulose amorfa.

3. Resultados e discussão

3.1 MEV

A Figura 2 apresenta os fios de MFC obtidos com e sem pré-tratamento. Nas Figuras 2a e 2c, observa-se que os fios apresentam seção transversal predominantemente circular, diferindo dos fios achatados e retangulares reportados por Menini *et al*. (2024) produzidos com MFC e gomas. Além da presença de poros e deformidades no interior dos fios.

Em contraste, os fios produzidos a partir de MFC de bagaço de cana-de-açúcar com alginato de sódio (Figuras 2b e 2d) não apresentam poros ou rachaduras internas, indicando uma estrutura mais homogênea e contínua. Resultados semelhantes foram observados por Mulin *et al*. (2025), que desenvolveram fios por fiação úmida utilizando MFC de polpa kraft e nanocristais de celulose (NCC) com alginato, nos quais as análises de MEV não evidenciaram porosidade ou descontinuidades estruturais.

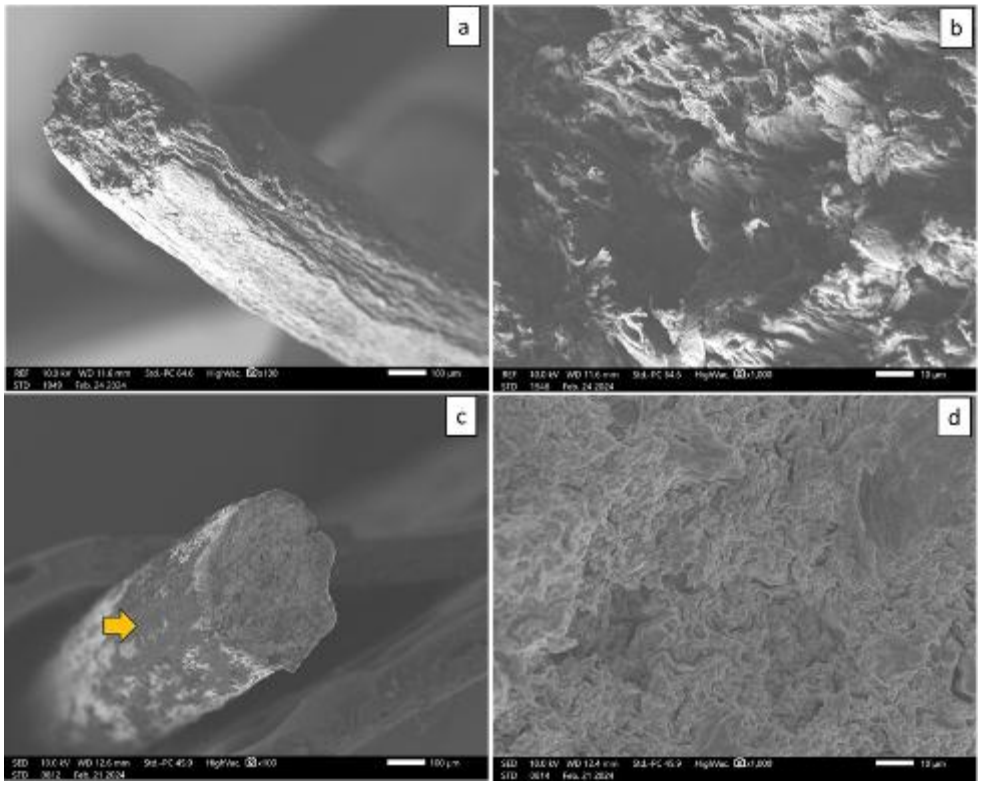


Figura 2. Micrografias dos fios de MFC e alginato: amostras sem tratamento com aumento de 100x (a) e com aumento de 1000x (b); amostras com tratamento enzimático com aumento de 100x (c) e com aumento de 1000x (d).

Na produção do fio ocorre uma rápida coagulação devido a reação do cloreto de cálcio (solvente) com o alginato, formando cloreto de sódio (NaCl) e alginato de cálcio, na Figura 2c é possível observar a região de NaCl formada na superfície do fio (seta em amarelo). Além da diferença apresentada nas figuras 2b e 2d na aproximação de 1000x, onde os fios produzidos com MFC com pre-tratamento mostraram uma estrutura mais compacta e organizada das fibras.

3.3 Absorção de água e densidade dos fios

Os resultados de densidade e absorção de água são apresentados na Tabela 1. O tratamento de hidrolise nas MFC pode promover alterações a área superficial específica, intensificando o número de ligações de hidrogênio durante a secagem (Zhang *et al*., 2024). Em estudos anteriores, Park *et al*. (2020) produziram filamentos a partir de MFC com diferentes composições, evidenciando que variações nas dimensões e na estrutura das fibrilas podem influenciar a compactação e as propriedades dos materiais. Esse comportamento pode estar associado a alterações na organização das fibrilas durante o processamento, embora outros

componentes presentes nos fios também possam contribuir para os valores de densidade observados.

Tabela 1. Área, absorção de água e densidade dos fios.

Propriedades dos fios	Sem hidrólise	Com hidrólise
Densidade (g/cm³)	1.601 ± 0.004 [b]	1.632 ± 0.002 [a]
Absorção de água (g/g)	3.040 ± 0.433 [a]	3.005 ± 0.290 [a]

Médias ± DP na mesma linha seguidas pela mesma letra são estatisticamente iguais pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). DP: Desvio Padrão.

A absorção de água dos fios não apresentou diferença estatística entre os tratamentos, visto que os materiais e quantidade foram as mesmas para a sua produção, em que todos os componentes químicos usados possuem hidroxilas livres em suas estruturas e que possibilitam a ligação com a água. Em outros trabalhos com fios de MFC foi verificada alta absorção de água também, principalmente quando o agente coagulador foi a goma, como no trabalho de Lundahl *et al*. (2018) com concentração de 1.5% wt% de MFC e goma guar 1.0% wt% na com absorção de água de 4.3 g/g, altos valores de absorção de água foram encontrados no trabalho de Menini *et al*. (2024) em fios de diferentes configurações com MFC 4.5% wt% com goma guar 5% wt% e fio de MFC 4.5% wt% com goma xantana 3 wt%, a absorção de água variou de 8 a 30 g/g.

Já no estudo com fios de MFC e NCC com alginato desenvolvido por Mulin *et al*, 2025, foram apresentados valores de absorção semelhantes ao presente estudo, com resultados variando de 1,983 a 4,580 g/g ao depender da configuração e concentração dos fios desenvolvidos.

3.4 DRX

Os difratogramas podem ser observados na Figura 3, ambas as amostras apresentaram o pico característico da celulose tipo I em $2\theta \approx 22–23°$, associado ao plano cristalográfico (200), indicando a preservação da estrutura cristalina da celulose após os tratamentos aplicados (Waghmare e Khan, 2021). Também foram observados picos próximos de 27–28° e 32°, atribuídos à presença de NaCl residual correspondentes aos planos (111) e (200), respectivamente, proveniente do banho de coagulação (Ahmad *et al*., 2021). Os índices de cristalinidade foram de 35,16% para os fios sem hidrólise e 35,44% para os fios submetidos à hidrólise. Os valores relativamente baixos podem estar relacionados à presença de alginato e

sais residuais na matriz dos fios, os quais contribuem para o aumento da fração amorfa do sistema.

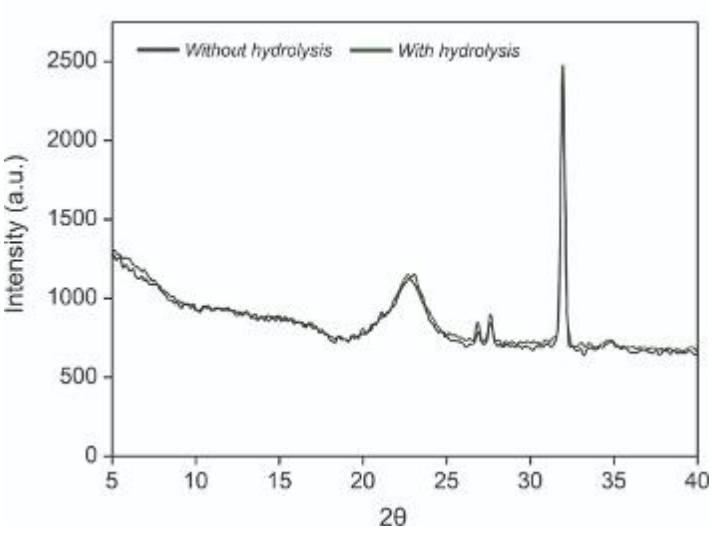


Figura 3. Difratograma do material sem o tratamento de hidrólise e do material com tratamento de hidrólise

4 Conclusões

A hidrólise enzimática influenciou as propriedades físicas dos fios de MFC produzidos a partir do bagaço de cana-de-açúcar. Os fios produzidos com MFC tratada apresentaram estrutura visualmente mais compacta e organizada nas análises de MEV e maior densidade em comparação aos fios sem tratamento, com diferença estatística entre os tratamentos. A absorção de água não apresentou diferença estatística entre as amostras, enquanto os índices de cristalinidade apresentaram valores próximos entre os tratamentos. Dessa forma, os resultados indicam que o tratamento enzimático apresenta potencial para melhorar as propriedades dos fios de MFC, contribuindo para a obtenção de materiais celulósicos com características adequadas para aplicações sustentáveis.

5 Agradecimentos

Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES).

Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação do Espírito Santo (FAPES).

6 Referências bibliográficas

Marinho, E. (2025). Cellulose: A comprehensive review of its properties and applications. **Sustainable Chemistry for the Environment**, p. 100283. https://doi.org/10.1016/j.scenv.2025.100283

Cherubin, M. R., et al. (2021). Land use and management effects on sustainable sugarcane-derived bioenergy. **Land**, 10(1), 72. https://doi.org/10.3390/land10010072

Vivian, M. A., et al. (2022). Characterization of sugarcane bagasse and its potential for energy generation and cellulosic pulp. **Madera y Bosques**, 28(1). https://doi.org/10.21829/myb.2022.2812376

Vasconcelos, A. L. S., et al. (2022). Sugarcane residue and N-fertilization effects on soil GHG emissions. **Biomass and Bioenergy**, 158, 106342. https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2022.106342

Hjorth, A., et al. (2023). Electro-assisted filtration of microfibrillated cellulose: The impact of the degree of fibrillation. **Cellulose**, 30(16), 10097–10116. https://doi.org/10.1007/s10570-023-05517-w

Menini, P. D., et al. (2024). Development of microfibrillated cellulose filaments using xanthan and guar gums. **Cellulose**. https://doi.org/10.1007/s10570-024-06134-x

Mulin, L., et al. (2025). Yarns from cellulose microfibrils and nanocrystals embedded in an alginate cylindric matrix. **Journal of Wood Chemistry and Technology**, 45(2), 83–94. https://doi.org/10.1080/02773813.2025.2485076

Martins, C. C. N., et al. (2021). Optimizing cellulose microfibrillation with NaOH pretreatments for unbleached Eucalyptus pulp. **Cellulose**, 28, 11519–11531. https://doi.org/10.1007/s10570-021-04221-x

Håkansson, K. M. O., et al. (2014). Hydrodynamic alignment and assembly of nanofibrils resulting in strong cellulose filaments. **Nature Communications**, 5, 4018. https://doi.org/10.1038/ncomms5018

Liu, Y., et al. (2022). Environmentally friendly hydrogel: Classification, preparation and application. **Science of the Total Environment**, 846, 157303. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.157303

Zhang, Z., et al. (2024). Engineering strong man-made cellulosic fibers. **Nanoscale**, 16(13), 6383–6401. https://doi.org/10.1039/D3NR06126D

Park, C.-W., et al. (2020). Preparation and characteristics of wet-spun filament made of cellulose nanofibrils. **Polymers**, 12(4), 949. https://doi.org/10.3390/polym12040949

Lundahl, M. J., et al. (2018). Absorbent filaments from cellulose nanofibril hydrogels through continuous coaxial wet spinning. **ACS Applied Materials & Interfaces**, 10(32), 27287–27296. https://doi.org/10.1021/acsami.8b08153

Segal, L., et al. (1959). An empirical method for estimating crystallinity of cellulose. **Textile Research Journal**, 29, 786–794. https://doi.org/10.1177/004051755902901003

Waghmare, N. K., & Khan, S. (2021). Extraction and characterization of nano-cellulose fibrils from sugarcane bagasse. **Journal of Natural Fibers**, 18(12), 2049–2062. https://doi.org/10.1080/15440478.2020.1734202

Ahmad, K., et al. (2021). Thermoluminescence study of pellets prepared using NaCl from Khewra Salt Mines in Pakistan. **Radiation and Environmental Biophysics**, 60, 245–252. https://doi.org/10.1007/s00411-021-00894-x

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Marcenaria Básica para Mulheres na Melhor Idade: Valorização da madeira reaproveitada em uma ação extensionista

Lorrayne Rodrigues da Costa[1]; Carlos Eduardo Lima Sousa[1]; Raquel Marchesan[1]; Karolayne Ferreira Saraiva[1]; Maria Eduarda Pinto dos Santos[1]; Thatiele Pereira Eufrazio[1]; Vanessa Coelho Almeida[1]; Gustavo Mattos Abreu[1].

[1]Universidade Federal do Tocantins (UFT), Laboratório de Tecnologia e Utilização de Produtos Florestais (LabTecFlor), Gurupi, Tocantins, Brasil.

Resumo: O presente trabalho apresenta os resultados do projeto de extensão Marcenaria Básica para Mulheres na Melhor Idade, realizado pela Universidade Federal do Tocantins (UFT), focado na valorização da madeira reaproveitada por meio de oficinas práticas. A proposta buscou estimular a criatividade, a autonomia e o aprendizado coletivo, utilizando resíduos da construção civil, podas urbanas e sobras de serrarias para a confecção de peças artesanais e funcionais. Participaram das atividades 30 mulheres da comunidade, seis estudantes de Ação Curricular de Extensão (ACE) e 11 voluntários (docentes, discentes e técnicos). A metodologia de avaliação combinou a observação direta em campo com a aplicação de questionários eletrônicos estruturados (Google Forms), mensurando aspectos de satisfação, aprendizagem e impactos sociais. As oficinas favoreceram o desenvolvimento de habilidades manuais, a criação de artefatos e a reflexão sobre o consumo consciente. Os resultados indicaram 100% de satisfação do público e evidenciaram que o reaproveitamento é uma alternativa viável para agregar valor à resíduos, promover inclusão social na terceira idade e fortalecer a integração universidade-sociedade.

Palavras-chave: Economia circular; Sustentabilidade; Tecnologia da madeira.

Basic Woodworking for Older Women: Value Addition to Reclaimed Wood through a University Outreach Project

Abstract: This study presents the results of the community outreach project Basic Woodworking for Older Women, carried out by the Federal University of Tocantins (UFT), which focused on the valorization of repurposed wood through practical woodworking workshops. The initiative aimed to stimulate creativity, autonomy, and collective learning, utilizing wood sourced from construction waste, urban pruning, and sawmill scraps to produce handcrafted and functional pieces. Participants included 30 women from the community, six Curricular Outreach Action (ACE) students, and 11 volunteers (faculty, students, and technical staff). The evaluation methodology combined direct field observations with structured electronic questionnaires (Google Forms). The workshops fostered manual skills, artifact creation, and awareness regarding conscious resource use. Results indicated 100% participant satisfaction, proving that wood repurposing is a viable alternative for adding value to waste, promoting social inclusion for senior citizens, and strengthening university-community integration.

Keywords: Circular economy; Sustainability; Wood technology.

1. Introdução

A madeira é um dos materiais renováveis de maior importância para a sociedade devido à sua versatilidade, resistência, facilidade de processamento e ampla aplicação na construção civil, indústria moveleira e produção de objetos utilitários. Além de suas características tecnológicas, destaca-se por sua origem renovável e pelo potencial de contribuir para o uso eficiente dos recursos naturais quando manuseada de forma sustentável (Silva et al., 2020).

Entretanto, o processamento da madeira gera quantidades expressivas de resíduos ao longo da cadeia produtiva, incluindo serragem, cavacos, aparas e retalhos descartados. Embora parte desses materiais seja destinada à geração de energia ou painéis reconstituídos, uma parcela significativa ainda é descartada inadequadamente ou empregada em aplicações de baixo valor agregado, representando desperdício de matéria-prima e impactos ambientais (Ramos et al., 2018).

Essa realidade evidencia a necessidade de ampliar estratégias voltadas ao reaproveitamento da madeira. Nesse contexto, a valorização do resíduo constitui uma alternativa capaz de prolongar o ciclo de vida da matéria-prima e incentivar práticas alinhadas à Política Nacional de Resíduos Sólidos (Brasil, 2010) e à economia circular (Panzarasa & Burgert, 2022).

Entre as diferentes alternativas de valorização, a marcenaria destaca-se por possibilitar a fabricação de produtos artesanais de maior valor agregado. Estudos em pequenas empresas moveleiras demonstram que o aproveitamento de resíduos é técnica e economicamente viável (Nunes & Serra, 2019). Contudo, ainda são limitadas as iniciativas que associam a valorização desse material à capacitação comunitária por meio de ações extensionistas (FORPROEX, 2012).

Oficinas de marcenaria representam uma estratégia promissora para integrar tecnologia da madeira, sustentabilidade e inclusão social. A escolha do público alvo mulheres na melhor idade, justifica-se pela relevância de promover o envelhecimento ativo, combater o isolamento social, incentivar a saúde mental e estimular o empoderamento feminino por meio do aprendizado de um hobby produtivo, desenvolvimento de habilidades manuais e potencial geração de renda na aposentadoria.

O presente trabalho teve como objetivo avaliar os resultados do projeto de extensão "Marcenaria Básica para Mulheres na Melhor Idade", desenvolvido pela Universidade Federal do Tocantins (UFT), destacando o potencial da valorização da madeira reaproveitada na produção de artefatos funcionais e os seus benefícios ambientais, sociais e educacionais.

2. Metodologia

O estudo caracteriza-se como um relato de experiência de natureza descritiva e abordagem qualiquantitativa, desenvolvido no Laboratório de Tecnologia e Utilização de Produtos Florestais (LabTecFlor), da Universidade Federal do Tocantins (UFT), Campus Gurupi, no período de maio a novembro de 2025.

2.1. Público Atendido e Parcerias

Participaram das atividades 30 mulheres da comunidade, com faixa etária variando entre 50 e 78 anos. Do total, 15 mantiveram frequência assídua (100% de presença) e 15 integraram o grupo em momentos específicos das oficinas. A seleção ocorreu por meio de divulgação ampla e parceria estratégica de busca ativa realizada com o Centro de Referência de Assistência Social (CRAS Vila Nova, em Gurupi).

A equipe executora foi composta por seis estudantes da Ação Curricular de Extensão (ACE) do curso de Engenharia Florestal e 11 voluntários (docentes, técnicos e discentes).

2.2. Materiais, Equipamentos e Execução

A matéria-prima foi composta por resíduos da construção civil (pinus e tábuas), podas urbanas (galhos e toras) e sobras de serrarias. Os materiais passaram por triagem, limpeza e seleção. Materiais auxiliares incluíram lixas, tintas PVA, vernizes, colas, parafusos, cordas e frutos do cerrado. (FIGURA 1)

Foram utilizadas ferramentas manuais e elétricas como furadeiras, parafusadeiras, lixadeiras orbitais, serras tico-tico, esquadros e trenas. Foram realizadas seis oficinas presenciais de 5 horas cada, totalizando 30 horas práticas. As participantes produziram porta-chaves, sousplats, caixas decorativas, suportes para plantas, tábuas de churrasco, móveis de pequeno porte e itens natalinos.



Figura *14* - Etapas do desenvolvimento das oficinas de marcenaria: (A) preparação da madeira e dos materiais; (B) treinamento da equipe; (C) realização das oficinas; (D) confecção dos produtos.

2.3 Métodos de Avaliação de Impacto e Satisfação

A mensuração do impacto e da qualidade das oficinas foi realizada por meio de dois questionários digitais via Google Forms; O público-alvo assistido pelo projeto foi composto por 30 mulheres na melhor idade. Destas, 10 responderam integralmente ao questionário de avaliação eletrônico (taxa de resposta de 33,3%). O instrumento mensurou a faixa etária, a satisfação com as atividades, atendimento da equipe, materiais utilizados, horários e interesse na continuidade do projeto. Questionário da equipe aplicado aos 11 membros da equipe (8 discentes e 3 servidores).

3. Resultados e discussão

3.1. Evolução Técnica e Autonomia das Participantes

Embora 90% das participantes não tivessem experiência prévia com ferramentas ou marcenaria, observou-se notável evolução prática ao longo dos seis encontros. Nas oficinas iniciais, havia forte dependência dos monitores para marcação, corte e alinhamento.

A partir do terceiro encontro, registrou-se autonomia na operação de lixadeiras orbitais e parafusadeiras, além de segurança na aplicação de acabamentos (decupagem, pintura e seladores). Relatos verbais demonstraram ganho de confiança para pequenos reparos domésticos e motivação para comercialização de artefatos. (FIGURA 15)



Figura *16* – Desenvolvimento das oficinas de marcenaria: (A) lixamento das peças; (B) pintura; (C) utilização de ferramentas; (D) montagem dos produtos.

3.2. Produção de Artefatos e Sustentabilidade

A confecção de produtos variados comprovou a viabilidade de transformar resíduos de madeira descartados em artigos de alto valor estético e comercial. O reaproveitamento prolonga o ciclo de vida da matéria-prima, retém carbono estocado e reduz a busca por recursos nativos, alinhando-se aos preceitos de Lopes (2016) e Panzarasa e Burgert (2022). (FIGURA 17)



Figura *18* – Produtos confeccionados com madeira reaproveitada durante as oficinas: (A) porta-chaves; (B) caixas decorativas; (C) móveis de pequeno porte; (D) petisqueiras.

3.3. Avaliação de Satisfação e Impacto Social

A compilação do questionário via Google Forms indicou 100% de aprovação das participantes em relação à didática da equipe, ao atendimento recebido e à qualidade das oficinas práticas. Além disso, 100% das respondentes expressaram desejo de participar de novas

turmas e recomendar o projeto. Nos campos abertos, 85% das participantes relataram impacto positivo na saúde mental, descrevendo as oficinas como um ambiente terapêutico, de convivência e de fortalecimento da autoestima. (FIGURA 4)

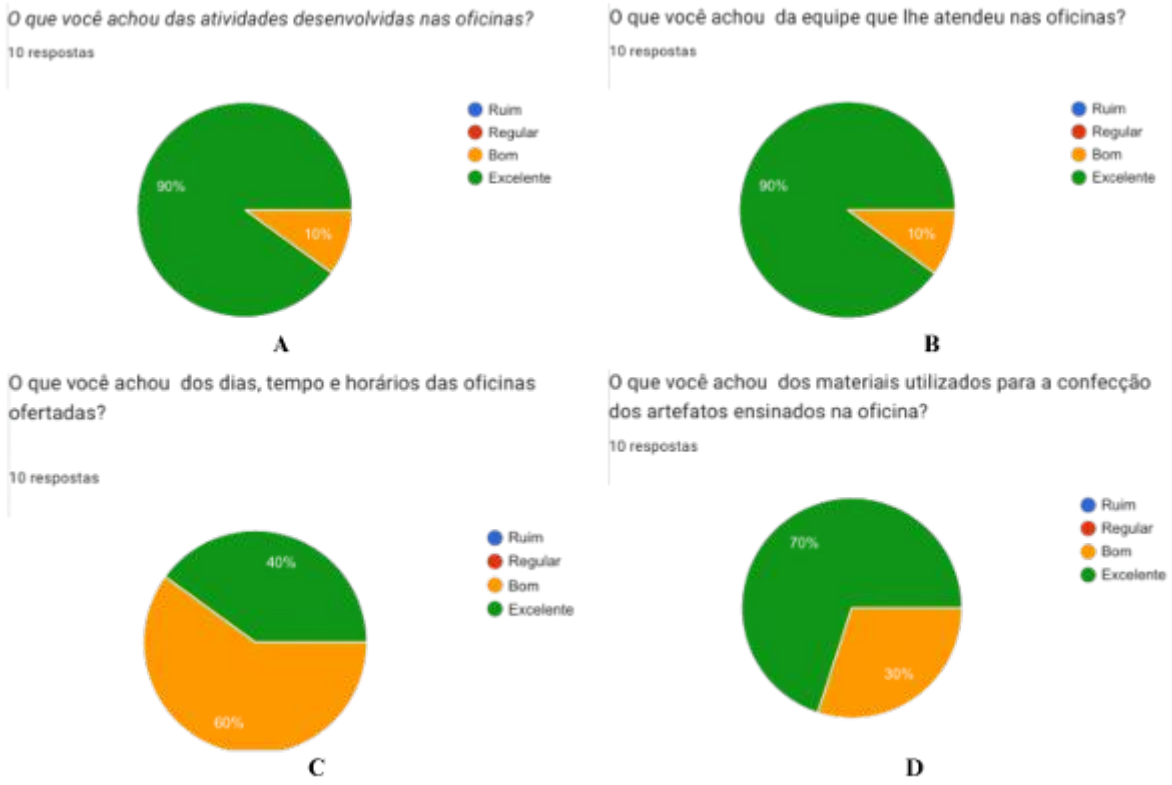


Figura 4 – Percentual de satisfação e percepção de impacto social obtidos via questionário eletrônico (Google Forms).

3.4. Ações de Extensão: Feira de Saberes e Visita ao CRAS

As ações do projeto extrapolaram os limites do laboratório por meio de dois eventos de impacto comunitário. **(**FIGURA 5)

- Feira de Saberes da UFT: As participantes expuseram e venderam suas peças à comunidade acadêmica, vivenciando a validação social de suas produções, noções de precificação e empreendedorismo.
- Oficinas Itinerantes no CRAS Vila Nova: A equipe e os estudantes voluntários ministraram oficinas de artesanato e macramê para idosas atendidas pelo centro assistencial, fortalecendo os vínculos entre a UFT e a comunidade externa de Gurupi.



Figura 5 – Registros das atividades e da socialização dos resultados do projeto: (A) atividades de pintura; (B) participantes da primeira turma; (C) visita ao CRAS; (D) exposição durante a Feira de Saberes; (E) produtos confeccionados; (F) encerramento da última turma.

4. Conclusões

A utilização de resíduos madeireiros em oficinas de marcenaria básica para mulheres na melhor idade mostrou-se uma estratégia extensionista altamente viável e eficiente. O projeto articulou a sustentabilidade ambiental ao desenvolvimento de competências manuais, estímulo à autonomia e bem-estar social das idosas.

Os resultados favoráveis ratificam o papel transformador da extensão universitária na difusão do conhecimento sustentável e na promoção da inclusão social.

5. Agradecimentos

À Universidade Federal do Tocantins (UFT), ao Curso de Engenharia Florestal, ao Laboratório de Tecnologia e Utilização de Produtos Florestais (LabTecFlor) e à Pró-Reitoria de Extensão, Cultura e Assuntos Comunitários (PROEX/UFT) pelo apoio institucional.

Ao CRAS Vila Nova, às participantes das oficinas pela dedicação e aos estudantes, docentes, técnicos e voluntários que contribuíram para o desenvolvimento das atividades.

6. Referências bibliográficas

Agra, E. S., Lins, E. A. M., Melo, D. C. P., Lins, C. M. M. S., & Sousa, W. S. (2021). Gerenciamento de resíduos madeireiros produzidos em uma marcenaria do Tribunal de Justiça de Pernambuco. Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais, 12(3), 471–481. https://doi.org/10.6008/CBPC2179-6858.2021.003.0038

Brasil. (2010). Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos. Presidência da República. https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm

Fórum de Pró-Reitores de Extensão das Instituições Públicas de Educação Superior Brasileiras (FORPROEX). (2012). Política Nacional de Extensão Universitária. FORPROEX.

Lopes, A. C. (2016). Aproveitamento de resíduos de madeira na indústria moveleira. Editora Acadêmica.

Nunes, R. S. B., & Serra, J. C. V. (2019). Quantificação de resíduos de madeira provenientes de empresas moveleiras de pequeno porte e alternativas de aproveitamento. *Ciência da Madeira*, 10(3), 189–197.

Panzarasa, G., & Burgert, I. (2022). A second life for wood residuals. *Nature Sustainability*, 5(7), 559–560. https://doi.org/10.1038/s41893-022-00896-7

Ramos, W. F., Ruivo, M. L. P., Jardim, M. A. G., & Sousa, L. M. (2018). Geração de resíduos madeireiros do setor de base florestal na Região Metropolitana de Belém, Pará. *Ciência Florestal*, 28(4), 1823–1830. https://doi.org/10.5902/1980509835341

Silva, E. J., Schmidt, G., & Mantau, U. (2020). Wood resource balance for plantation forests in Brazil: Resources, consumption and cascading use. *CERNE*, 26(2), 247–255. https://doi.org/10.1590/01047760202026022718

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Modificação hidrotérmica e destilação do licor pirolenhoso: retenção e estabilidade térmica em lâminas de Paricá

João Miguel Santos Dias[1]; Maria Gabriela Sales da Silva[2]; Silas de Andrade Pinto[3]; Niara Porto de Carvalho[1]; João Gilberto Meza Ucella-Filho[4]; Serguei Alejandro-Martín[5]

[1] Universidade Estadual da Região Tocantina do Maranhão
[2] Universidade Federal de São Carlos
[3] Universidade Estadual de Feira de Santana
[4] Universidade Federal de Viçosa
[5] Universidad del Bío-Bío, Chile

Resumo: O licor pirolenhoso é uma alternativa renovável aos preservantes sintéticos, embora alcatrão e hidrocarbonetos policíclicos aromáticos limitem sua aplicação. O objetivo deste trabalho foi avaliar a influência da modificação hidrotérmica e da destilação do licor pirolenhoso sobre a retenção do preservante e a estabilidade térmica de lâminas de Paricá impregnadas. As lâminas foram submetidas à modificação hidrotérmica a 25 ou 40 °C por 1, 3 ou 5 dias e impregnadas com licor pirolenhoso bruto ou destilado. A retenção foi avaliada estatisticamente, e uma amostra por série foi analisada por termogravimetria. A modificação hidrotérmica aumentou a retenção, com maiores valores para o licor pirolenhoso bruto. Em todas as séries, a maior perda de massa ocorreu entre 300 e 400 °C. O licor pirolenhoso bruto apresentou maiores perdas entre 200 e 300 °C, enquanto o destilado apresentou perdas iguais ou superiores entre 300 e 400 °C. Conclui-se que a modificação hidrotérmica favoreceu a retenção e que a destilação alterou a distribuição da perda de massa.

Palavras-chave: *Schizolobium*; Vinagre de madeira; TGA.

Hydrothermal modification and pyroligneous liquor distillation: retention and thermal stability of Paricá veneers

Abstract: Pyroligneous liquor is a renewable alternative to synthetic wood preservatives, although the presence of tar and polycyclic aromatic hydrocarbons limits its application. The objective of this study was to evaluate the influence of hydrothermal modification and pyroligneous liquor distillation on preservative retention and the thermal stability of impregnated Paricá wood veneers. The veneers were subjected to hydrothermal modification at 25 or 40 °C for 1, 3, or 5 days and impregnated with either crude or distilled pyroligneous liquor. Retention was statistically evaluated, and one specimen from each treatment series was analyzed by thermogravimetry. Hydrothermal modification increased preservative retention, with higher values observed for crude pyroligneous liquor. In all treatment series, the greatest mass loss occurred between 300 and 400 °C. Crude pyroligneous liquor showed greater mass losses between 200 and 300 °C, whereas the distilled liquor showed equal or greater mass losses between 300 and 400 °C. It was concluded that hydrothermal modification favored preservative retention, while distillation altered the distribution of mass loss.

Keywords: *Schizolobium*; Wood vinegar; Thermogravimetric analysis.

1. Introdução

A utilização de produtos de madeira engenheirada (*Engineered Wood Products* – EWP) amplia as possibilidades dimensionais e estruturais em relação à madeira serrada, possibilitando a execução de elementos com diferentes geometrias e maiores vãos (De Araújo, 2023; De Araújo *et al*., 2025; Dias *et al*., 2025). Entretanto, sua produção demanda matéria-prima em escala, favorecendo o emprego de espécies de rápido crescimento, como *Eucalyptus* sp., *Pinus* sp. e Paricá (*Schizolobium* sp.) (Huang *et al*., 2024). A baixa resistência dessas espécies à biodegradação requer tratamentos preservativos para sua aplicação estrutural (Terezo *et al*., 2017; ABNT, 2022).

O licor pirolenhoso, obtido pela condensação dos gases gerados durante a pirólise da biomassa, apresenta-se como uma alternativa de origem renovável aos preservantes sintéticos (Boer *et al*., 2024; Fritz; Garay, 2025). Sua ação fungicida e inseticida está associada à presença de fenóis, furfural e ácido acético (Zhou *et al*., 2024; Fiorio *et al*., 2025). Contudo, o licor pirolenhoso bruto também pode conter alcatrão e hidrocarbonetos policíclicos aromáticos, que representam riscos à saúde e provocam o escurecimento da madeira tratada (Firouzbehi *et al*., 2020; Fiorio *et al*., 2025). A destilação pode reduzir a presença desses constituintes (Almeida *et al*., 2018; Pimenta *et al*., 2023; Zhou *et al*., 2024).

A eficiência do licor pirolenhoso depende de sua retenção na madeira, influenciada pela anatomia e pela presença de extrativos que podem obstruir vasos e pontoações (Lehringer *et al*., 2009). A modificação hidrotérmica pode remover parte dos extrativos hidrossolúveis, aumentando a permeabilidade da madeira (Wang *et al*., 2018; Ali *et al*., 2021). Quando realizada entre 25 e 100 °C, a modificação hidrotérmica preserva os grupos –OH da hemicelulose e da celulose, o que pode favorecer a retenção do licor pirolenhoso (Ali *et al*., 2021).

Além da retenção, a proteção da madeira depende da estabilidade térmica dos compostos responsáveis pela ação fungicida e inseticida (Wang *et al*., 2018). Entretanto, o comportamento térmico e a eficácia como preservante do licor pirolenhoso bruto e destilado em madeiras submetidas à modificação hidrotérmica ainda é pouco conhecido. Por conseguinte, o objetivo deste trabalho foi avaliar a influência da modificação hidrotérmica e da destilação do licor pirolenhoso sobre a retenção do preservante e a estabilidade térmica de lâminas de Paricá impregnadas, visando à produção de madeira engenheirada para aplicação em estruturas de edificações.

2. Materiais e métodos

Foram utilizadas lâminas de Paricá (*Schizolobium parahyba* var. *amazonicum*), provenientes da região do alburno de árvores com cinco anos de idade, obtidas da linha de produção de uma fábrica de madeira compensada, localizada em Dom Eliseu, Pará. Após a secagem, as lâminas foram selecionadas e cortadas nas dimensões de 20 × 15 × 3 mm³. O licor pirolenhoso foi obtido durante a carbonização, em forno industrial metálico, de madeira do híbrido *Eucalyptus urophylla* × *E. grandis* (clone AEC 1528), também com cinco anos. Dois litros de licor pirolenhoso foram submetidos à destilação simples entre 100 e 110 °C, utilizando vidrarias de borossilicato e condensador Graham refrigerado por circulação de água. Os licores pirolenhosos bruto e destilado apresentaram, respectivamente, pH de 3,31 e 2,64 e densidade de 999,758 e 994,689 kg·m^{-3}.

A campanha experimental compreendeu 15 séries com 12 lâminas cada (Figura 1). As séries com modificação hidrotérmica e saturação em licor pirolenhoso foram submetidas às seguintes etapas: secagem a 103 °C por 3 dias; modificação hidrotérmica em água a 25 ou 40 °C por 1, 3 ou 5 dias; secagem a 103 °C por 3 dias; saturação em licor pirolenhoso bruto ou destilado até estabilização da massa; e secagem final a 103 °C por 3 dias. As séries apenas com saturação em licor pirolenhoso foram secas, saturadas em licor pirolenhoso bruto e destilado e novamente secas. O grupo de controle (GC) foi submetido apenas à secagem inicial. Nos códigos, MH indica modificação hidrotérmica; 25 e 40, indica a temperatura utilizada; B e D, os licores pirolenhosos bruto e destilado; e o último número, o tempo de modificação hidrotérmica, em dias.

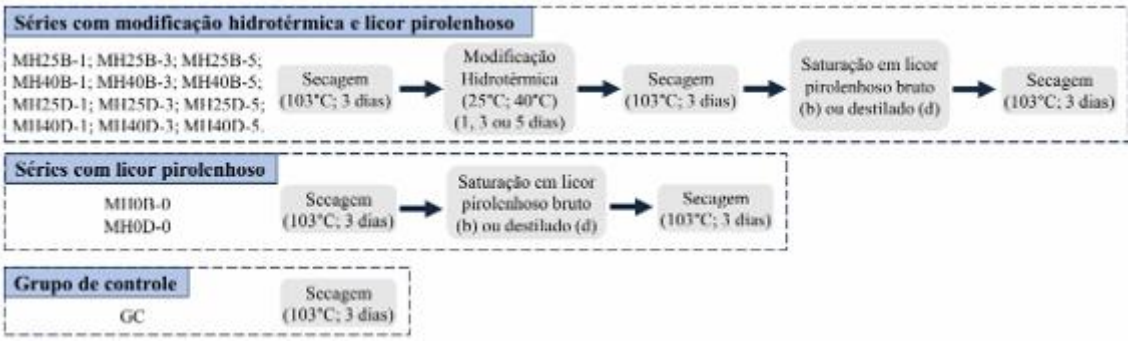


Figura 1 – Sequência de etapas de tratamento paras as séries definidas.

As massas foram monitoradas a cada 24 h, com balança de resolução de 0,01 g, até variação inferior a 0,5% entre duas medições consecutivas. A retenção de licor pirolenhoso foi calculada pela Equação (1):

$$\Delta m_{ret} = \frac{m_f - m_i}{m_i} \times 100 \qquad (1)$$

onde: Δm_{ret} é a retenção de licor pirolenhoso na amostra (%); m_i é a massa da amostra após a primeira secagem (g); m_f é a massa da amostra após a secagem final (g).

Para a análise termogravimétrica, uma amostra de cada série foi pulverizada com lixa nº 220. Aproximadamente 3 mg foram analisados em equipamento TA Instruments SDT Q600, entre 35 e 600 °C, à taxa de 10 °C·min^{-1}, sob nitrogênio com vazão de 100 mL·min^{-1}. As perdas de massa foram comparadas entre intervalos de temperatura e analisadas descritivamente, pois foi ensaiada uma amostra por série.

Os efeitos da temperatura e do tempo de modificação hidrotérmica e do tipo de licor pirolenhoso sobre a retenção foram avaliados por ANOVA trifatorial, considerando os tratamentos de 1, 3 e 5 dias. As séries sem modificação hidrotérmica foram excluídas dessa análise por não apresentarem nível de temperatura. Como o teste de Levene indicou heterogeneidade das variâncias, as sete condições de cada tipo de licor pirolenhoso, incluindo a respectiva série sem modificação hidrotérmica, foram comparadas por ANOVA de Welch e teste de Games–Howell, com nível de significância de 5%.

3. Resultados e discussão

As lâminas de Paricá tratadas com licor pirolenhoso bruto e destilado apresentaram coloração escura e clara, respectivamente (Figura 2). As menores retenções foram observadas nas séries sem modificação hidrotérmica, variando de 0,00 a 2,15% para MH0B-0 e de 0,00 a 1,36% para MH0D-0. As maiores ocorreram após modificação hidrotérmica a 40 °C por 5 dias, com valores de 3,97 a 8,62% para MH40B-5 e de 3,21 a 4,96% para MH40D-5 (Figura 3). Em condições correspondentes de modificação hidrotérmica, as séries impregnadas com licor pirolenhoso bruto apresentaram maiores retenções que aquelas tratadas com licor pirolenhoso destilado. O licor pirolenhoso bruto também apresentou maior amplitude entre os valores individuais, enquanto o destilado exibiu menor variação.



Figura 2 – Lâminas tratadas com licor pirolenhoso bruto (esquerda) e destilado (direita).

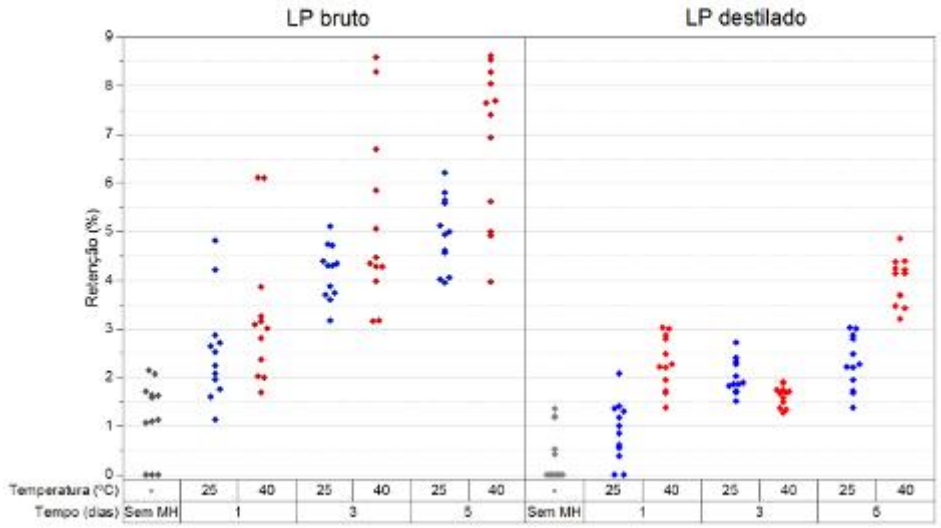


Figura 3 – Retenção de licor pirolenhoso bruto e destilado em lâminas de Paricá submetidas à modificação hidrotérmica. Azul: 25 °C; vermelho: 40 °C; cinza: sem modificação hidrotérmica.

A ANOVA trifatorial indicou interação entre temperatura, tempo de modificação hidrotérmica e tipo de licor pirolenhoso ($p = 0,0353$), demonstrando que o efeito do tempo dependeu da combinação entre temperatura e tipo de licor. Em razão da heterogeneidade das variâncias, as condições foram comparadas por ANOVA de Welch e teste de Games–Howell. Para o licor pirolenhoso bruto, foram identificadas diferenças entre as condições [$F(6; 33,65) = 35,98$; $p < 0,0001$], e todas as séries submetidas à modificação hidrotérmica apresentaram retenção superior à condição sem modificação hidrotérmica. A 25 °C, os tratamentos de 3 e 5 dias superaram o de 1 dia, enquanto o efeito da temperatura foi identificado apenas após 5 dias. Para o licor pirolenhoso destilado, também foram observadas diferenças [$F(6; 33,31) = 57,27$; $p < 0,0001$]. Todas as séries superaram a condição sem modificação hidrotérmica, exceto MH25D-1. A 25 °C, os tratamentos de 3 e 5 dias apresentaram retenção superior à obtida após 1 dia; a 40 °C, verificou-se a ordem 3 dias < 1 dia < 5 dias.

O aumento da retenção após a modificação hidrotérmica pode estar associado à remoção de extrativos hidrossolúveis que obstruem vasos e pontoações, aumentando a permeabilidade da madeira e a preservação dos grupos –OH, favorecendo a interação com a fase aquosa do licor pirolenhoso (Lehringer *et al.*, 2009; Ali *et al.*, 2021). A maior retenção do licor pirolenhoso bruto pode ser atribuída à presença de frações de alcatrão, compostos fenólicos de maior massa molecular e outros sólidos condensáveis que permanecem na madeira após a secagem. Durante a destilação, parte dos constituintes não voláteis permanece no resíduo, reduzindo a quantidade de material transferido para a fração destilada e sua retenção, consequentemente (Almeida *et al.*, 2018; Pimenta *et al.*, 2023; Fiorio *et al.*, 2025).

Em todas as séries, as maiores perdas de massa ocorreram entre 300 e 400 °C (Figuras 4 e 5 e Tabela 1). Entre 35 e 100 °C, as perdas variaram de 4,68 a 6,82% para o licor pirolenhoso bruto e de 4,35 a 6,74% para o destilado, enquanto o GC apresentou 4,94%. Entre 100 e 200 °C, os valores foram de 1,03 a 1,70% para o licor pirolenhoso bruto, de 0,28 a 0,85% para o destilado e de 0,48% para o GC. No intervalo de 200–300 °C, as perdas variaram de 13,91 a 17,34% para o licor pirolenhoso bruto e de 13,21 a 14,62% para o destilado, enquanto o GC apresentou 13,94%. Entre 300 e 400 °C, os valores foram de 55,01 a 59,44% para o licor pirolenhoso bruto, de 57,48 a 66,13% para o destilado e de 61,14% para o GC. Nos intervalos de 400–500 e 500–600 °C, as perdas não ultrapassaram 4,18 e 1,76%, respectivamente.

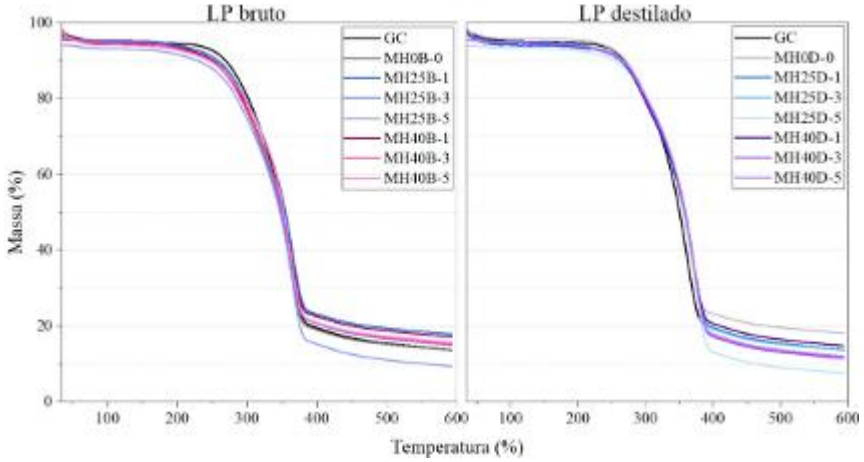


Figura 4 – Termogramas das lâminas de controle e tratadas com licor pirolenhoso bruto e destilado.

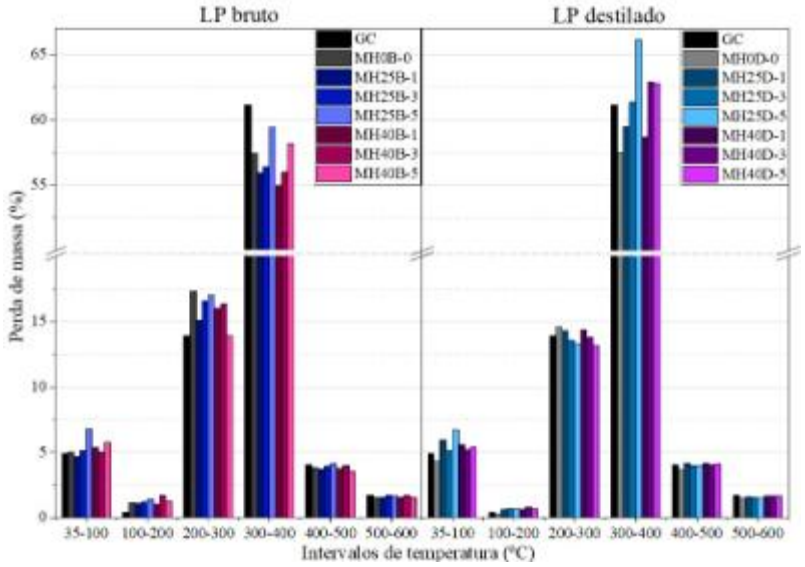


Figura 5 – Perda de massa das lâminas de Paricá por intervalo de temperatura, com interrupção do eixo Y entre 20 e 50%.

Tabela 1 – Perdas de massa em cada intervalo de temperatura

Séries	Intervalos de temperatura (ºC)					
	35-100	100-200	200-300	300-400	400-500	500-600

GC	4,94	0,43	13,94	61,14	4,09	1,76
MH0B-0	5,03	1,15	17,34	57,45	3,81	1,55
MH25B-1	4,68	1,11	15,08	55,95	3,73	1,54
MH25B-3	5,17	1,20	16,59	56,39	3,94	1,72
MH25B-5	6,82	1,44	17,03	59,44	4,16	1,66
MH40B-1	5,37	1,03	16,05	55,01	3,77	1,59
MH40B-3	5,04	1,70	16,39	55,99	4,03	1,71
MH40B-5	5,78	1,29	13,91	58,20	3,55	1,59
MH0D-0	4,35	0,28	14,62	57,48	3,65	1,48
MH25D-1	5,97	0,65	14,31	59,51	4,17	1,60
MH25D-3	5,13	0,71	13,57	61,34	4,00	1,54
MH25D-5	6,74	0,73	13,27	66,13	3,99	1,48
MH40D-1	5,61	0,66	14,40	58,68	4,18	1,66
MH40D-3	5,20	0,85	13,80	62,90	4,05	1,66
MH40D-5	5,44	0,70	13,21	62,78	4,16	1,68

Não foram identificadas tendências associadas à temperatura de modificação hidrotérmica. Entretanto, os intervalos de 200–300 e 300–400 °C apresentaram comportamentos distintos em função do tempo. Para o licor pirolenhoso bruto, não houve tendência definida entre 200 e 300 °C, enquanto entre 300 e 400 °C ocorreu aumento da perda de massa com o prolongamento da modificação hidrotérmica. Para o licor pirolenhoso destilado, a perda entre 200 e 300 °C diminuiu com o tempo de modificação hidrotérmica, enquanto entre 300 e 400 °C apresentou tendência de aumento. Como foi analisada uma amostra por série, esses resultados foram interpretados descritivamente. A predominância da perda de massa entre 300 e 400 °C corresponde ao principal estágio de degradação térmica do Paricá, relacionado principalmente à decomposição da celulose e à contribuição da lignina. Estudos com Paricá registraram cerca de metade da perda de massa nesse intervalo (Vidaurre *et al*., 2012; Takahashi *et al*., 2021).

Comparativamente, as séries tratadas com licor pirolenhoso bruto apresentaram, em geral, maiores perdas entre 200 e 300 °C, enquanto aquelas impregnadas com licor pirolenhoso destilado apresentaram perdas iguais ou superiores entre 300 e 400 °C. Esse comportamento indica que a destilação alterou a distribuição da perda de massa das lâminas impregnadas, deslocando parte da degradação para temperaturas superiores.

A destilação simples promove a separação dos constituintes do licor pirolenhoso em função de sua volatilidade. Os compostos que volatilizam na faixa de temperatura empregada são condensados e constituem a fração destilada, enquanto as frações menos voláteis e de maior massa molecular permanecem no balão de destilação, incluindo, entre outros constituintes, frações de alcatrão e HPAs. Essa separação reduz a proporção de compostos pesados e sólidos

condensáveis no licor pirolenhoso destilado, o que pode explicar sua menor retenção gravimétrica nas lâminas. A alteração da composição também pode ter contribuído para a menor perda de massa entre 200 e 300 °C e para a maior perda entre 300 e 400 °C; contudo, a TGA das lâminas impregnadas não permite identificar os compostos responsáveis por esse comportamento (Almeida *et al*., 2018; Pimenta *et al*., 2023; Zhou *et al*., 2024).

Essa separação também pode explicar a diferença de coloração entre as lâminas. A permanência de frações menos voláteis e de maior massa molecular, incluindo alcatrão e HPAs, no licor pirolenhoso bruto pode ter contribuído para o escurecimento das lâminas, enquanto a menor presença desses constituintes no licor pirolenhoso destilado pode estar associada ao aspecto mais claro das lâminas tratadas (Almeida *et al*., 2018; Zhou *et al*., 2024; Fiorio *et al*., 2025).

As diferenças entre os tratamentos ocorreram principalmente acima de 200 °C, faixa superior às temperaturas usuais de serviço de componentes estruturais. Assim, os resultados indicam que tanto o licor pirolenhoso bruto quanto o destilado mantêm estabilidade térmica em condições normais de uso de EWP. Nessa faixa de serviço, a ausência de degradação térmica relevante sugere que os compostos fenólicos do licor pirolenhoso, associados à ação antifúngica e inseticida, também tendem a ser preservados, contribuindo para a manutenção do potencial protetor da madeira contra fungos e cupins. Entretanto, essa interpretação deve ser confirmada por ensaios biológicos e de lixiviação. A destilação também pode ser vantajosa por reduzir frações associadas ao alcatrão e aos HPAs, embora sua influência sobre a eficácia preservativa deva ser avaliada experimentalmente (Firouzbehi *et al*., 2020; Fiorio *et al*., 2025).

4. Conclusões

A modificação hidrotérmica aumentou a retenção do licor pirolenhoso nas lâminas de Paricá, com maiores valores para o licor pirolenhoso bruto. Todas as séries tratadas com licor pirolenhoso bruto apresentaram retenção superior à condição sem modificação hidrotérmica, enquanto, para o licor pirolenhoso destilado, isso ocorreu em todas as séries, exceto MH25D-1. Quanto à estabilidade térmica, a maior perda de massa ocorreu entre 300 e 400 °C em todas as condições avaliadas. As lâminas tratadas com licor pirolenhoso bruto apresentaram, em geral, maiores perdas entre 200 e 300 °C, enquanto aquelas tratadas com licor pirolenhoso destilado apresentaram perdas iguais ou superiores entre 300 e 400 °C. A destilação alterou, portanto, a distribuição da perda de massa das lâminas impregnadas. Como foi analisada uma lâmina por série, os resultados da TGA devem ser interpretados descritivamente.

5. Agradecimentos

Os autores agradecem ao Grupo Arboris e à Viena Siderúrgica pela disponibilização dos materiais utilizados neste trabalho.

6. Referências bibliográficas

Ali, M. R., Abdullah, U. H., Ashaari, Z., Hamid, N. H., & Hua, L. S. (2021). Hydrothermal modification of wood: A review. Polymers, 13(16), 2612. https://doi.org/10.3390/polym13162612.

Almeida, R. S. R., Taccini, M. M., Moura, L. F. de, Ceribelli, U. L., & Brito, J. O. (2018). Chemical composition and purification of pyroligneous liquor from eucalyptus wood. Modern Concepts & Developments in Agronomy, 1(4), 68–72. https://doi.org/10.31031/MCDA.2018.01.000518.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2022). ABNT NBR 7190 - 1: Projeto de estruturas de madeira. Parte 1: Critérios de dimensionamento. Rio de Janeiro: ABNT.

Boer, F. D., Pignolet, L., Valette, J., Candelier, K., Commandré, J. M., Fournier, M., & Thévenon, M. F. (2024). Efficacy of slow pyrolysis liquid from sugarcane bagasse for wood protection and its leaching properties. European Journal of Wood and Wood Products, 82, 1665-1683. https://doi.org/10.1007/s00107-024-02116-9.

De Araujo, V., Vasconcelos, J., Morales, E., Barbosa, J., Gava, M., Faustino, E., ... & Garcia, J. (2023). Timber construction regulations in Brazil: A perspective from its national industry of timber houses. Buildings, 13(9), 2136. https://doi.org/10.3390/buildings13092136.

De Araujo, V., Pramreiter, M., & Christoforo, A. (2025). A global policy framework for the circular use of forest biomass as building materials. Nature Reviews Materials, 10, 170-172. https://doi.org/10.1038/s41578-025-00780-8.

Dias, J. M. S., Carvalho, N. P. D., Silva, M. G. S. D., Lima, V. D. S., Locatelli, I. G. O., Santos, D. N. D., ... & César, S. F. (2025). Chromated copper arsenate treatment on Paricá wood. Ciência Rural, 55(10), e20240491. https://doi.org/10.1590/0103-8478cr20240491.

Fiorio, M. S., Butzge, J. C., & Apel, M. A. (2025). Chemical composition, production, biological properties and patent records of the pyroligneous extract of Eucalyptus spp.: A systematic review. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 190, 107155. https://doi.org/10.1016/j.jaap.2025.107155.

Firouzbehi, F., Efhamisisi, D., Hamzeh, Y., Tarmian, A., & Oladi, R. (2020). Pyrolysis acid as sustainable wood preservative against rot fungi. Biofuels, Bioproducts and Biorefining, 15(1), 74-84. https://doi.org/10.1002/bbb.2149.

Fritz, C., & Garay, R. (2025). Advancing sustainable timber protection: a comparative study of international wood preservation regulations and Chile's framework under environmental,

social, and governance and sustainable development goal perspectives. Buildings, v. 15(9), 1564. https://doi.org/10.3390/buildings15091564.

Huang, Y., Hu, J., Peng, H., Chen, J., Wang, Y., Zhu, R., ... & Zhang, Y. (2024). A new type of engineered wood product: Cross-laminated thick veneers. Case Studies in Construction Materials, 20, e02753. https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e02753.

Lehringer, C., Richter, K., Schwarze, F. W. M. R., & Militz, H. (2009). A review on promising approaches for liquid permeability improvement in softwoods. Wood and Fiber Science, 41(4), 373–385.

Pimenta, A. S., Gama, G. S. P., Feijó, F. M. C., Braga, R. M., de Azevedo, T. K. B., de Melo, R. R., ... & de Andrade, G. S. (2023). Wood vinegar from slow pyrolysis of eucalyptus wood: assessment of removing contaminants by sequential vacuum distillation. Forests, 14(12), 2414. https://doi.org/10.3390/f14122414.

Takahashi, V. M., Ferreira, V. R. S., Cademartori, P. H. G., Carneiro, M. E., & Silva, D. A. (2021). Qualidade energética de resíduos madeireiros Paricá e pinus. Energia na Agricultura, 36(2), 230–238. https://doi.org/10.17224/EnergAgric.2021v36n2p230-238.

Terezo, R. F., Lopez, G. A. C., de Paiva Sampaio, C. A., & Bourscheid, C. B. (2017). Resistência da madeira tratada de Paricá (*Schizolobium parahyba* var. *amazonicum* (Huber ex. Ducke) Barneby) ao ataque de cupins. Revista Ciência da Madeira (Brazilian Journal of Wood Science), 8(3), 187-193. https://doi.org/10.12953/2177-6830/rcm.v8n3p187-193.

Vidaurre, G. B., Carneiro, A. de C. O., Vital, B. R., Santos, R. C. dos, & Valle, M. L. A. (2012). Propriedades energéticas da madeira e do carvão de Paricá (*Schizolobium amazonicum*). Revista Árvore, 36(2), 365–371. https://doi.org/10.1590/S0100-67622012000200018.

Wang, C., Zhang, S., Wu, S., Cao, Z., Zhang, Y., Li, H., ... & Lyu, J. (2018). Study on an alternative approach for the preparation of wood vinegar from the hydrothermolysis process of cotton stalk. Bioresource technology, 254, 231-238. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.01.088.

Zhou, H., Shen, Y., Zhang, N., Liu, Z., Bao, L., & Xia, Y. (2024). Wood fiber biomass pyrolysis solution as a potential tool for plant disease management: A review. Heliyon, 10(3), e25509. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e25509.

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Nanocelulose como reforço em painéis de baixa e média densidade de *Eucalyptus* e *Caryocar brasiliense*

Thatiele Pereira Eufrazio[3]; Karolayne Ferreira Saraiva[3]; Maria Eduarda Pinto dos Santos[1]; Luiz Fernandes Silva Dionísio[2,3]; Bruna Duque Guirardi[1;] Raquel Marchesan[1,3]

[1] Universidade Federal do Tocantins, curso de Engenharia Florestal, Gurupi, Tocantins, Brasil.
[2] Universidade Estadual do Pará, curso de Engenharia Florestal, Castanhal, Pará, Brasil.
[3] Universidade Federal do Tocantins, Programa de Pós Graduação em Ciências Florestais e Ambientais, Gurupi, Tocantins, Brasil.

Resumo: O objetivo desta pesquisa foi avaliar o efeito da adição de nanocelulose como agente de reforço na produção de painéis aglomerados de baixa a média densidade fabricados com partículas de *Eucalyptus*, casca do fruto de *Caryocar brasiliense* (pequi) e adesivo PVA. Os painéis foram produzidos utilizando-se uma composição de 50% de partículas de *Eucalyptus*, 50% de casca de pequi, 300 g de adesivo PVA e 2,5% de parafina. Como agentes de reforço, foram utilizados 257 g de suspensão aquosa de nanocelulose e 7,5% de nanocelulose liofilizada. Foram avaliadas as propriedades de umidade, absorção de água, inchamento em espessura, densidade aparente e resistência à tração perpendicular dos painéis. O delineamento experimental foi inteiramente casualizado (DIC), e os dados obtidos foram submetidos à análise estatística utilizando-se o software R. Os painéis *Eucalyptus* + pequi (EP) e *Eucalyptus* + pequi + nanocelulose liofilizada (EPNL) apresentaram os maiores valores de densidade aparente e resistência à tração perpendicular. Os painéis compostos apenas por *Eucalyptus* apresentaram baixa adesão entre as partículas, resultando em desempenho inferior quanto às propriedades físicas e, consequentemente, mecânicas. A adição de nanocelulose em suspensão aquosa aos painéis *Eucalyptus* + pequi + nanocelulose (EPN) promoveu maior absorção de água e maior inchamento em espessura, comprometendo seu desempenho físico. Os resultados obtidos demonstraram melhor desempenho nos painéis cuja nanocelulose liofilizada foi adicionada, o que viabiliza a sua utilização na produção de painéis aglomerados para diversos fins, como produção de móveis e pisos.

Palavras-chave: Pequi; Produtos De Maior Valor Agregado; Nanopartículas; Reaproveitamento; Biocompósitos.

Nanocellulose reinforcement of low- and medium-density particleboards manufactured from *Eucalyptus* and *Caryocar brasiliense* fruit peel

Abstract: The objective of this study was to evaluate the effect of nanocellulose as a reinforcing agent in the production of low- to medium-density particleboards manufactured from *Eucalyptus* particles, *Caryocar brasiliense* (pequi) fruit peel, and PVA adhesive. The panels were manufactured using a composition of 50% *Eucalyptus* particles, 50% pequi fruit peel, 300 g of PVA adhesive, and 2.5% paraffin. As reinforcing agents, 257 g of an aqueous nanocellulose suspension and 7.5% freeze-dried nanocellulose were incorporated into the panels. The evaluated properties included moisture content, water absorption, thickness swelling, bulk density, and internal bond strength of the panels. The experiment was conducted using a

completely randomized design (CRD), and the obtained data were subjected to statistical analysis using R software. The *Eucalyptus* + pequi (EP) and *Eucalyptus* + pequi + freeze-dried nanocellulose (EPNL) panels exhibited the highest bulk density and internal bond strength. In contrast, the panels manufactured solely from *Eucalyptus* particles exhibited poor particle bonding, resulting in inferior physical and, consequently, mechanical properties. The addition of nanocellulose in aqueous suspension to the *Eucalyptus* + pequi + nanocellulose (EPN) panels increased water absorption and thickness swelling, compromising their physical performance. Overall, the incorporation of freeze-dried nanocellulose provided the best performance among the evaluated treatments, indicating its potential for the manufacture of particleboards for applications such as furniture and flooring.

Keywords: Pequi; Higher Value-Added Products; Nanoparticles; Recycling; Biocomposites.

1. Introdução

O mercado de painéis de madeira no Brasil apresenta um panorama promissor e em constante evolução. Os painéis de madeira são amplamente utilizados em diversos setores, como construção civil, mobiliário, indústria de embalagens, entre outros. Em consonância, a conscientização sobre a importância da sustentabilidade tem impulsionado a busca por produtos fabricados com madeira proveniente de manejo florestal responsável e certificado (IBÁ, 2025).

Com o intuito de enfrentar os obstáculos relacionados à sustentabilidade e aproveitando o melhor resultado da série histórica em receita no setor florestal, empresas do ramo têm se esforçado continuamente na busca de novas tecnologias e soluções que permitam a utilização de resíduos de madeira e outros materiais alternativos como fontes de matéria-prima a fim de agregar valor aos seus produtos. Nesse contexto, a casca de pequi se destaca como uma opção viável, já que é um subproduto abundante no Cerrado brasileiro (Guedes et al, 2017; Carneiro et al, 2023).

O pequi (*Caryocar brasiliense*) é um fruto típico do Cerrado brasileiro. Sua polpa representa entre 8 e 15% do fruto, enquanto a casca corresponde a cerca de 80% de sua massa (Nascimento et al., 2015). Apesar de geralmente ser descartada, a casca apresenta potencial para diversas aplicações industriais e tecnológicas, incluindo a produção de biocompósitos (Vieira et al., 2024).

A utilização das cascas do pequi para a produção de painéis aglomerados pode apresentar vantagens como a melhor compactação do painel e consequentemente aumento da densidade e resistência, além da redução do impacto ambiental causado pelo seu descarte inadequado no meio ambiente. Nesse cenário, os painéis aglomerados a base de madeira de *Eucalyptus* e casca de pequi surgem como uma alternativa sustentável para a confecção de produtos de maior valor agregado. No entanto, painéis formulados unicamente por estas

partículas apresentaram moderada absorção e inchamento, sendo estas caraterísticas indesejáveis porque podem reduzir sua durabilidade (VIEIRA et al., 2024).

A fim de melhorar tais características, buscou-se a utilização da nanocelulose como reforço, uma vez que esta possui notável superfície específica, alta área superficial e elevada cristalinidade (SANTIAGO e REIS., 2021). Essas propriedades fazem com que a nanocelulose apresente-se um grande potencial como aditivo para a melhoria das propriedades mecânicas de materiais compósitos, como os painéis aglomerados, melhorando a rigidez, resistência e a durabilidade das ligações (FERREIRA., 2017).

Nesse sentido, o objetivo desta pesquisa foi avaliar o efeito da adição de nanocelulose como agente de reforço na produção dos painéis aglomerados de baixa densidade produzidos a partir de partículas de *Eucalyptus*, da casca do fruto da espécie *Caryocar brasiliense* (pequi) e adesivo PVA.

2. Material e métodos

Obtenção dos materiais

A pesquisa foi realizada na Universidade Federal do Tocantins, Campus de Gurupi-TO, que está situada nas coordenadas 11º 43' S e 49º 04’ W, no Laboratório de Tecnologia e Utilização de Produtos Florestais I. Para a produção das partículas de madeira, utilizou-se material clonal do híbrido *Eucalyptus grandis* vs *Eucalyptus urophylla* provenientes de um plantio localizado na fazenda experimental da Universidade Federal do Tocantins - Campus de Gurupi, UFT, com 13 anos de idade.

As árvores foram processadas e transformadas em maravalhas que foram secas em temperatura ambiente por um período de um mês até atingir cerca de 5% de umidade e, posteriormente, foram moídas para a obtenção das partículas e por meio do peneiramento separou-se em três categorias de granulometria, utilizando-se a retida na malha 16 mesh.

Para a produção das partículas derivadas do fruto da espécie *Caryocar brasiliense* (pequi), foram coletadas as cascas resultantes do descarte após obtenção do fruto numa feira municipal na cidade de Gurupi-TO. As cascas do pequi foram submetidas a um processo de seleção e limpeza e levadas para a estufa solar para a secagem e, por fim, foram moídas, peneiradas e selecionadas em três categorias de granulometria (16, 40 e 60 mesh), assim como ocorreu com as partículas de madeira. Para a produção dos painéis, utilizou-se a granulometria retida na malha 16 mesh.

O adesivo sintético acetato de polivinila (PVA) da marca TEK BOND Saint-Gobain foi obtido no comércio local. A parafina líquida foi adquirida num comércio externo, enquanto a nanocelulose foi obtida através da doação da empresa Suzano Papel e Celulose.

Produção e caracterização dos adesivos e dos painéis aglomerados

A madeira de *Eucalyptus* e as cascas do fruto de pequi foram secas e processadas até a obtenção de partículas do tipo "sliver". Para a produção dos painéis aglomerados foram utilizadas proporções de 50% de partículas de *Eucalyptus* e 50% de partículas de casca de pequi. O primeiro tratamento (T1) é referente ao painel testemunha, sendo os componentes deste as partículas de *Eucalyptus*, adesivo PVA e parafina. Para o segundo tratamento (T2), utilizou-se as partículas de *Eucalyptus*, pequi, adesivo PVA e parafina.

No terceiro tratamento (T3) foram adicionadas as partículas de *Eucalyptus*, de pequi, a nanocelulose em solução aquosa a 96,65% de umidade, cujo peso úmido foi de 257 g, que equivale a 7,5 g da nanocelulose seca, e parafina. Para o quarto tratamento (T4) foram utilizadas as partículas de *Eucalyptus* e pequi, bem como a parafina nas proporções já pré-estabelecidas, no entanto, a nanocelulose foi liofilizada, ou seja, utilizou-se o produto resultante do processo de remoção da água por sublimação.

Em relação as concentrações, o adesivo PVA comercial foi utilizado em proporção definidas nos pré-testes, a parafina foi correspondente a 2% em relação a massa total do painel e a nanocelulose para reforço equivalente a 2,5%, conforme especificado na tabela 1.

Tabela 1 – Delineamento experimental do estudo.

Qtd - Painéis	Madeira (g)	Pequi (g)	PVA (g)	Nanocelulose (g)	Parafina (g)
T1 - 6	500	x	300	x	10
T2 - 6	300	300	300	x	12
T3 - 6	300	300	300	527	12
T4 - 6	300	300	300	7,5	12

Para a prensagem dos painéis, foi utilizada uma prensa hidráulica com capacidade de carga para 15 toneladas, utilizando-se pressão específica de 6 $Kgf.cm^{-2}$, tempo de pré-prensagem de 10 minutos e prensagem por 24 horas em temperatura ambiente.

Após a prensagem, os painéis aglomerados foram expostos à temperatura ambiente até a cura total do adesivo e até atingirem o teor de umidade de equilíbrio. Ao término deste período, foram confeccionados os corpos de prova destinados aos ensaios de teor de umidade,

absorção de água, inchamento, densidade aparente e compressão axial dos painéis, conforme as recomendações da norma NBR 14810-2 (ABNT, 2018).

Delineamento estatístico

Para o teor de umidade, densidade aparente, absorção, inchamento e resistência à tração o delineamento experimental foi inteiramente casualizado simples diferenciando entre os tratamentos dos painéis: *Eucalyptus*, *Eucalyptus* + casca de pequi (*E*+P), *Eucalyptus* + casca de pequi + nanocelulose (*E*+P+N) e *Eucalyptus* + casca de pequi + nanocelulose liofilizada (*E*+P+NL).

Os dados foram submetidos aos testes de normalidade (Shapiro-Wilk) e homogeneidade de variâncias (Bartlett). Atendidos os pressupostos, realizou-se a análise de variância (ANOVA) e, quando constatadas diferenças significativas, as médias foram comparadas pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). Também foi determinada a correlação de Pearson entre as variáveis analisadas.

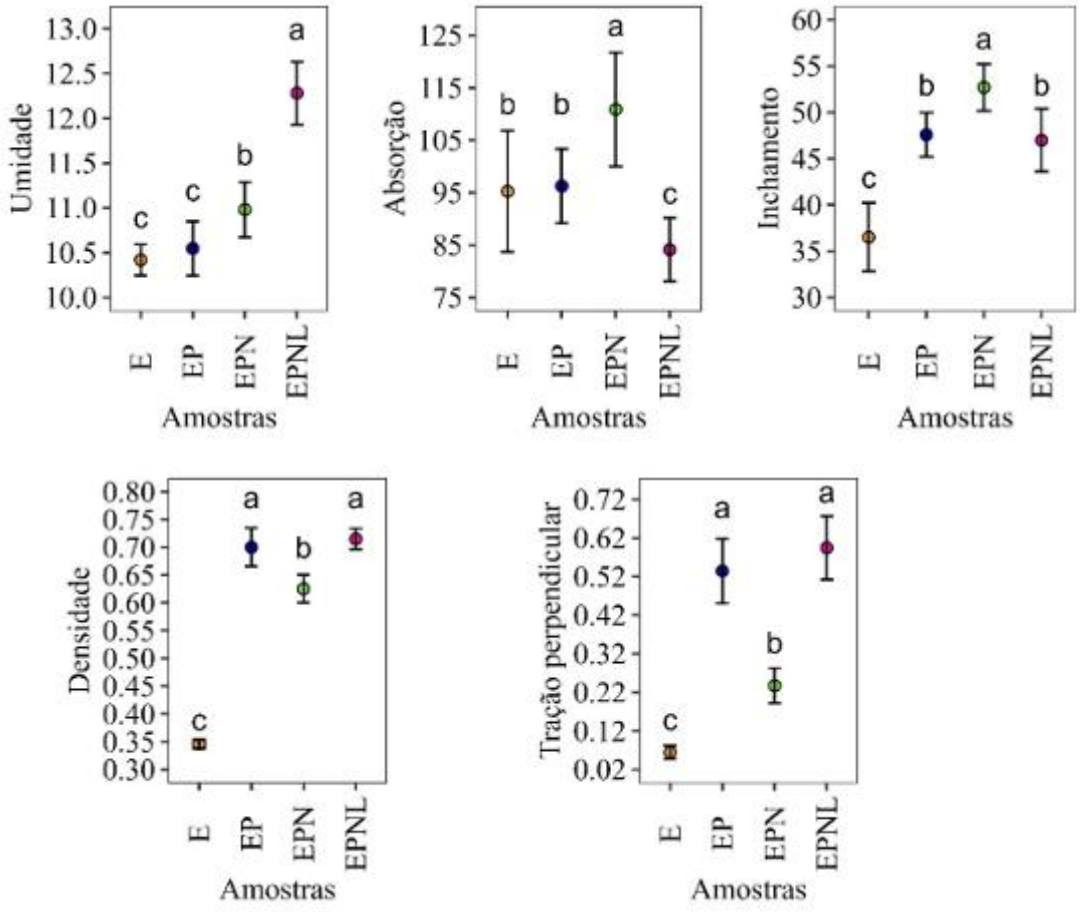
As análises estatísticas foram realizadas no software R versão 4.2.3 (R Development Core Team, 2023), utilizando os pacotes agricolae (Mendiburu, 2017) e ggplot2 (Wickham, 2016), ao nível de 5% de significância.

3. Resultados e discussão

Na Figura 1 estão apresentados os resultados correspondentes aos parâmetros de teor de umidade (TU), absorção (ABS), inchamento (INCH), densidade aparente (Da) e resistência a tração (ʃT) dos painéis de *Eucalyptus*, *Eucalyptus* + pequi (EP), *Eucalyptus* + pequi + nanocelulose (EPN) e *Eucalyptus* + pequi + nanocelulose liofilizada (EPNl). Nota-se que houve diferença significativa ao nível de 5% de significância para todos os tratamentos.

Observa-se que o teor de umidade de todos os painéis esteve abaixo de 12%, valores estes dentro do recomendado pela norma NBR 14810–2 (ABNT, 2018), que estabelece teores ideais de umidade entre 5% e 13% para painéis aglomerados (Fig. 1 – a). Conforme destacado por SITANGGANG et al. (2015), as condições de vapor de água no ambiente, bem como o teor de umidade da matéria prima utilizada podem influenciar no teor de umidade dos painéis particulados. Tal fato pode ser atestado especialmente nos painéis EPN e EPNL, que diferiram estatisticamente dos demais devido a composição da nanocelulose que favorece a absorção de umidade tanto pelo meio aquoso em que se encontra quanto pela sua higroscopicidade (SOLHI et al., 2023).

Figura 1 – Valores médios das propriedades de teor de umidade, absorção, inchamento, densidade aparente e resistência à tração dos painéis aglomerados em suas respectivas composições.



As maiores médias encontradas para a propriedade de absorção foram referentes aos painéis compostos por *Eucalyptus* + pequi + nanocelulose (110,88%), seguidos dos painéis compostos por *Eucalyptus* + pequi (96,26%) e *Eucalyptus* (95,26%), sendo estes dois últimos iguais estatisticamente (Fig. 1 – b). Os painéis compostos por *Eucalyptus* + pequi + nanocelulose liofilizada obtiveram menores valores de absorção dentre todos os demais. Em relação ao inchamento (Fig. 1 – c), observa- se que as menores médias encontradas foram para os painéis de *Eucalyptus* (36,51%), *Eucalyptus* + pequi + nanocelulose (46,98%) e *Eucalyptus* + pequi (47,58%). O painel de *Eucalyptus* + pequi + nanocelulose apresentou a maior média encontrada para a propriedade de inchamento (56,70%).

A baixa agregação entre as partículas de *Eucalyptus* durante o processo de produção dos painéis acarretou maior absorção da água. Entretanto, foi observado que os valores de

inchamento em espessura destes painéis foram consideravelmente inferiores aos demais. Esse fenômeno ocorreu devido a ocupação da água nos espaços vazios presentes na estrutura devido à baixa compactação o que, conforme destacado por HUA et al., (2015) e MENALI et al., (2024), pode ser explicado pela estrutura das partículas como sua granulometria e densidade, que pode afetar a compactação de painéis aglomerados.

A mesma situação pôde ser observada nos painéis de EP, que apresentaram elevada absorção de água e inchamento. Uma razão para esse resultado pode estar relacionada ao alto teor de carboidratos presentes na casca do fruto do pequi. (VIEIRA et al., 2016). Além disso, o método de prensagem pode influenciar na característica higroscópica dos painéis formulados, especialmente quando este possui alta concentração de carboidratos. De acordo com ALEXANDRE e CASTRO (2022), a absorção ocorre quando moléculas de água presentes no ambiente se ligam a hidroxilas livres existentes na parede celular do material vegetal, portanto uma solução para este problema seria tratar quimicamente estas partículas a fim de reduzir o teor destes carboidratos.

Por outro lado, os painéis de *E*PN apresentaram alta absorção e inchamento. Isto ocorreu devido ao método de conservação da nanocelulose que consiste em meio aquoso a fim de evitar o seu ressecamento, o que prejudicou as propriedades do adesivo PVA, uma vez que o mesmo é altamente solúvel em água. Além disso, é importante destacar que, ainda que haja menor permeabilidade quando a celulose é reduzida um nível nanométrico (DUFRESNE, 2013), essa característica ainda existe e pode influenciar na absorção de água e, consequentemente, inchamento dos painéis reforçados com este composto.

A densidade aparente dos painéis compostos por *E*P, *E*PN e *E*PNL foram, respetivamente, 0,70, 0,63 e 0,71 g/cm^3 (Fig. 1 – d). A norma NBR 14810 (ANBT, 2006) classifica painéis entre 0,55 e 0,75 g/cm2 como média densidade, o que pode ser observado nos valores encontrados, com exceção do painel de *Eucalyptus*, que obteve densidade inferior à 0,55 g/cm2, ou seja, baixa densidade. A densidade aparente possui forte influência em todas as demais propriedades físicas de painéis aglomerados e está relacionado à compactação do painel. PROTÁSSIO et al. (2012) afirma que há uma relação “perfeita e proporcional” entre a densidade e a compactação, já que a compactação nada mais é do que a razão entre o cálculo da densidade básica da madeira e a densidade aparente do painel.

A resistência à tração dos painéis compostos com *Eucalyptus* e pequi apresentou maior resistência dentre os demais, com 0,54 Mpa (Fig. 1 – e). Os painéis compostos por *E*PN e *E*PNL cujas 10 médias foram de 0,53 MPa, foram iguais estatisticamente. O painel composto por

Eucalyptus demonstrou a menor resistência, com 0,06 MPa. A razão para os painéis compostos unicamente por partículas de *Eucalyptus* e seus aditivos apresentarem menor resistência mecânica foi a baixa agregação das partículas durante o processo de prensagem. Tal efeito proporcionou espaços vazios que resultaram em elevada porosidade, diminuindo a sua densidade e causando redução na resistência. O fator inverso pôde ser observado nos painéis compostos reforçados com nanocelulose liofilizada, que apresentou a maior resistência dentre os demais.

A liofilização, que nada mais é do que o processo de secagem por sublimação, impediu que a pressão capilar formada durante este processo afetasse a estrutura da nanocelulose (CHEN et al, 2021), resultando num composto com baixa densidade, alta resistência e elevada flexibilidade com inércia química (CHEN et al, 2021; KARGARZADEHA et al, 2018). Tais características foram capazes de elevar a compactação dos painéis e, consequentemente a sua densidade e resistência, não afetando negativamente o adesivo PVA como observado na nanocelulose em conservação aquosa. No entanto, cabe ressaltar que a utilização do adesivo PVA restringe a utilização de painéis produzidos a base deste para locais externos e/ou com alta umidade, uma vez que a sua composição o torna altamente solúvel em água.

4. Conclusões

Os painéis de *E*P apresentaram maior absorção e inchamento dentre os demais devido ao elevado teor de carboidratos presentes na casca do fruto do pequi. A utilização da nanocelulose em solução aquosa ocasionou baixa performance dos parâmetros de inchamento e absorção.

A utilização da nanocelulose liofilizada nos painéis de *E*PNL diminuiu os valores no parâmetro de absorção observada nos painéis de *E*P, portanto houve melhora nessa característica. Além disso, houve aumento da densidade aparente nos painéis *E*PNL e constância na resistência à tração, demonstrando eficácia do reforço com nanocelulose liofilizada nos painéis aglomerados.

5. Agradecimentos

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão das bolsas de Iniciação Científica (PIBIC) e de pós-graduação, fundamentais para o desenvolvimento desta pesquisa, e ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais e Ambientais da Universidade Federal do Tocantins (UFT).

6. Referências bibliográficas

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). (2006). NBR 14810 – 2: chapas de madeira aglomerada – parte 2 – requisitos. Rio Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). (2018). NBR 14810-2 - Painéis de partículas de media densidade: Parte 2: Requisitos e métodos de ensaio (Medium density particleboards: Part 2: Requirements and testing methods). Rio de Janeiro, Brasil.

Carneiro, C. R., Alhaji, A. M., da Silva, C. A. S., de Sousa, R. D. C. S., Monteiro, S., Coimbra, J. S. D. R. (2023). Potential challenges of the extraction of carotenoids and fatty acids from pequi (*Caryocar brasiliense*) oil. Foods, 12(9): 1907. https://doi.org/10.3390/foods12091907

Dufresne, A. (2013). Nanocellulose: a new ageless bionanomaterial. Materials today, 16(6), 220-227. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.mattod.2013.06.004 .

Guedes, A. M. M., Antoniassi, R., Faria-Machado, A. F. (2017). Pequi: a Brazilian fruit with potential uses for the fat industry. OCL, 24(5): D507. https://doi.org/10.1051/ocl/2017040 .

Ferreira, J. C**.** (2017). Sínteses de adesivos de ureia-formaldeído com adição de lignina Kraft e celulose nanocristalina. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa – MG.

Hua, L. S., Ashaari, Z., Chen, L. W., San, H. P., Peng, T. L., May, C. (2015). Properties of particleboard with oil palm trunk as core layer in comparison to three-layer rubberwood particleboard. Journal of Oil Palm Research, 27(1): 67-74. Disponível: https://jopr.mpob.gov.my/properties-of-particleboard-with-oil-palm-trunk-as-core-layer-in-comparison-to-three-layer-rubberwood-particleboard/ .

IBÁ. Indústria Brasileira de Árvores. (2025). Relatório Anual 2024. São Paulo. Disponível: https://iba.org/wp-content/uploads/2025/10/IBA_relatorio_digital_POR.pdf

Menali, L. D. O., Zidanes, U. L., Dias, M. C., Setter, C., Silveira, M. N. L., Faria, D. L., Ferreira, S. R. (2024). Production and analysis of the physical and mechanical of particleboards panels produced with *Acrocomia aculeata* endocarp. Cerne, 30: e-103302. Disponível em: https://doi.org/10.1590/01047760202430013302 .

Nascimento, R. S., & Cocozza, F. D. (2015). Physico-chemical characterization and biometry of fruits of ‘pequi’ in Western Bahia. Revista brasileira de engenharia agrícola e ambiental, 19(8), 791-796. https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v19n8p791-796 .

Santiago, N. M. & Reis E. A. P. (2021). Nanocelulose: do entendimento as aplicações. Encontro Toledo de Iniciação Científica. Toledo Prudente Centro Universitário.

Solhi, L.; Guccini, V.; Heise, K.; Solala, I.; Niinivaara, E.; Xu, W.; Kontturi, E. (2023). Understanding nanocellulose–water interactions: turning a detriment into an asset. Chemical reviews, 123(5): 1925-2015. Disponível em: https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.2c00611?urlappend=%3Fref%3DPDF&jav=VoR&rel=cite-as .

Vieira, G. H. C., Moraes, T. P. E., Saraiva, K. F., Marchesan, R. (2024). Lignina como agente de reforço em painéis produzidos com *Eucalyptus* spp. e casca de *Caryocar brasiliense* (pequi). DESAFIOS-Revista Interdisciplinar da Universidade Federal do Tocantins, 11(3): 17p. Disponível em: https://doi.org/10.20873/2024_v3_18 .

VIEIRA, R. F.; CAMILLO, J.; CORADIN, L. (2016). Espécies nativas da flora brasileira de valor econômico atual ou potencial: plantas para o futuro: Região Centro-Oeste. Ministério do Meio Ambiente, Brasília, (44): 1.160 p.

WASTOWSKI, A. D. (2018). Química da madeira. Editora Interciência, 1: 566.

Nanocelulose Liofilizada Como Reforço Em Painéis Aglomerados De *Eucalyptus* E Casca De Pequi

Maria Eduarda Pinto dos Santos[1]; Carlos Eduardo Lima Sousa[1]; Nicoli Teixeira [1]; Samara Figueira Câmara Noleto[1]; Karolayne Ferreira Saraiva[1]; Bruna Duque Guirardi[1]; Thatiele Pereira Eufrazio[1]; Raquel Marchesan[1]

[1]Universidade Federal do Tocantins (UFT), Curso de Engenharia Florestal, Laboratório de Tecnologia e Utilização de Produtos Florestais (LabTecFlor), Gurupi, Tocantins, Brasil.

Resumo: O aproveitamento de resíduos florestais para a produção de compósitos agrega valor e favorece a sustentabilidade da cadeia madeireira, sendo a casca de pequi (*Caryocar brasiliense*), associada à madeira de *Eucalyptus*, uma alternativa promissora para a fabricação de painéis aglomerados. Objetivou-se, portanto, avaliar o efeito da adição de nanocelulose liofilizada nas propriedades físico-mecânicas desses painéis. Foram produzidos três tratamentos com diferentes porcentagens de nanocelulose (T1N, 1,5%; T2N, 2,5%; T3N, 3,5%) e uma testemunha, todos compostos por 50% de *Eucalyptus*, 50% de casca de pequi, adesivo PVA, 2% de parafina e reforço com nanocelulose, sendo avaliados quanto à densidade, à umidade, à absorção de água, ao inchamento, à resistência à tração e ao desempenho acústico. A nanocelulose reduziu a absorção e o inchamento e aumentou a densidade e a resistência mecânica, destacando-se o tratamento T2N como o mais eficiente. Conclui-se que a proporção de 2,5% de nanocelulose liofilizada é a mais indicada para melhorar as propriedades físico-mecânicas dos painéis.

Palavras-chave: *Caryocar brasiliense*, aditivo natural, reaproveitamento.

Freeze-Dried Nanocellulose as a Reinforcement in Particleboard from *Eucalyptus* and Pequi Bark

Abstract: The use of forest residues for the production of composites adds value and promotes the sustainability of the timber supply chain; pequi (*Caryocar brasiliense*) bark, combined with *Eucalyptus* wood, is a promising alternative for the manufacture of particleboard. The objective, therefore, was to evaluate the effect of adding freeze-dried nanocellulose on the physical and mechanical properties of these panels. Three treatments were produced with different percentages of nanocellulose (T1N, 1.5%; T2N, 2.5%; T3N, 3.5%) and a control, all composed of 50% *Eucalyptus*, 50% pequi peel, PVA adhesive, 2% paraffin, and nanocellulose reinforcement. These were evaluated for density, moisture content, water absorption, swelling,

tensile strength, and acoustic performance. Nanocellulose reduced water absorption and swelling and increased density and mechanical strength, with the T2N treatment standing out as the most efficient. It is concluded that a 2.5% proportion of freeze-dried nanocellulose is the most suitable for improving the physical and mechanical properties of the panels.

Keywords: *Caryocar brasiliense*, natural additive, reuse.

1. Introdução

O gênero *Eucalyptus* destaca-se na indústria florestal brasileira devido ao seu rápido crescimento, à adaptabilidade a diferentes solos e climas e à alta produtividade. A madeira do eucalipto apresenta características ideais para painéis aglomerados, como baixa densidade relativa, boa trabalhabilidade e alta resistência mecânica (Hua et al., 2022). Além disso, plantações de eucalipto favorecem a sustentabilidade, pois permitem o manejo florestal renovável e reduz a pressão sobre florestas nativas.

A utilização do eucalipto aliado a resíduos alternativos, como a casca de pequi, potencializa o desenvolvimento de materiais de maior valor agregado, favorecendo a economia circular e o aproveitamento sustentável dos recursos naturais. No que se refere à produção de painéis de madeira, as vendas domésticas cresceram 1,5% em relação a 2022, alcançando 7,1 milhões de m³, com taxa de crescimento anual composta (CAGR) de 0,7% na última década. Os painéis de MDF, com representatividade de 62%, somaram 4,4 milhões de m³, aumento de 4,2% em relação a 2022, enquanto os painéis de MDP registraram queda de 2,7% em 2023 (Ibá, 2024).

O pequi (*Caryocar brasiliense*) é uma fruta típica do cerrado brasileiro, consumida na culinária regional do centro-oeste, norte e nordeste do país. Seu fruto é arredondado, com casca grossa e espinhosa, e possui caroço interno comestível envolvido por polpa amarela e aromática. A casca representa cerca de 80% do peso do fruto maduro e pode ser utilizada como matéria-prima na produção de biocompósitos (Matos et al., 2018).

Estudos anteriores demonstraram resultados satisfatórios quanto às propriedades mecânicas de painéis aglomerados produzidos com casca de pequi, sugerindo potencial de uso como alternativa viável na indústria de painéis de madeira (Vieira et al, 2024). A casca do fruto, resíduo gerado pelo extrativismo e pela comercialização do pequi, ainda é pouco explorada tecnologicamente, o que reforça o interesse em sua valorização como matéria-prima para compósitos.

A nanocelulose é produzida a partir da celulose, principal componente da parede celular das plantas. Trata-se de material de baixa densidade e alta resistência mecânica, com propriedades como elevada área superficial específica e alta cristalinidade (Santiago & Reis, 2021). Essas características conferem à nanocelulose grande potencial como aditivo para a melhoria das propriedades mecânicas de materiais compósitos, como os painéis aglomerados, aumentando a rigidez, a resistência e a durabilidade das ligações internas (Ferreira, 2017).

Diante do exposto, o objetivo desta pesquisa foi avaliar o efeito da adição de nanocelulose liofilizada em diferentes dosagens como agente de reforço na produção de painéis aglomerados de baixa densidade, elaborados a partir de partículas de *Eucalyptus*, casca do fruto de *Caryocar brasiliense* (pequi) e adesivo PVA.

2. Material e métodos

2.1 Obtenção dos materiais

A pesquisa foi conduzida na Universidade Federal do Tocantins, Campus de Gurupi, no Laboratório de Tecnologia e Utilização de Produtos Florestais I. As partículas de madeira utilizadas foram obtidas a partir de árvores de *Eucalyptus urograndis*, com 14 anos de idade, coletadas na Fazenda Experimental da UFT. As árvores foram processadas e transformadas em tábuas, e as partículas de maravalha oriundas do aplainamento foram reaproveitadas para a pesquisa, caracterizando aproveitamento sustentável de resíduos.

As partículas foram processadas em triturador de facas para redução de tamanho e homogeneização inicial e, em seguida, submetidas a peneiramento granulométrico, conforme a NBR 14810-1 (ABNT, 2013). As partículas de maior granulometria foram retidas na malha de 16 mesh, e as demais, retidas nas malhas de 40 e 60 mesh, foram reservadas para análise química.

Para obtenção das partículas de casca de pequi, foram coletadas as cascas resultantes do descarte do fruto em uma feira municipal na cidade de Gurupi-TO, durante a época de frutificação, entre setembro e novembro. As cascas foram submetidas a seleção e limpeza, em seguida para secagem em estufa solar e, por fim, moagem e peneiramento, sendo classificadas nas mesmas três categorias granulométricas (16, 40 e 60 mesh).

Como adesivo, foi utilizado acetato de polivinila (PVA) sintético da marca Tek Bond (Saint-Gobain), adquirido no comércio local. A parafina líquida utilizada foi adquirida em comércio externo, enquanto a nanocelulose foi obtida por doação da empresa Suzano Papel e Celulose.

2.2 Produção dos painéis

Para a produção dos painéis, foram conduzidos três tratamentos experimentais, cada um constituído por seis painéis aglomerados, com formulação baseada na proporção de 50% de partículas de *Eucalyptus* e 50% de partículas de casca de pequi, adicionando-se 300 g de adesivo PVA e 2% de parafina em relação à massa total do painel. A única variável entre os tratamentos foi a proporção de nanocelulose liofilizada, previamente seca por congelamento seguido de sublimação (Figura 1): 1,5% (4,5 g) no tratamento T1N; 2,5% (7,5 g) no tratamento T2N; e 3,5% (10,5 g) no tratamento T3N.

Tabela 1 - Delineamento experimental do estudo

Painéis	Madeira (g)	Pequi (g)	PVA (g)	Nanocelulose (g)	Parafina (g)
Testemunha	300	300	300	0	12
T1N – 6	300	300	300	4,5	12
T2N – 6	300	300	300	7,5	12
T3N – 6	300	300	300	10,5	12

Para a prensagem dos painéis, foi utilizada prensa hidráulica com capacidade para 15 toneladas, com pré-prensagem de 10 minutos e prensagem por 24 horas em temperatura ambiente, sob pressão específica de 9 toneladas. Após a prensagem, os painéis permaneceram expostos à temperatura ambiente até a cura total do adesivo e até atingirem o teor de umidade de equilíbrio.

2.3 Ensaios físicos, mecânicos e acústicos

Após a estabilização dos painéis, foram confeccionados os corpos de prova para determinação das propriedades físicas e mecânicas, conforme os procedimentos estabelecidos pela ABNT NBR 14810-2 (2018). Foram avaliados o teor de umidade, a densidade aparente, a absorção de água, o inchamento em espessura e a resistência à tração perpendicular.

Para avaliação do isolamento acústico, foram confeccionadas caixas com dimensões de 15 × 10 × 7 cm utilizando os painéis produzidos. Um telefone celular emitindo ruído rosa foi

posicionado no interior de cada caixa, sendo o nível de pressão sonora medido por meio de um dosímetro de ruído modelo DOS-600, nas condições de caixa aberta e fechada.

2.3 Análise estatística

Para a análise estatística, inicialmente foi aplicado o teste de normalidade para verificar a distribuição dos dados, seguido da análise de variância (ANOVA) para identificar diferenças significativas entre os tratamentos. Diante da presença de variabilidade estatística, foi utilizado o teste de Tukey ao nível de 5% de significância.

Foi realizada, ainda, a correlação de Pearson para relacionar as propriedades dos painéis, além da Análise de Componentes Principais (PCA) para agrupar os tratamentos de acordo com o desempenho físico-mecânico. As análises foram processadas utilizando os programas Statgraphics, Sisvar, RBio e Past 4.13.

3. Resultados e discussão

A Figura 1 apresenta os valores médios das propriedades de densidade aparente, teor de umidade, absorção, inchamento e resistência a tração dos painéis aglomerados, bem como o resultado do teste de médias de Tukey a 5% de significância, demonstrando que houve diferença estatística significativa para todas as propriedades entre os tratamentos estudados. Os valores de teor de umidade dos tratamentos variaram entre 8,87% e 10,54%, mantendo-se dentro da faixa recomendada pela NBR 14810-2 (ABNT, 2018), que estabelece limites entre 5% e 13% para painéis de partículas.

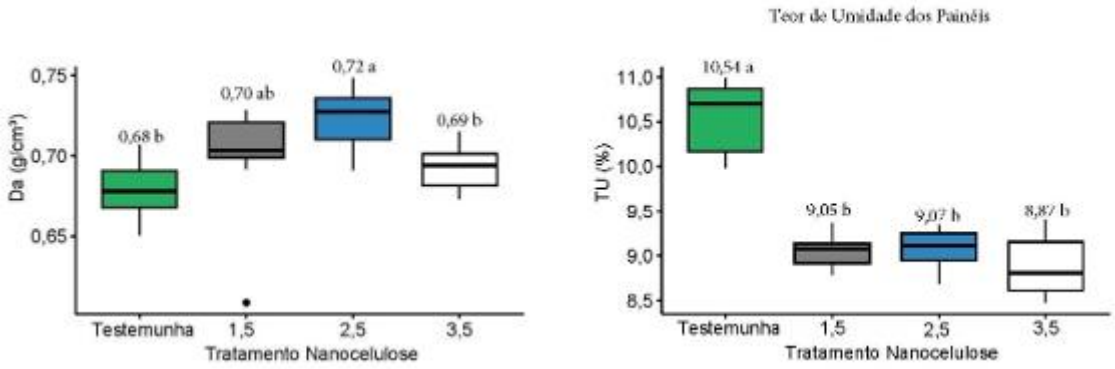
A densidade aparente apresentou valores entre 0,68 g/cm³ e 0,72 g/cm³ para todos os painéis sob todas as dosagens testadas, caracterizando os painéis aglomerados como de média densidade NBR 14810–2, (0,55 g/cm³ a 0,75 g/cm³) (ABNT, 2018). As menores médias foram observadas para os painéis testemunha e reforçados com 3,5% de nanocelulose, com 0,68 g/cm³ e 0,69 g/cm³, respectivamente, enquanto o maior valor foi encontrado para os painéis reforçados com 2,5% de nanocelulose (0,72 g/cm³). Esse resultado indica que a adição de 2,5% de nanocelulose favoreceu o aumento da densidade aparente dos painéis, possivelmente em razão de uma maior compactação das partículas durante o processo de prensagem.

Quanto às propriedades de absorção e inchamento, foi notado que os painéis testemunha apresentaram maiores valores em relação aos demais (163,09% e 84,58%, respectivamente). Isso corrobora os resultados encontrados por Vieira et al. (2024), que demonstraram forte

influência das partículas de pequi no aumento dessas propriedades, devido ao alto teor de carboidratos presentes na casca do fruto, influenciando positivamente a absorção de água.

Os painéis formulados com adição de 2,5% de nanocelulose apresentaram menor absorção e inchamento (129,06% e 56,28%, respectivamente), demonstrando maior efetividade dessa porcentagem na redução dessas propriedades em relação aos demais tratamentos. Esses resultados demonstraram que concentrações intermediárias de nanocelulose promoveram melhor desempenho físico, possivelmente em razão da distribuição mais uniforme das nanofibrilas no compósito, o que aumenta a coesão interna. Ahmed et al. (2025) observaram que teores intermediários de nanocelulose promovem melhor efeito na fluidez e na área de superfície, proporcionando maior equilíbrio entre coesão e fluidez, enquanto maiores teores favorecem a reação contrária.

A resistência à tração dos painéis reforçados em todos os tratamentos (1,5% com 0,43 MPa, 2,5% com 0,45 MPa e 3,5% com 0,36 MPa) foi superior à da testemunha (0,26 MPa), o que foi evidenciado pela diferença estatística desta em relação aos demais. Isso demonstra que o reforço com nanocelulose foi eficiente no aumento da resistência à tração dos painéis aglomerados, com destaque para a formulação com 2,5%, que apresentou o maior valor médio. Yildirim (2021), ao analisar o comportamento da adição de nanocelulose em painéis aglomerados, observou que a adição de nanocelulose melhora positivamente o desempenho mecânico devido à sua estrutura fibrosa em escala nanométrica, que atua formando ligações fortes entre a nanocelulose e as partículas do painel.



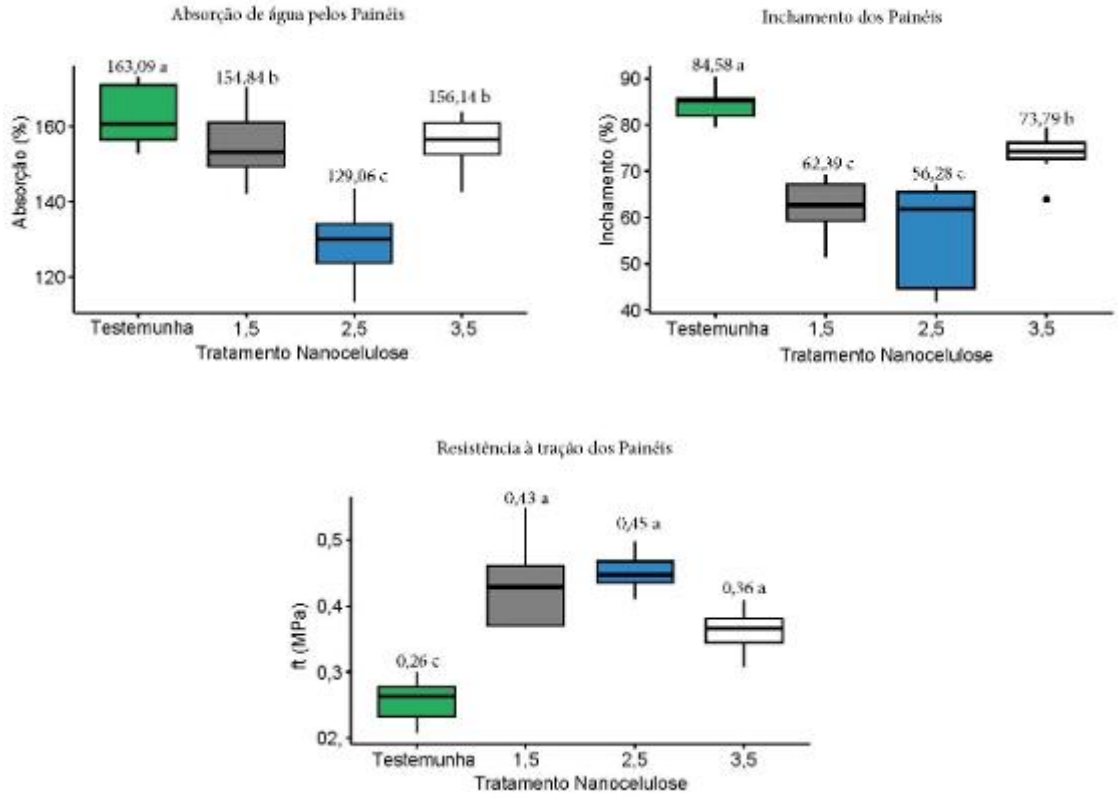


Figura 1 - Valores médios das propriedades de densidade aparente, teor de umidade, absorção, inchamento e resistência mecânica dos painéis aglomerados.
Nota: médias seguidas pela mesma letra minúscula na coluna não diferem estatisticamente entre si (Teste de Tukey, P≥0,05).

Na Figura 2 encontram-se os valores médios das propriedades de isolamento acústico e reflexão dos painéis. Os painéis testemunha apresentaram resultado similar aos reforçados com 1,5% de nanocelulose (74,82 e 74,36 dB, respectivamente), seguidos pelos painéis com 3,5% (70,76 dB) e 2,5% (69,36 dB) para o parâmetro de isolamento acústico. No que se refere ao desempenho no isolamento do som por meio de testes acústicos, menores valores caracterizam melhor desempenho, resultado observado nos painéis reforçados com 2,5% e 3,5% de nanocelulose.

Ao contrário do parâmetro de isolamento acústico, a reflexão acústica trata da reverberação do som, sendo que os painéis com adição de nanocelulose apresentaram comportamentos similares, demonstrando alta reflexão (93,06 dB para 1,5%, 92,84 dB para 2,5% e 89,72 dB para 3,5%). Os resultados demonstraram que, para o uso de painéis em locais cuja finalidade é reduzir ruídos sonoros, os painéis reforçados com 2,5% de nanocelulose foram

os mais indicados, enquanto, para locais cuja intenção é promover a reverberação do som, todas as porcentagens de reforço foram apropriadas.

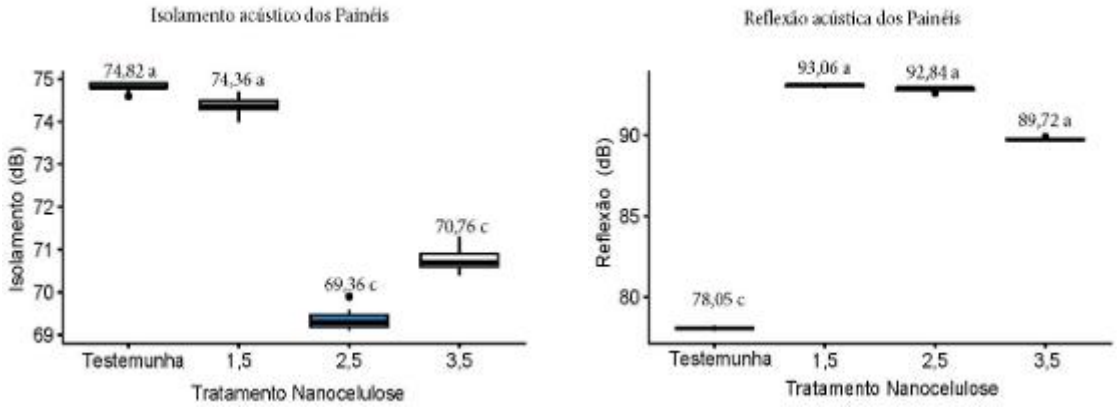


Figura 2 - Valores médios das propriedades de isolamento acústico e reflexão dos painéis aglomerados.
Nota: médias seguidas pela mesma letra minúscula na coluna não diferem estatisticamente entre si (Teste de Tukey, P≥0,05).

Na correlação de Pearson demonstrada na Figura 3, a densidade aparente e a resistência à tração apresentaram correlação positiva moderada (0,50), indicando que painéis mais densos tendem a apresentar maior resistência mecânica. Segundo Arriaga (2023), a densidade da madeira é preditor importante de propriedades mecânicas como resistência à compressão, à tração e à flexão. De forma semelhante, observou-se forte correlação direta entre resistência à tração e reflexão sonora (0,87), evidenciando que painéis mais rígidos refletem mais o som, característica associada à maior compactação interna.

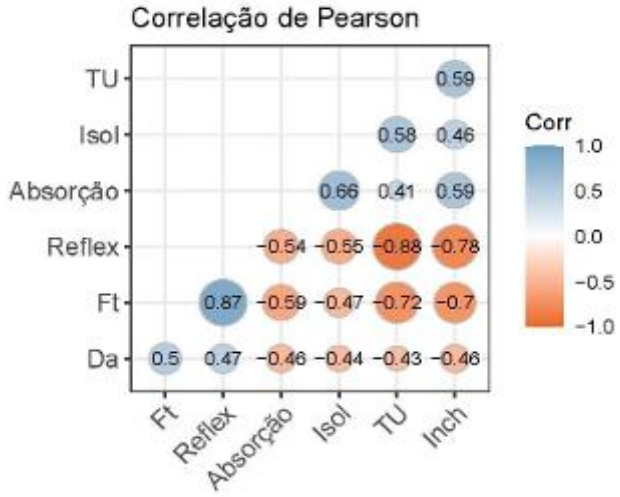


Figura 3 - Correlação de Pearson entre as propriedades de densidade aparente (Da), teor de umidade (TU), absorção, inchamento (Inch), resistência à tração (Ft), isolamento acústico (Isol) e reflexão sonora (Reflex).

Algumas variáveis apresentaram correlações negativas relevantes. A densidade aparente correlacionou-se negativamente com o isolamento em decibéis (-0,44), o que significa que, quanto maior a densidade, menor a transmissão sonora através do painel, indicando melhor barreira e isolamento acústico. A resistência à tração apresentou relação inversa com o inchamento (-0,70) e com o teor de umidade (-0,72), sugerindo que o aumento da instabilidade higroscópica prejudica diretamente o desempenho mecânico. A reflexão também apresentou correlação negativa significativa com o teor de umidade (-0,88), o inchamento (-0,78) e a absorção de água (-0,54), confirmando que, quanto maior a absorção e a variação dimensional, menor a reflexão sonora. Em contrapartida, as variáveis ligadas à higroscopicidade correlacionaram-se positivamente entre si: a absorção associou-se ao isolamento acústico (0,66) e ao inchamento (0,59), evidenciando que painéis mais porosos tendem a absorver mais água e, simultaneamente, apresentar menor isolamento acústico.

4. Conclusões

A adição de nanocelulose liofilizada apresentou efeito significativo e positivo sobre as propriedades físico-mecânicas dos painéis aglomerados produzidos com partículas de *Eucalyptus* e casca de pequi.

O tratamento T2N (2,5%) destacou-se como o mais eficiente, apresentando maior densidade aparente, redução significativa da absorção e do inchamento, além de maiores valores

de resistência mecânica e melhor isolamento acústico, configurando o melhor equilíbrio estrutural e dimensional entre os tratamentos avaliados.

Conclui-se, portanto, que a nanocelulose liofilizada é um aditivo eficiente para a melhoria das propriedades físicas e mecânicas de painéis aglomerados de eucalipto e casca de pequi, sendo a proporção de 2,5% a com melhor desempenho para as propriedades avaliadas.

5. Agradecimentos

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), à Universidade Federal do Tocantins (UFT) e ao Laboratório de Tecnologia e Utilização de Produtos Florestais I.

6. Referências bibliográficas

Ahmed, T., Wijesinghe, S., El-Gendy, M., Elshaer, A., Awayssa, O., Bediwy, A. (2026). Performance of Cementitious Composites with Nanofibrillated Cellulose and High-Volume Slag. Sustainability, 18(3), 1259, 2026. https://doi.org/10.3390/su18031259.

Arriaga, F. (2023). Mechanical properties of wood: A review. Forests, 14(6), 1202. https://www.mdpi.com/1999-4907/14/6/1202 .

Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT. (2013). NBR 14810-1: Painéis de partículas de madeira – Parte 1: Requisitos.

Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT. (2018). NBR 14810-2: Painéis de partículas de madeira – Parte 2: Requisitos e métodos de ensaio.

Ferreira, J. C. (2017). Sínteses de adesivos de ureia-formaldeído com adição de lignina Kraft e celulose nanocristalina (Tese de doutorado). Universidade Federal de Viçosa.

Indústria Brasileira de Árvores. (2024). Relatório anual 2024. Ibá. https://iba.org/datafiles/publicacoes/relatorios/relatorio2024.pdf

Matos, C. D. C.; Mendes, A. D. R.; Colen, F.; Santos, L. D. T.; Figueiredo, L. S.; Martins, E. R. (2018). Potencial fitotóxico do biofertilizante da casca de pequi (*Caryocar brasiliense* Comb.). Revista Cultura Agronômica, v. 27, n. 1, p. 160-172. https://doi.org/10.32929/2446-8355.2018v27n1p160-172 .

Santiago, N. M., Reis, E. A. P. (2021). Nanocelulose: Do entendimento às aplicações.

Hua, L. S., Wei Chen, L., Antov, P., Kristak, L., & Md Tahir, P. (2022). Engineering wood products from *Eucalyptus* spp. Advances in Materials Science and Engineering, 2022(1), 8000780. https://doi.org/10.1155/2022/8000780 .

Vieira, G. H. C.; Moraes, T. P. E.; Saraiva, K. F.; Marchesan, R. Lignina como agente de reforço em painéis produzidos com *Eucalyptus* spp. e casca de *Caryocar brasiliense* (pequi). DESAFIOS-Revista Interdisciplinar da Universidade Federal do Tocantins, v. 11, n. 3, 2024. https://doi.org/10.20873/2024_v3_18 .

YILDIRIM, Mert; CANDAN, Zeki. Performance Properties of Particleboard Panels Modified with Nanocellulose/Boric Acid. **BioResources**, v. 16, n. 1, 2021. https://doi.org/10.15376/biores.16.1.1875-1890 .

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Painéis aglomerados produzidos com resíduos do cultivo da cebola (*Allium cepa* L.)

Cesar Pinheiro Alves[1]; Jessia Micaele Gois de Sousa[1]; Silvano da Silva Lopes[1], Márcia Ellen Chagas dos Santos Couto[1], Juliana de Moura[1], Talita Dantas Pedrosa[1], Prosper Mensah[2], Rafael Rodolfo de Melo[1]

[1] Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Mossoró, RN, Brasil
[2] Forest Research Institute of Ghana, Kumasi, Ashanti, Ghana.

Resumo: O aproveitamento de resíduos agroindustriais para a produção de materiais lignocelulósicos representa uma estratégia promissora para a economia circular e o desenvolvimento de produtos sustentáveis. Neste sentido, o presente estudo avaliou a produção de painéis aglomerados utilizando a parte aérea da cebola (*Allium cepa*) como matéria-prima, alinhando-se à literatura sobre a valorização de resíduos agroindustriais e o uso de resinas vegetais de baixo impacto ambiental em painéis. Para produção dos painéis foram testados dois diferentes adesivos – o poliacetato de vinila (PVA); e o poliuretano a base do óleo da mamona. Os painéis foram produzidos por prensagem a frio e caracterizados quanto à densidade aparente, teor de umidade, absorção de água e inchamento em espessura, conforme os procedimentos da ABNT NBR 14810. O poliuretano demonstrou eficiência e resistência à umidade. Em contrapartida, o adesivo PVA levou ao colapso estrutural do compósito em contato com a água. Diante do desempenho favorável com a matriz de mamona, o material é sugerido para aplicações na marcenaria criativa, como objetos decorativos e móveis.
Palavras-chave: materiais renováveis; adesivo de mamona; marcenaria criativa.

Particleboards produced from onion cultivation (*Allium cepa* L.) residues

Abstract: The valorization of agro-industrial residues for the production of lignocellulosic composites represents a promising strategy to promote the circular economy and the development of sustainable materials. The study evaluated the production /of particleboards using the aerial parts of the onion (*Allium cepa*) as raw material, aligning with literature on the valorization of agro-industrial waste and the use of low-environmental-impact plant-based resins in panels. Two different adhesives were tested for panel production: polyvinyl acetate (PVA); and castor oil-based polyurethane. The panels were manufactured by cold pressing and characterized in terms of apparent density, moisture content, water absorption, and thickness swelling according to the procedures established by the Brazilian standard ABNT NBR 14810. The polyurethane demonstrated efficiency and moisture resistance. In contrast, the PVA adhesive led to the structural failure of the composite upon contact with water. Given the favorable performance with the castor oil-based matrix, the material is suggested for applications in creative woodworking, such as decorative objects and furniture.
Keywords: renewable materials; castor oil-based adhesive; creative woodworking.

1. Introdução

O crescimento populacional global e a crescente demanda por práticas ambientalmente sustentáveis têm impulsionado pesquisas voltadas ao desenvolvimento de novos materiais capazes de reduzir a dependência de florestas nativas e promover o aproveitamento de resíduos agrícolas e industriais em um modelo de economia circular (ZHANG et al., 2022).

Nesse contexto, a cebola (*Allium cepa*) destaca-se como uma das hortaliças mais cultivadas no Brasil, gerando uma quantidade significativa de resíduos agrícolas. Na maioria das vezes, esses resíduos são descartados de forma inadequada ou destinados à compostagem. No entanto, o aproveitamento da parte aérea da cebola para a produção de painéis aglomerados representa uma alternativa promissora para agregar valor a esse subproduto agrícola, ao mesmo tempo em que contribui para a redução dos impactos ambientais associados ao seu descarte inadequado (SHARMA et al., 2016).

Outro ponto científico relevante é a substituição de adesivos sintéticos à base de formaldeído, amplamente utilizados na indústria, por adesivos sustentáveis. A cola de mamona — um polímero derivado do óleo da mamona (*Ricinus communis* L.) — tem se destacado como uma alternativa ecológica de excelência. Este adesivo vegetal oferece vantagens como baixa toxicidade e elevada resistência à umidade, características que o tornam promissor para aplicações em ambientes internos e externos.

Diante desse cenário, este trabalho teve como objetivo avaliar a viabilidade técnica da utilização da parte aérea da cebola como matéria-prima para a produção de painéis aglomerados, empregando dois tipos de adesivos (PVA e poliuretano à base de óleo de mamona), visando contribuir para o aproveitamento de resíduos agroindustriais e o desenvolvimento de materiais mais sustentáveis

2. Material e métodos

2.1 Matéria Prima

Foram utilizadas partes aéreas de cebola da espécie *Allium cepa* L., compostas pelo pseudocaule e folhas, provenientes de resíduos agrícolas da região de Mossoró-RN. O processamento inicial consistiu na secagem prévia do material ao ar livre, seguida da classificação granulométrica em duas frações granulométricas. Os fragmentos maiores, com aproximadamente 2 cm de comprimento, foram destinados à formação da camada interna (miolo) dos painéis. As partículas finas, com granulometria entre 0,42 a 1,18 mm, foram obtidas

por trituração em moinho de facas e classificadas por peneiras em malhas de 16-40 mehs, utilizadas na formação das camadas superficiais (faces).

A consolidação dos painéis foi realizada por meio da aglutinação das partículas utilizando dois tipos de adesivos poliméricos: o poliacetato de vinila (PVA), adesivo comercial sintético de dispersão aquosa; e o uma bioresina de mamona, um adesivo de poliuretano bicomponente derivado do óleo de mamona. A estrutura do painel foi composta por três camadas, na proporção de mássica de 1:2:1 (face: miolo: face), sendo a camada interna correspondente ao dobro da massa de uma das camadas externa. Para a confecção de cada painel, com massa total de 1.400 g, foi aplicada 20% de adesivo em relação à massa seca de partículas, distribuído proporcionalmente entre as respectivas camadas (Figura 1). Em seguida, realizou-se a homogeneização manual da mistura, visando garantir a distribuição uniforme do adesivo sobre as partículas.

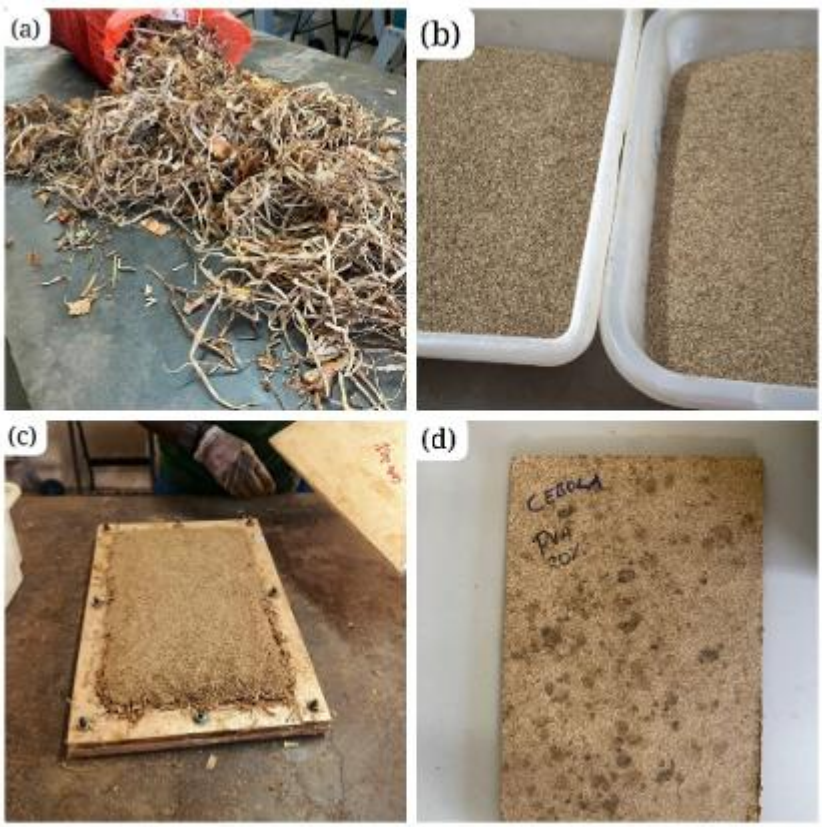


Figura 1. (a) parte área da cebola (*Allium cepa*); (b) partículas em 16-40 mesh; (c) colchão do painel acoplado; (d) painel finalizado.

Na sequência, o colchão de partículas foi submetido à prensagem a frio em uma prensa hidráulica manual, aplicando-se uma carga estática de 9 t durante72 horas à temperatura

ambiente. Esse procedimento promoveu a consolidação estrutural dos painéis e a completa cura dos adesivos.

2.2. Caracterização Física dos Painéis

A densidade aparente foi determinada através da razão entre a massa e o volume do painel. Para a determinação do volume, foram retiradas de cada painel cinco corpos de prova, com dimensões de aproximadamente 50 mm x 50 mm. Utilizou-se um paquímetro digital para mensurar a largura, o comprimento e a espessura de cada amostra. Para a determinação da massa, foi utilizada uma balança de precisão. A densidade foi determina conforme a Equação 1, seguindo as recomendações da NBR 14810-2 (ABNT, 2018).

$$Dp = \frac{m}{v} \qquad \text{(Equação 1)}$$

Em que:
Dp = densidade aparente, em g/cm^3;
m = massa, em g;
v= volume, em cm^3.

A determinação do teor de umidade seguiu as diretrizes da norma brasileira NBR 14810-2 (ABNT, 2018). Para esse ensaio, foram utilizados corpos de prova com dimensões de 50 mm x 50 mm, utilizando-se cinco repetições por painel. As mesmas amostras utilizadas na determinação da densidade aparente foram aproveitadas para esta análise. Os corpos de prova foram acondicionados em uma estufa com circulação forçada de ar, mantida à temperatura de 105 ± 2 °C, por 24 horas. Após o período de secagem, as amostras foram pesadas novamente para a obtenção da massa seca absoluta. O teor de umidade (TU) foi calculado de acordo com a Equação 2.

$$TU\,(\%) = \left(\frac{Mu - Ms}{Ms}\right) \times 100 \qquad \text{(Equação 2)}$$

Em que:
TU = teor de umidade, em %;
Mu = massa úmida do corpo de prova antes da secagem em estufa, em g;
Ms = massa seca do corpo de prova após a secagem em estufa, em g.

O ensaio de absorção de água foi realizado conforme os procediemntos descritos pela norma NBR 14810-2 (ABNT, 2018). Foram utilizados corpos de prova com dimensões de 50 x 50 mm, utilizando-se cinco repetições por painel. Determinou-se a massa inicial de cada corpo de prova em uma balança de precisão. Em seguida, as amostras foram imersas em água e novamente pesadas após 2 horas e após 24 horas de imersão em água. Os cálculos de absorção de água foram calculados conforme a Equação 3:

$$AA(\%) = \left(\frac{Mf - Mi}{Mi}\right) \times 100 \qquad \text{(Equação 3)}$$

Em que:
AA = Absorção de água, em %;
Mf = Massa final do corpo de prova após o respectivo tempo de imersão, em g;
Mi = Massa inicial do corpo de prova seco, em g.

Para determinar o inchamento em espessura, foram utilizadas cinco repetições de cada painel, com dimensões de aproximadamente 50 x 50 mm por corpo de prova. As espessuras foram medidas com o auxílio de um paquímetro digital em quatro pontos distintos de cada corpo de prova. As medições foram realizadas antes da imersão em água, após 2 horas de imersão e após 24 horas de imersão. O cálculo do inchamento foi realizado com base nas diretrizes da norma NBR 14810-2 (ABNT, 2018), utilizando a Equação 4.

$$IE(\%) = \left(\frac{Ef - Ei}{Ei}\right) \times 100 \qquad \text{(Equação 4)}$$

Em que:
IE = Inchamento em espessura, em %;
Ef = Espessura final após a imersão, em mm;
Ei = Espessura inicial antes da imersão, em mm.

A Figura 2 ilustra as etapas do processo de produção e caracterização dos painéis aglomerados produzidos a partir de resíduos do cultivo de cebola (*Allium cepa* L.).

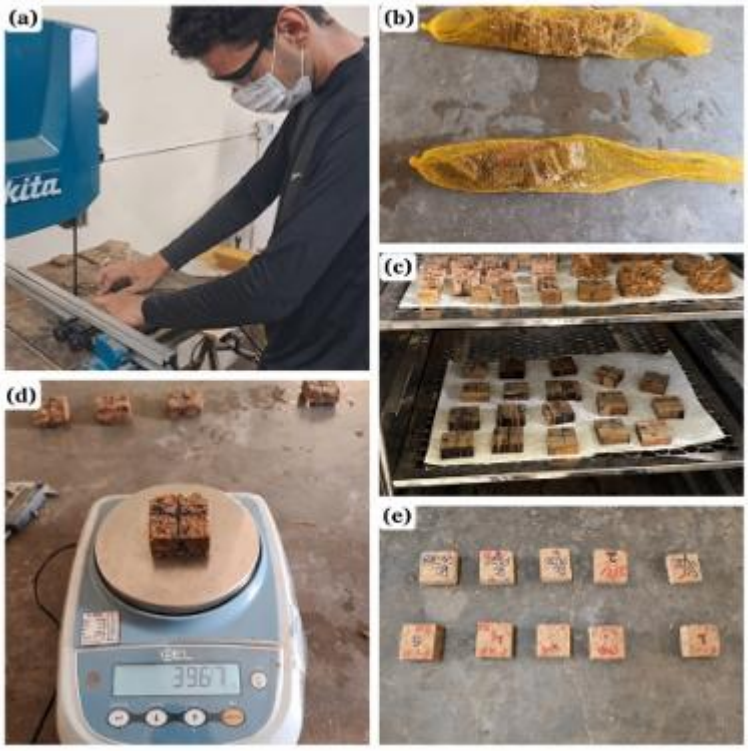


Figura 2. (a) corte das amostras; (b) amostras sob imersão 24h; (c) estufas a 103º C; (d) peso das amostras úmidas; (e) amostras secas.

Os resultados obtidos foram tabulados e submetidos à análise estatística. O desempenho físico e qualitativo dos painéis foi avaliado com base nas médias amostrais e no comportamento das propriedades em contato com a água, em conjunto com a análise de variância (ANOVA).

3. Resultados e discussão

Os valores médios das propriedades físicas avaliadas nos painéis aglomerados, para os tratamentos com resina de mamona e adesivo PVA estão apresentados na Figura 3. Observa-se, de forma qualitativa, que a resina de mamona, em razão da sua natureza hidrofóbica, forma uma barreira que protege as partículas de cebola da penetração de água. Em contrapartida, o adesivo PVA, por ser solúvel em água, não proporcionou essa proteção, resultando no desmanche das fibras e na perda de integridade estrutural do compósito.

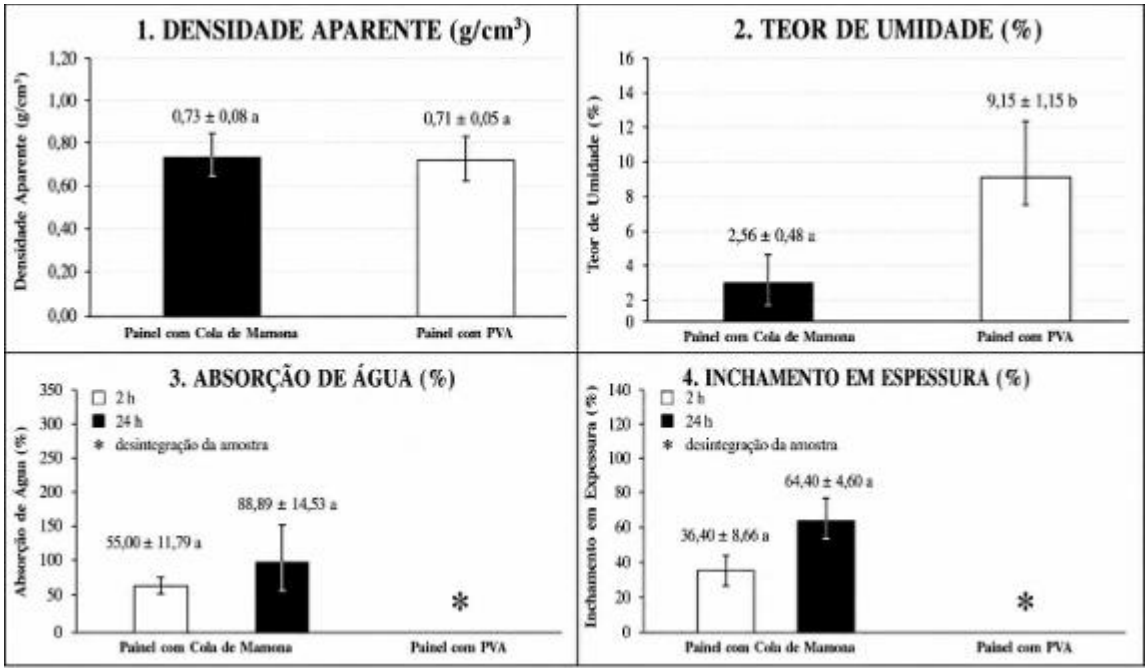


Figura 3. Propriedades físicas dos painéis aglomerados de cebola com diferentes adesivos.

A densidade aparente dos painéis variou entre 0,71 e 0,73 g/cm³, classificando-os estritamente como painéis de média densidade (acima de 0,55 e até 0,75 g/cm³), característica adequada para a aplicação na indústria moveleira. Não houve diferença estatística significativa entre as densidades aparentes dos painéis produzidos com os dois adesivos avaliados.

O teor de umidade do painel fabricado com poliuretano à base de mamona apresentou valor inferior ao limite tradicional (2,56%), demonstrando a sua natureza hidrofóbica em equilíbrio com a umidade do ar. Entretanto, embora o painel produzido com o adesivo PVA tenha apresentado teor de umidade superior (9,15%), esse valor encontra-se dentro da faixa estabelecida para painéis aglomerados convencionais (entre 6% e 10%), assegurando boa estabilidade dimensional antes do contato direto com a água líquida.

O ensaio de imersão revelou dados críticos para a aplicabilidade tecnológica dos painéis. Os valores de inchamento em espessura para os painéis produzidos com PVA situaram-se acima dos limites estabelecidos pela norma NBR 14810 para uso em ambientes internos (ABNT, 2018). Além disso, não foi possível a determinar os valores reais desta propriedade após a imersão, devido a completa desintegração do compósito. A elevada solubilidade do PVA, caracterizado como uma resina termoplástica de dispersão aquosa, promoveu a dissolução da linha de cola, culminando na perda de coesão e desagregação das amostras, impossibilitando de realizar as medições do inchamento em espessura.

Em contrapartida, os painéis produzidos com poliuretano de mamona mantiveram a sua integridade, apresentando um inchamento em espessura de 64,4%. Este valor indica um comportamento estável e uma notável resistência mecânica da interface de colagem frente ao colapso sofrido pelo PVA. Porém esse valor se encontra acima do limite comercial estabelecido pela norma NBR 14810, onde estabelece que painéis aglomerados podem indicar até 30% de inchamento em espessura após 24 horas.

Os resultados apontam o uso potencial de resíduos agrícolas e adesivo de Poliuretano de mamona para a produção de painéis com propriedades técnicas adequadas, embora apresentem limitações dimensionais que podem ser superadas em estudos futuros com ajustes no processo produtivo e no desenvolvimento de novas formulações.

4. Conclusões

A produção de painéis aglomerados utilizando a parte aérea da cebola como matéria-prima é tecnicamente viável. O emprego deste resíduo agroindustrial com a resina vegetal para a obtenção de compósitos possui aplicabilidade promissora e menor impacto ambiental.

Enquanto o adesivo PVA mostrou-se inadequado para essa formulação, levando ao colapso estrutural e à desagregação do painel em contato com a água, os painéis produzidos com a cola de mamona apresentaram uma resistência à umidade significativamente superior. Essa matriz desponta como uma alternativa sustentável e eficiente, qualificando os compósitos de cebola para o desenvolvimento de objetos de decoração, móveis de pequeno porte e protótipos inseridos no contexto da marcenaria criativa.

5. Referências bibliográficas

Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2018). *NBR 14810-1: Chapas de madeira aglomerada – Parte 1: Terminologia*. ABNT.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2018). *NBR 14810-2: Chapas de partículas de média densidade – Parte 2: Requisitos e métodos de ensaio*. ABNT.

Gonçalves, D., Bordado, J. M., Marques, A. C., & Dos Santos, R. G. (2021). Non-formaldehyde, bio-based adhesives for use in wood-based panel manufacturing industry: A review. *Polymers, 13*(23), 4086. https://doi.org/10.3390/polym13234086

Messetti, M. A., Santos, A. M., Angelis, D. F., Chierice, G. O., & Claro Neto, S. (2010). Estudo do derivado do óleo de *Ricinus communis* L. (mamona) como agente biocida e redutor da viscosidade produzida por *Leuconostoc mesenteroides* em indústrias sucroalcooleiras.

Arquivos do Instituto Biológico, 77(2), 301–308. https://doi.org/10.1590/1808-1657v77p3012010

Rahman, M. A., Haque, S., Athikesavan, M. M., & Kamaludeen, M. B. (2023). A review of environmentally friendly green composites: Production methods, current progress, and challenges. *Environmental Science and Pollution Research, 30*(7), 16905–16929. https://doi.org/10.1007/s11356-022-24879-5

Sharma, K., Mahato, N., Nile, S. H., Lee, E. T., & Lee, Y. R. (2016). Economical and environmentally-friendly approaches for usage of onion (*Allium cepa* L.) waste. *Food & Function, 7*(8), 3354–3369. https://doi.org/10.1039/C6FO00251J

Zhang, Z., Malik, M. Z., Khan, A., Ali, N., Malik, S., & Bilal, M. (2022). Environmental impacts of hazardous waste, and management strategies to reconcile circular economy and eco-sustainability. *Science of the Total Environment, 807*(Part 2), 150856. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150856

764. Painéis de resíduos madeireiros para objeto sustentável

Ana Victoria Moreno Serrate[1]; André Christian Keinert[1]; Vinícius Monteiro santos de Almeida; Ugo Leandro Belini[1]

[1] Universidade tecnológica Federal do Paraná (UTFPR)

Resumo: Este trabalho propõe o desenvolvimento de um carrinho de bebidas fabricado a partir de madeira reutilizada de Cambará (*Gochnatia* spp) e com revestimento em material compósito, voltado para o uso em espaços reduzidos e pautado nos princípios da sustentabilidade e reaproveitamento de materiais lignocelulósicos. O projeto tem como objetivo principal criar um produto funcional, leve, resistente e ecologicamente consciente, que promova uma experiência de uso eficiente e confortável. A pesquisa envolve o estudo do processo de fabricação de materiais biocompósitos no Brasil, análise de perfil de usuários e suas necessidades, além da prototipagem e validação do produto final. A metodologia de projeto adotada segue os princípios de Bernd Löbach, passando pelas etapas de análise, geração, avaliação e realização. A proposta visa atender às demandas contemporâneas de consumo consciente e otimização de espaços, unindo inovação estética e funcional à responsabilidade ambiental em um protótipo de carrinho de bebidas, fabricado com biocompósitos e madeira residual de cambará.

Palavras-chave: Novos produtos, madeira de cambará, biocompósitos.

765. Wood waste panel for sustainable product

Abstract: This project proposes the development of a beverage cart made from recycled wood of de Cambará (*Gochnatia* spp) and coated with composite material, designed for use in small spaces and based on the principles of sustainability. The main objective is to create a functional, lightweight, durable, and environmentally conscious product that enhances the user experience through comfort and usability. The research explores the manufacturing process of composite materials in Brazil, analyzes the target users and their needs, and includes the prototyping and validation of the final product. The design methodology follows Bernd Löbach's approach, encompassing the phases of analysis, creation, evaluation, and implementation. This project addresses current demands for conscious consumption and

space optimization, combining functional and aesthetic innovation with environmental responsibility.

Keywords: New product, cambará wood, biocomposite.

1. Introdução

O crescimento desenfreado das cidades e a mudança da vida urbana estão cada vez afetando o nosso modo de viver. Nesse contexto, percebe-se uma redução significativa nos espaços residenciais, tanto em casas quanto em apartamentos, revelando uma tendência crescente que reflete um novo padrão de moradia no cenário contemporâneo. Segundo o blog da Axis 21 (2022), a tendência de apartamentos cada vez menores está diretamente ligada às novas exigências do estilo de vida urbano e às mudanças no mercado imobiliário.

A escolha de habitações pequenas não é apenas efeito do poder aquisitivo ou da capacidade de pagamento de aluguel, ou do consumo de energia, mas cada vez mais é uma escolha pessoal relacionada ao menor impacto ambiental, ou ao menor esforço de manutenção, limpeza ou custo de mobiliário. Neste cenário, surge a preocupação por encontrar soluções funcionais, compactas e sustentáveis que se adequem às limitações físicas dos espaços que habitamos.

Neste contexto, o presente trabalho propõe o desenvolvimento de um produto móvel para armazenamento e transporte de bebidas pensado para ambientes com metragem reduzida, utilizando sobras particuladas e maçica da madeira de Cambará (*Gochnatia* spp), que é amplamente utilizada na construção civil e na fabricação de móveis devido ao seu excelente custo-benefício, boa resistência mecânica e facilidade de manuseio. Ainda, a proposta procura testar funcionalidade, conforto e estética, por meio de soluções que

atendam o comportamento do usuário e a responsabilidade ambiental, sendo explorado o material compósito e a madeira reciclada como base para um projeto inovador.

O produto final busca ser versátil o suficiente para atender residências ou estabelecimentos comerciais, como cafés e bares. Para lograr cumprir com esses requisitos, serão analisados os possíveis usuários de dito produto, assim como os desafios enfrentados por estes em cenários reduzidos. Tendo essas informações, será feita uma análise de similares para ter melhor noção dos produtos comercializados. Com isto, serão desenvolvidas propostas estruturais e um protótipo físico para poder testar a viabilidade de dito produto.

Deste modo, o projeto proposto está alinhado com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável no Brasil (ODS) de acordo com a Organização das Nações Unidas (ONU, 2025), principalmente no que se refere a três dos objetivos do ODS. Primeiramente, o ODS 9, que trata da Indústria, Inovação e Infraestrutura, e é contemplado por meio da aplicação de materiais alternativos e compósitos sustentáveis, promovendo a inovação e desenvolvimento de soluções mais ecológicas. O ODS 11, que é voltado para Cidades e Comunidades Sustentáveis, considera o mobiliário adaptado aos espaços em que vivemos e contribui para ambientes urbanos mais funcionais. Por fim, o ODS 12, que aborda Consumo e Produção Responsáveis, que integra a escolha de materiais renováveis, estratégias de reaproveitamento e práticas de produção manual que reduzem o impacto ambiental.

Este projeto também tem impacto social ao promover soluções criativas para necessidades práticas em espaços restritos, como em eventos e residências urbanas. A minha maior motivação é ter a oportunidade de criar algo que seja diferente, fora do comum, funcional e competitivo no mercado. Assim, fazer de algo cotidiano como o consumo de bebidas (café, chás e drinks especiais), uma experiência que possa ser levada ao conforto do seu lar e sem atrapalhar o espaço.

Com isto, a proposta busca unificar inovação e tradição por meio da valorização de materiais locais e através do design brasileiro contemporâneo. Ao fundir técnicas artesanais com soluções modernas e sustentáveis, o projeto visa refletir uma identidade autêntica, com um olhar abrangente para o mobiliário contemporâneo.

2. Material e métodos

A madeira de Cambará (*Gochnatia* spp) foi obtida através de sobras de projetos desenvolvidos internamente à UTFPR-Curitiba, em material particulado para obtenção dos bioocmpósitos e em madeira maçica para a confecção da estrutura do carrinho de bebidas.

Para confecção dos biocompósitos de madeira residual de cambará, foram utilizadas partículas residuais obtidas após processo de corte da madeira, e posteriormente foram aglutinadas com resina PU mamona em proporção 30% resina/fibra (Silva e Belini, 2024). O colchão de partículas, separados em peneira de abertura 2,0 mm, foi inserido em prensa hidráulica aquecida utilizando ciclo de prensagem: 10 mim, 3 t e 100ºC, conforme descrito em Rosa Silva (2025). . Os painéis foram obtidos com dimensões finais de 6,0 x 180 x 180 mm, sendo posteriormente seccionados em amostras, formato pastilhas, de 50 x 50 mm para revestimento das prateleiras do protótipo.

A metodologia de projeto de design a ser adotada para a execução do carrinho de bebidas em material compósito será baseada na abordagem de Bernd Löbach (2001), a qual traz um foco na integração de quatro etapas: análise, geração, avaliação e realização.

O processo será dividido em etapas adaptadas ao projeto, para garantir que os objetivos, tais como a análise dos usuários, processos de fabricação e geração de alternativas através de protótipos que cumpram com a sequência da metodologia e sejam atendidos de maneira integral.

Na primeira fase, a análise, será feita uma análise do problema e pesquisa de produtos similares no mercado, junto com a definição do público alvo. Após essa análise, será feita uma estruturação das funções vitais do móvel. Por último, será analisado o material a utilizar e a sua complexidade para seu bom funcionamento.

Na segunda etapa da metodologia, serão feitas diferentes gerações de alternativas para abordar o problema de pesquisa, sem limitações e permitindo as ideias fluírem. Esta fase permite produzir ideias baseadas na análise realizada anteriormente (Löbach, p.150)..

Posteriormente, a solução escolhida é aquela que cumpre os critérios anteriormente estabelecidos. Na última etapa desta metodologia, será materializada a melhor solução

escolhida na avaliação de alternativas, juntamente de um protótipo, desenho técnico e modelo 3D, requisitos essenciais para a elaboração do produto final, bem como a análise de potenciais usuários, obtifas através de entrevista via questionario de 25 morados de apartamentos com metragem total de 28 m² da região central de Curitiba-PR.

Para fabricação do carrinho de bebidas, foi utilizada estrutura em madeira maçisa de cambará e revestimento das prateleiras com os biocompósitos obtidos.

3. Resultados e discussão

3.1. Análise da resposta dos potenciais usuários

A análise de usuários por meio de um questionário quantitativo sobre informações gerais de pessoas que moram em espaços compactos, visando entender os hábitos, necessidades e preferências do público-alvo. Tal análise permitiu consolidar e reforçar a compreensão do perfil dos potenciais usuários e entender as suas vontades e dores, ajudando desta forma no direcionamento do projeto.

A maioria dos respondentes (55%) encontra-se na faixa etária de 20 a 24 anos, seguida por 27% com idades entre 25 e 30 anos, evidenciando o perfil jovem da amostra. Quanto ao domicílio, a maioria dos entrevistados mora sozinho ou com amigos em apartamentos ou kitnets de até 45 m². Esses dados reforçam tendência de morar em residências compactas, cenário que tem se tornado mais comum no contexto urbano atual.

Com efeito, as dificuldades mais recorrentes enfrentadas nesses espaços foram a falta de lugar para armazenar objetos (91% dos participantes) e a dificuldade de organização (64%), seguidas por menções à falta de mobilidade entre móveis relacionadas à desproporção do espaço. Esses resultados apontam a uma falta de soluções funcionais adaptadas às limitações físicas do ambiente. No que se refere aos hábitos de uso, a maioria dos participantes (72%) relatou servir frequentemente bebidas em casa, enquanto outros 18% afirmaram fazê-lo ocasionalmente.

Quando questionados sobre a ausência de um móvel ou suporte específico, quase todos os respondentes (91%) declararam sentir falta por um item de com essas qualidades. A

respeito das preferências funcionais para um possível móvel de apoio, os aspectos mais recorrentes foram: • Ser compacto (73%) • Ter compartimentos específicos (73%) • Possuir rodas e facilidade de movimentação (45%) • Apresentar funcionalidades adicionais além de servir bebidas (36%).

Tais dados indicam que o produto desenvolvido deve ser versátil, de fácil deslocamento, e atender à demanda por organização para esses ambientes. A análise também aponta para a valorização de soluções práticas e funcionais, características essências para o cotidiano dos usuários em questão. Dessa maneira, os resultados do questionário forneceram uma base para a definição de requisitos do projeto, abrindo diretrizes para o desenvolvimento do projeto.

3.2. Protótipo obtido

A possibilidade de confecção de um carrinho de bebida com estrutura em madeira de cambará e revestimento das prateleiras com biocompósitos foi bastante factível.

Ainda, o projeto foi capaz de proporcionar soluções inteligentes enquanto a limitações espaciais, sem comprometer a sua funcionalidade. Com isto, busca-se fomentar práticas de consumo conscientes e inspirar novas formas de pensar sobre o biocompósitos e novos produtos no contexto urbano em que vivemos hoje. Em virtude de essas questões, e com a aplicação do apelo estético e sustentável, espera se que o carrinho apresente potencial para inserção no mercado, voltado à comercialização em lojas ou restaurantes, bem como feiras de design voltadas a produtos autorais.

A Figura 1 ilustra o biocompósito obtido e protótipo final do carrinho de bebidas.



Figura 1: biocompósito obtidos e protótipo de carrinho de bebida fabricado com madeira de cambará e revestido com biocompósitos nas prateleiras.

3.3 Simulação de viabilidade espacial

Com o intuito de simular uma situação de uso tangível, o móvel foi inserido num apartamento de 28 m², metragem comumente encontrada em unidades residenciais compactas. A escolha permitiu conferir sua adequação a espaços residenciais de dimensões reduzidas, conforme Figura 2. Neste item, que também versa sobre a inclusão mercadológica do protótipo, os resultados obtidos foram satisfatórios uma vez que o móvel não interferiu na circulação entre o corredor e a mesa de jantar, mesmo sendo inserido de maneira horizontal quanto vertical, comprovando sua viabilidade funcional e ergonômica para esse tipo de moradia.

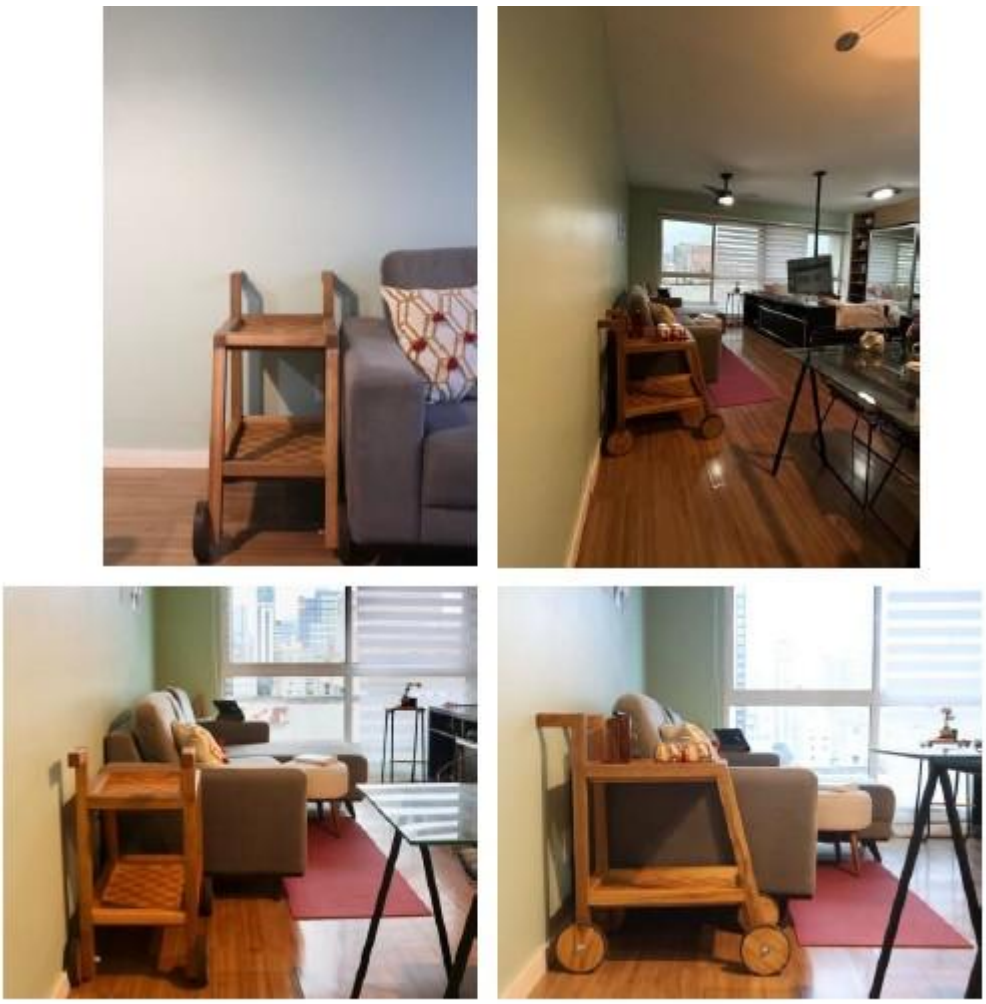


Figura 2: simulação da viabilidade especial do protótipo em um apartamento de 28 m².

4. Conclusões

A madeira maçica de Cambará, residual, bem como os biocompósitos obtidos com partículas residuais em granulometria 2,0mm, foram efetivos para utilização na fabricação e revestimento de protótipo de carrinho de bebida.

O protótipo obtido e sua concepção levou em conta pesquisa com usuário residente em apartamentos de até 40 m², onde evidencia-se a necessidade e anseio de objetos adaptáveis, de pequeno tamanho a alinhado à questões de sustentabilidade.

5. Agradecimentos

Os autores agradecem a Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), o Laboratório de Materiais e tecnologias Sustentáveis (LabMaTS), a Kehl Polímeros e os Programas de Pós Graduação em Sustentabilidade Ambiental Urbana (PPGSAU) e Design Prospectivo (PPGDP)

6. Referências bibliográficas

AXIS 21. Apartamentos menores: uma nova tendência no mercado imobiliário. 2022. Disponível em: https://www.axis21.com.br/blog/apartamentos-menores-uma nova-tendencia-no-mercado-imobiliario. Acesso em: 24 abr. 2025.

LÖBACH, Bernd. Design industrial: bases para a configuração dos produtos industriais. São Paulo: E. Blücher, 2001.

ONU BRASIL. Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS). Disponível em: https://brasil.un.org/pt-br/sdgs. Acesso em: 29 maio 2025.

SILVA, I.C; BELINI, U,L. REINVENTE: COMPÓSITO SUSTENTÁVEL PARA EMBALAGEM : REINVENT: A PROJECT COMPOSITE SUSTAINABLE. (2024). *MIX Sustentável*, *10*(3), 231-242. https://doi.org/10.29183/2447-3073.MIX2024.v10.n3.231-242

SILVA, Igor César Rosa; Belini, Ugo Leandro. Piassava as a product with greater added value: perspectives for design. MIX SUSTENTÁVEL (online), v. 11, p. 189-204, 2025.

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Painéis laminados de bambu (*Dendrocalamus asper*) produzidos com diferentes gramaturas de adesivo PVA

Cesar Pinheiro Alves[1]; Jessia Micaele Gois de Sousa[1]; Silvano da Silva Lopes[1], Márcia Ellen Chagas dos Santos Couto[1], Juliana de Moura[1], Fernando Rusch[2], Prosper Mensah[3], Rafael Rodolfo de Melo[1]

[1] Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Mossoró, RN, Brasil
[2] Universidade Federal do Oeste do Pará, Santarém, PA, Brasil.
[3] Forest Research Institute of Ghana, Kumasi, Ashanti, Ghana.

Resumo: O presente estudo avaliou a influência de diferentes gramaturas de adesivo PVA nas propriedades físicas de painéis laminados produzidos com bambu (*Dendrocalamus asper* (Schult.) Backer). Para isso, as lâminas de bambu foram coladas com Acetato de Polivinila (PVA) e submetidas à prensagem a frio por 72 horas, sendo utilizadas três diferentes gramaturas do adesivo – 150, 200 e 250 g/m^2. Foram realizados ensaios físicos para determinar a densidade aparente, teor de umidade, absorção de água e inchamento em espessura. Os resultados indicaram uma tendência de aumento na densidade, na absorção de água e no inchamento em espessura conforme a elevação da gramatura da resina, o que é atribuído à natureza de dispersão aquosa do PVA. Contudo, a análise estatística demonstrou que essas variações não são significativas. Conclui-se que a produção dos painéis é tecnicamente viável, porém, o uso de maiores quantidades de cola não se justifica, já que não promoveu melhorias físicas ou de estabilidade dimensional significativas.
Palavras-chave: propriedades físicas; sustentabilidade; material renovável.

Laminated Bamboo Panels (*Dendrocalamus asper*) Produced with Different PVA Adhesive Contents

Abstract: This study evaluated the influence of different PVA adhesive contents on the physical properties of laminated panels made from bamboo (*Dendrocalamus asper* (Schult.) Backer). To this end, bamboo laminae were bonded with polyvinyl acetate (PVA) and then cold-pressed for 72 hours, with three different adhesive rates being used – 150, 200, and 250 g/m². Physical tests were conducted to determine apparent density, moisture content, water absorption, and thickness swelling. The results indicated a trend of increasing density, water absorption, and thickness swelling as the resin spread rate increased—a phenomenon attributed to the aqueous dispersion nature of PVA. However, statistical analysis demonstrated that these variations were not significant. It is concluded that panel production is technically feasible; however, the use of higher adhesive quantities is not justified, as it did not yield significant improvements in physical properties or dimensional stability.
Keywords: physical properties; sustainability; renewable material.

1 Introdução

Com o crescente avanço populacional e a preocupação com o aumento da demanda por matérias-primas torna-se cada vez mais necessário o estudo de materiais sustentáveis, buscando alternativas aos recursos não renováveis em prol de uma transição sustentável. Sendo assim, surgem os painéis laminados de bambu como uma proposta tecnológica proeminente. Por se tratar de uma gramínea de rápido crescimento vegetal, com colmo altamente lignificado e densidade média, configura-se como uma ótima alternativa, apresentando potencial para reduzir a pressão exploratória sobre espécies madeireiras nativas e mitigar emissões de carbono na atmosfera (Rahman *et al.*, 2023).

Apesar de suas excelentes propriedades mecânicas intrínsecas, o bambu, assim como outras biomassas, apresenta caráter higroscópico marcante. A interação da parede celular com a umidade do ambiente resulta em instabilidade dimensional (inchamento e contração), o que se configura como um fator limitante para a aplicação desses compósitos em ambientes expostos a variações higroscópicas (Rusch, 2021). O desempenho físico dos painéis laminados depende criticamente da espécie utilizada, da densidade do material e da eficiência da linha de cola (matriz polimérica), a qual atua como superfície de adesão adquirindo características de acordo com suas propriedades (Teixeira *et al.*, 2015).

A qualidade dos painéis laminados depende de diversos fatores, entre eles a espécie de bambu, o processo de laminação, a pressão aplicada e, principalmente, o tipo e a quantidade de adesivo utilizado. O adesivo PVA (Acetato de Polivinila) é um polímero de dispersão aquosa amplamente utilizado na indústria de painéis de madeira e bambu por apresentar fácil aplicação, cura à temperatura ambiente e viabilidade econômica. No entanto, a quantidade de adesivo aplicada (gramatura) é um parâmetro crítico e limitante que influencia diretamente a interface de colagem e as propriedades do painel, além de impactar de forma expressiva o custo de produção.

Diante da natureza hidrofílica tanto do bambu quanto das resinas à base de PVA, a determinação da dosagem ótima do adesivo torna-se indispensável para mitigar os efeitos da higroscopicidade. Uma subdosagem na linha de cola resulta em falhas de adesão e caminhos preferenciais para a percolação de água, enquanto o excesso onera o processo produtivo e pode gerar linhas de cola espessas e frágeis. Neste contexto, este trabalho teve como objetivo avaliar a influência de diferentes gramaturas do adesivo PVA nas propriedades físicas de painéis laminados produzidos com bambu da espécie *Dendrocalamus asper*.

2 Material e Métodos

2.1 Preparo da Matéria-prima e Produção dos Painéis.

Foram utilizados colmos maduros de bambu da espécie *Dendrocalamus asper*. O processamento inicial abrangeu o desdobro dos colmos em taliscas e o posterior aplainamento manual para a remoção completa da epiderme externa (camada rica em sílica que prejudica a adesão) e do córtex interno, resultando em lâminas retangulares de faces regulares e padronizadas.

A consolidação dos painéis foi realizada por meio de laminação paralela utilizando o adesivo poliacetato de vinila (PVA). O adesivo foi distribuído de forma homogênea sobre as faces das lâminas. Na sequência, as camadas montadas foram submetidas ao processo de prensagem a frio em uma prensa manual (tipo grampo) por um período contínuo de 72 horas à temperatura ambiente, garantindo a adequada polimerização e cura da linha de cola (Figura 1). As gramaturas de adesivo utilizadas foram de 150 g/m^2, 200 g/m^2 e 250 g/m^2.



Figura 1. (a) Confecção das taliscas; (b) Aplainamento; (c) Aplicação da cola; (d) Prensa; (e)finalização dos cortes

2.3 Caracterização Física dos Painéis

Dos painéis produzidos foram retiradas amostras para caracterização dos ensaios físicos (Figura 2). A densidade aparente foi determinada através da razão entre a massa e o volume do painel. Para a determinação do volume, foram retiradas de cada painel cinco repetições (corpos de prova), com dimensões de aproximadamente 20 mm x 20 mm. Utilizou-se um paquímetro digital para mensurar a largura, o comprimento e a espessura de cada amostra. Para a determinação da massa, foi utilizada uma balança de precisão. A estimativa da densidade foi realizada por meio da Equação 1.

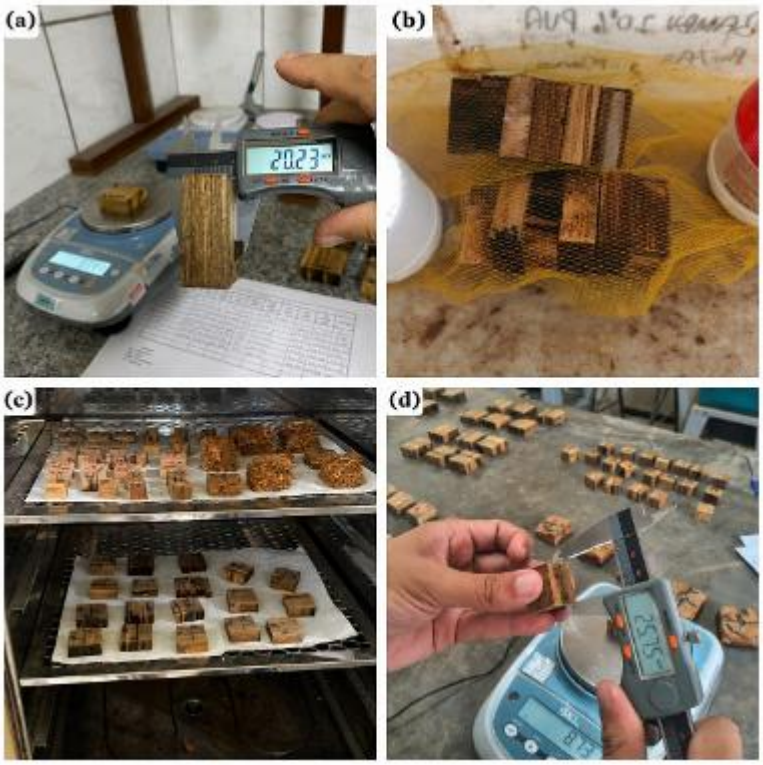


Figura 2. (a) medição das amostras ambiente; (b) imersão das amostras na água por 24h; (c) amostras nas estufas a 103º; (d) repetição das medições das amostras.

$$Dp = \frac{m}{v} \qquad \text{(Equação 1)}$$

Em que:
Dp = densidade aparente, em g/cm^3;
m = massa, em g;
v= volume, em cm^3.

A determinação do teor de umidade seguiu as diretrizes da NBR 14810-2 (ABNT, 2018). Para a realização deste ensaio, foram adotados corpos de prova com dimensões de 20 mm x 20 mm, utilizando-se cinco repetições para cada painel avaliado. As amostras foram acondicionadas em uma estufa com circulação forçada de ar, mantida a uma temperatura de 105 ± 2 °C, por um período de 24 horas. Após o ciclo de secagem, as amostras foram retiradas e pesadas novamente para a obtenção da massa seca absoluta. O teor de umidade (TU) foi calculado utilizando a Equação 2:

$$TU = \left(\frac{Mu - Ms}{Ms} \right) \times 100 \qquad \text{(Equação 2)}$$

Em que:
TU = teor de umidade, em %;
Mu = massa úmida do corpo de prova antes da secagem em estufa, em g;
Ms = massa seca do corpo de prova após a secagem em estufa, em g.

Para os testes de absorção de água, foram adotados corpos de prova com dimensões de 50 mm x 50 mm, utilizando-se cinco repetições para cada painel avaliado. Após a devida identificação das amostras, determinou-se a massa de cada corpo de prova em uma balança de precisão em três etapas temporais: antes da imersão, após 2 horas e após 24 horas de imersão em água. Os cálculos de absorção de água seguiram os preceitos estabelecidos pela norma brasileira NBR 14810-2 (ABNT, 2018), conforme descrito na Equação 3:

$$AA(\%) = \left(\frac{Mf - Mi}{Mi} \right) \times 100 \qquad \text{(Equação 3)}$$

Em que:
AA = Absorção de água, em %;
Mf = Massa final do corpo de prova após o respectivo tempo de imersão, em g;
Mi = Massa inicial do corpo de prova seco, em g.

Para determinar o inchamento em espessura, foram utilizadas cinco repetições de cada painel, com dimensões de aproximadamente 50 mm x 50 mm por corpo de prova. Após a identificação inicial das amostras, as espessuras foram marcadas e medidas com o auxílio de um paquímetro digital em quatro pontos distintos de cada corpo de prova. As medições ocorreram

em três momentos específicos: antes da imersão em água, após 2 horas de imersão e após 24 horas de imersão. O cálculo do inchamento foi realizado com base nas diretrizes da norma NBR 14810-2 (ABNT, 2018), utilizando-se a Equação 4:

$$IE(\%) = \left(\frac{Ef - Ei}{Ei} \right) \times 100 \qquad \text{(Equação 4)}$$

Em que:
IE = Inchamento em espessura, em %;
Ef = Espessura final após a imersão, em mm;
Ei = Espessura inicial antes da imersão, em mm.

Os resultados obtidos foram tabulados e a avaliação do comportamento físico baseou-se na análise das médias amostrais e de seus respectivos comportamentos em contato com a água, em conjunto com uma análise de variância (ANOVA).

3 Resultados e discussão

As diferentes gramaturas empregadas do adesivo PVA não influenciou significativamente as propriedades finais dos painéis laminados de bambu (Figura 3). A densidade aparente apresentou uma tendência de aumento com o incremento da quantidade de adesivo, o que é esperado, pois a resina líquida preenche os espaços anatômicos vazios entre as fibras e as lâminas de bambu, resultando em um painel final mais compacto e de maior massa.

A absorção de água e o inchamento em espessura apresentaram aumento com a elevação da gramatura de adesivo, variando de 24% (T1) para 26,20% (T3) na absorção, e de 2,84% (T1) para 3,85% (T3) no inchamento. Esse comportamento peculiar é atribuído à maior quantidade de adesivo que, por se tratar de um polímero de dispersão aquosa parcialmente solúvel e reativado em contato direto com o meio líquido, permite e facilita uma maior absorção de água na região da interface. Contudo, devido à fina espessura do tamanho da linha de cola em relação à proporção de massa de bambu, esses valores não se distinguem do ponto de vista estatístico.

Estudos anteriores com bambu também observaram que painéis colados com adesivos estruturais mais resistentes à água, como os fenólicos, apresentam menor inchamento (média de 8,4%) quando comparados aos colados com PVA (média de 14,4%). Isso corrobora o cenário avaliado, sugerindo que a resistência intrínseca à umidade do adesivo pode influenciar diretamente na absorção de água e nas suas respectivas interações higroscópicas com o meio (Bernado, 2003).

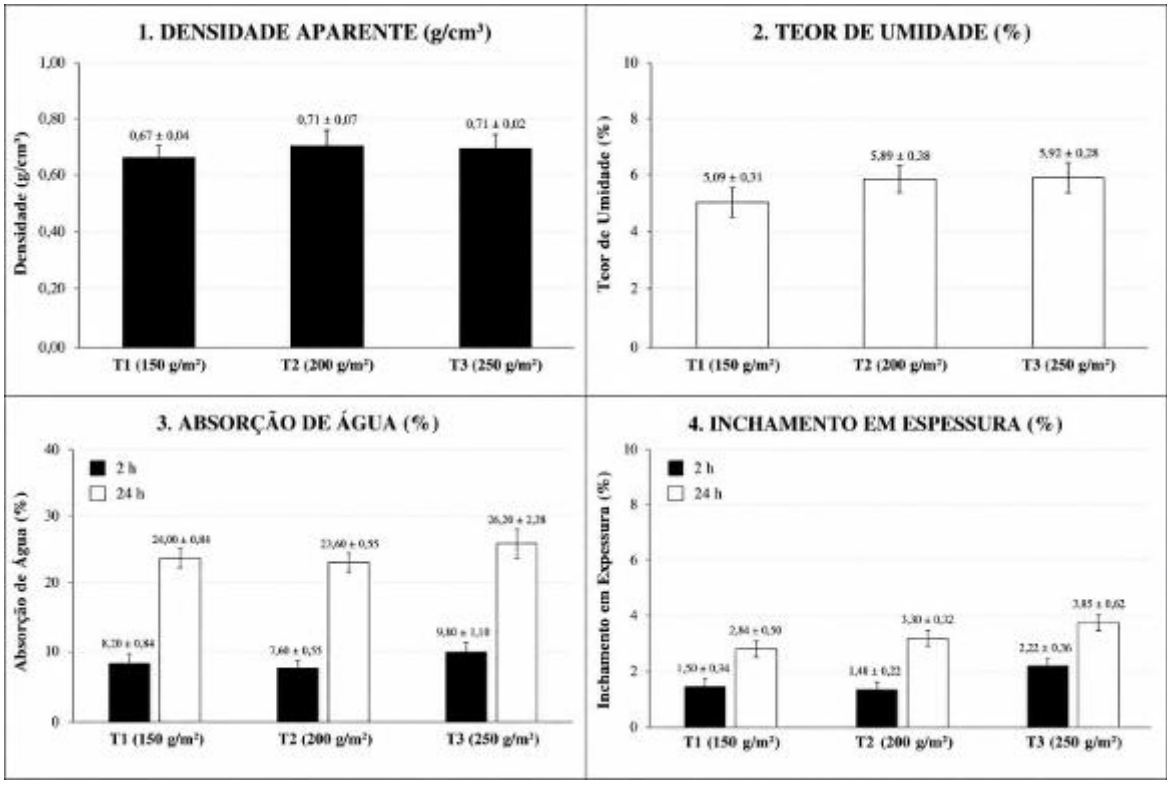


Figura 3. Propriedades físicas dos painéis laminados de bambu colados com diferentes gramaturas de adesivo PVA

O aumento da gramatura de adesivo implica em um maior custo de produção. Uma vez constatado pela análise estatística que os parâmetros físicos de estabilidade dimensional e densidade não apresentaram melhorias significativas com o acréscimo de resina, o investimento adicional na linha de cola não se justifica. Resultados semelhantes são validados na literatura técnica, onde uma gramatura de 160-200 g/m² é amplamente recomendada como a faixa ideal para colagens eficientes (Santos 2009).

O teor de umidade residual dos painéis variou entre 5% e 7%. Esses valores estão em conformidade com a faixa recomendada para painéis de aproximadamente 12% conforme NBR 14810-2 (ABNT, 2018), o que garante a estabilidade dimensional ideal para o produto acabado e confirma a adequação técnica do processo de secagem e montagem utilizado.

4 Conclusões

Com base nos ensaios físicos realizados e nas análises estatísticas e económicas discutidas, conclui-se que a produção de painéis laminados de bambu da espécie *Dendrocalamus asper* utilizando o adesivo poliacetato de vinila (PVA) em diferentes gramaturas é tecnicamente viável, apresentando características físicas e estabilidade dimensional adequadas para o desenvolvimento de compósitos sustentáveis.

Embora o comportamento físico diante da umidade tenha sido elucidado, recomenda-se a realização de estudos futuros com foco em ensaios mecânicos, em especial, testes de resistência ao cisalhamento da linha de cola e resistência a calor. Tais investigações são fundamentais para identificar de forma precisa se a quantidade de adesivo aplicada exerce influência direta sobre a resistência mecânica e a adesão na interface das lâminas de bambu.

5 Referências bibliográficas

Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2018). *NBR 14810-1: Chapas de madeira aglomerada – Parte 1: Terminologia*. ABNT.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2018). *NBR 14810-2: Chapas de partículas de média densidade – Parte 2: Requisitos e métodos de ensaio*. ABNT.

Becker, J. L. (2011). *Avaliação da resistência da linha de cola em painéis de madeira* (Trabalho de Conclusão de Curso). Universidade Federal do Paraná.

Bernado, A..; Rivero, L. A. **Bambu laminado colado (BLC)**. *Floresta e Ambiente*, Rio de Janeiro, v. 10, n. 2, p. 36–46, 2003. Disponível em: FLORAM – Bambu Laminado Colado (BLC).

Rahman, M. A., Haque, S., Athikesavan, M. M., & Kamaludeen, M. B. (2023). A review of environmentally friendly green composites: Production methods, current progress, and challenges. *Environmental Science and Pollution Research, 30*(7), 16905–16929. https://doi.org/10.1007/s11356-022-24879-5

Rusch, F. (2021). Propriedades físico-mecânicas de painéis laminados de bambu. *Ciência Florestal, 31*(4), 1765–1780.

Santos, E. F. dos, & Filho, J. M. (2009). Redução da variação de gramatura das fitas auto-adesivas durante a aplicação do adesivo. *Revista Ciências Exatas*, *15*(2). Recuperado de https://periodicos.unitau.br/exatas/article/view/856

Teixeira, D. E., Bastos, R. S., & Almeida, S. (2015). Characterization of glued laminated panels produced with strips of bamboo (*Guadua magna*) native from the Brazilian Cerrado. *CERNE, 21*(4), 595–600. https://doi.org/10.1590/01047760201521041893.

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Painéis OSB de *Schizolobium parahyba* var. *amazonicum*: estabilidade dimensional e redução do consumo de adesivo

Rafael Battisti Archer[1]; Natalia Durigon Melo[1]; Thâmara dos Santos Osaki[1]; José Fellip Catique Marinho[1]; Rodrigo Schmitz[1]; Helena Cristina Vieira[2]; Alexsandro Bayestorff da Cunha[1]; Polliana D'Angelo Rios[1]

[1] Universidade do Estado de Santa Catarina – UDESC.
2 Universidade Federal Rural de Pernambuco – UFRPE

Resumo: A produção nacional de painéis de partículas orientadas (OSB) apoia-se quase integralmente em *Pinus* spp., e o adesivo responde pela maior parcela do custo variável do processo. Avaliou-se o potencial do *Schizolobium parahyba* var. *amazonicum* para OSB, comparando-o a partículas industriais de *Pinus* spp. sob dois teores de fenol-formaldeído. Produziram-se 12 painéis de três camadas cruzadas, com 0,65 g cm^{-3} de densidade nominal e 16 mm de espessura, em arranjo fatorial 2 × 2 com três repetições. Os painéis de paricá reduziram o inchamento em espessura após 24 horas em 59,7% e a absorção de água em 40,6% frente à testemunha de mesmo teor de adesivo. Com 6% de resina, igualaram o módulo de ruptura da testemunha com 8%, indicando redução de 25% no consumo do insumo mais oneroso. Os painéis com 8% foram os únicos a atender conjuntamente aos requisitos de flexão e inchamento da classe OSB/2 da EN 300.

Palavras-chave: Paricá; Fenol-formaldeído; Espécie alternativa

OSB panels of *Schizolobium parahyba* var. *amazonicum*: dimensional stability and reduced adhesive consumption

Abstract: Brazilian oriented strand board (OSB) production relies almost entirely on *Pinus* spp. wood, and adhesive accounts for the largest share of variable processing cost. This study assessed *Schizolobium parahyba* var. *amazonicum* as a raw material for OSB, benchmarking it against industrial *Pinus* spp. strands under two phenol-formaldehyde contents. Twelve three-layer cross-oriented panels were produced at a nominal density of 0.65 g cm^{-3} and 16 mm thickness, in a 2 × 2 factorial arrangement with three replicates. Paricá panels reduced 24 h thickness swelling by 59.7% and water absorption by 40.6% relative to the control with the same adhesive content. With 6% resin, they matched the modulus of rupture of the control with 8%, indicating a 25% reduction in the most expensive panel input. Panels with 8% were the only treatment simultaneously meeting the bending and thickness swelling requirements of EN 300 class OSB/2.

Keywords: Paricá; Phenol-formaldehyde; Alternative species

1. Introdução

O painel de partículas orientadas (*Oriented Strand Board*, OSB) consolidou-se como produto estrutural de referência para paredes, forros, pisos, almas de vigas em I e fôrmas para concreto, competindo diretamente com o compensado (Caniato et al., 2021). Sua vantagem competitiva está no elevado rendimento das toras, uma vez que dispensa lâminas contínuas e admite matéria-prima de menor qualidade geométrica, com perdas restritas às frações finas geradas na produção e na secagem das partículas (Gao & Gong, 2021).

No Brasil, a produção teve início em 2002 e permanece pequena quando comparada à América do Norte e à Europa, apoiada essencialmente em florestas plantadas de *Pinus* spp. (Vidal & Hora, 2012). A concentração da base florestal em poucos gêneros expõe o setor a restrições de suprimento e limita ganhos tecnológicos associados à diversidade de propriedades da madeira. Iwakiri et al. (2004) argumentam que atender à demanda crescente exige não apenas expansão de área plantada com as espécies tradicionais, mas a incorporação de espécies de rápido crescimento capazes de contribuir quantitativa e qualitativamente para o abastecimento industrial.

A escolha da espécie florestal influencia diretamente o desempenho dos painéis OSB, uma vez que a densidade da madeira determina a razão de compactação obtida durante a prensagem e, consequentemente, a eficiência da consolidação do painel. Em condições de mesma densidade nominal, madeiras de menor densidade proporcionam maior razão de compactação, aumentando a área de contato entre as partículas, favorecendo a adesão da resina e melhorando propriedades físicas e mecânicas do painel (Van Pham et al., 2021; Maulana et al., 2024).

Nesse contexto, o *Schizolobium parahyba* var. *amazonicum* (Huber ex Ducke) Barneby, conhecido como paricá, reúne atributos de interesse industrial. Sua madeira é leve e de fácil trabalhabilidade, com densidade básica entre 0,30 e 0,33 g cm^{-3}, o que sustenta seu uso consolidado em laminados e compensados (Almeida et al., 2013; Silva et al., 2016). Ainda, ela apresenta baixa densidade que a torna atrativa para laminação é, do ponto de vista de painéis reconstituídos, um ativo tecnológico ainda pouco explorado (Trianoski, 2010).

O segundo condicionante econômico da produção de OSB é o adesivo. Mendes et al. (2010) destacam que, por representar o componente de maior custo, a definição do tipo e do teor de resina é decisiva na relação custo-benefício do processo. O fenol-formaldeído predomina em

OSB pela exigência de resistência à umidade em aplicações estruturais, e reduções mesmo pequenas no seu consumo têm impacto direto na competitividade do produto (Iwakiri et al., 2003). A questão relevante, portanto, não é apenas se uma espécie alternativa produz painéis viáveis, mas se ela permite produzi-los com menor consumo de resina.

Este trabalho teve por objetivo avaliar o potencial do *S. parahyba* var. *amazonicum* na produção de painéis OSB, comparando seu desempenho físico e mecânico ao de partículas industriais de *Pinus* spp. sob dois teores de fenol-formaldeído, e verificando o enquadramento dos painéis nas classes de uso da norma EN 300.

2. Material e métodos

A madeira de *Schizolobium parahyba* var. *amazonicum* foi obtida de plantios comerciais de 6 a 28 anos localizados em Aurora do Pará e Tomé-Açu, PA. As partículas testemunha foram fornecidas pela LP Brasil OSB Indústria e Comércio S.A. (Ponta Grossa, PR), correspondendo ao mix industrial de *Pinus taeda* e *Pinus elliottii* utilizado na produção comercial. Utilizaram-se adesivo fenol-formaldeído (52,70% de sólidos) e emulsão de parafina (39,20% de sólidos).

O experimento foi conduzido em delineamento inteiramente casualizado, em arranjo fatorial 2 × 2, composto por duas espécies (*Pinus* spp. e paricá) e dois teores de adesivo FF (6 e 8%), com três repetições por tratamento, totalizando 12 painéis. Os tratamentos foram: T1 (*Pinus*, 6% FF), T2 (*Pinus*, 8% FF), T3 (paricá, 6% FF) e T4 (paricá, 8% FF). O teor de parafina foi mantido constante em 1%.

A densidade básica da madeira de paricá foi determinada em nove amostras pelo método da balança hidrostática. As partículas tipo strand foram produzidas em gerador de disco regulado para 0,65 mm de espessura, 25 mm de largura e 90 mm de comprimento. A caracterização geométrica foi realizada em 100 partículas por matéria-prima, determinando-se comprimento, largura, espessura, índice de esbeltez e razão de planicidade.

As partículas foram secas até aproximadamente 4% de umidade e encoladas por aspersão em tambor rotativo, com aplicação sequencial do adesivo e da parafina. O colchão foi formado em três camadas cruzadas e submetido à pré-prensagem a frio por 7 min. A prensagem a quente ocorreu a 180 °C, pressão de 40 kgf cm^{-2} e tempo de 8 min. Os painéis foram produzidos com dimensões de 42 × 42 × 1,6 cm, climatizados a 20 ± 2 °C e 65 ± 5% de umidade relativa até massa constante e posteriormente esquadrejados.

Foram determinadas a densidade aparente, a razão de compactação, a absorção de água e o inchamento em espessura após 2 e 24 h de imersão, conforme a NBR 14810-2 (ABNT, 2013).

Os dados foram submetidos aos testes de Shapiro-Wilk e Bartlett para verificação dos pressupostos de normalidade e homogeneidade de variâncias. Em seguida, realizou-se análise de variância e comparação de médias pelo teste de Scott-Knott a 5% de significância.

3. Resultados e discussão

A densidade básica média do *S. parahyba* var. *amazonicum* foi de 0,310 g cm^{-3}, com valores extremos de 0,259 e 0,380 g cm^{-3} e coeficiente de variação de 13,52%. Esse valor é coerente com a média de 0,330 g cm^{-3} obtida por Silva et al. (2016) em povoamentos nativos da Amazônia Oriental e situa-se abaixo da faixa de 0,420 a 0,510 g cm^{-3} relatada por Lobão et al. (2012) para material do Acre. A espécie classifica-se como madeira leve, característica desejável para produção de painéis reconstituídos para uma vez que, quanto menor a densidade da madeira, maior a razão de compactação alcançada.

Tabela 1 – Geometria das partículas de *Pinus* spp. e de *Schizolobium parahyba* var. *Amazonicum.*

Matéria-prima	C (mm)	L (mm)	E (mm)	IE	RP
Pinus spp.	89,42	17,38	0,68	145,83	27,95
S. parahyba var. *amazonicum*	76,01	20,15	0,47	195,27	53,05

C: comprimento; L: largura; E: espessura; IE: índice de esbeltez; RP: razão de planicidade. Coeficientes de variação de IE e RP: 42,7% e 56,7% para Pinus spp.; 40,4% e 52,1% para S. parahyba var. amazonicum.

As partículas de paricá apresentaram índice de esbeltez 33,9% superior ao das partículas industriais de *Pinus* (Tabela 1), resultado da menor espessura obtida na geração. A diferença decorre da própria natureza da madeira: a menor densidade e a maior facilidade de corte do paricá favorecem a produção de partículas mais delgadas com o mesmo ajuste de facas. Iwakiri (1989) e Maloney (1993) associam maiores índices de esbeltez a incrementos na resistência à flexão estática, uma vez que partículas mais alongadas transferem tensões de forma mais eficiente ao longo da camada orientada. Os valores são compatíveis com a literatura:

Gorski (2014) obteve índice de esbeltez de 165 para *Pinus* sp., enquanto Naumann et al. (2008) encontraram índices entre 88,26 e 160,04 para paricá em partículas produzidas a partir de cavacos e maravalhas, portanto inferiores aos deste estudo, em que as partículas foram geradas diretamente da madeira sólida. A relação comprimento/largura foi de 3,8 para o paricá e 5,1 para o *Pinus*, ambas acima do mínimo de 3 estabelecido por Maloney (1993).

Tabela 2 – Densidade aparente, razão de compactação e propriedades físicas dos painéis.

Tratamento	**Dap (g cm^{-3})**	**RC**	**AA 2 h (%)**	**AA 24 h (%)**	**IE 2 h (%)**	**IE 24 h (%)**
T1 (*Pinus* – FF 6%)	0,583 a	1,39	74,95 b	111,79 b	46,47 c	73,34 c
T2 (*Pinus* – FF 8%)	0,596 a	1,42	48,95 a	74,96 a	22,69 b	45,63 b
T3 (Paricá – FF 6%)	0,574 a	1,85	47,03 a	70,20 a	12,82 a	19,75 a
T4 (Paricá – FF 8%)	0,543 a	1,75	41,63 a	66,43 a	14,01 a	18,41 a
CV (%)	12,61	–	23,75	9,06	23,89	15,52

Dap: densidade aparente; RC: razão de compactação; AA: absorção de água; IE: inchamento em espessura. Médias seguidas de mesma letra na coluna não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott a 95% de probabilidade. RC dos tratamentos testemunha estimada com densidade básica de referência de 0,42 g cm^{-3}.

Não houve diferença estatística entre tratamentos para densidade aparente, o que indica uniformidade dos procedimentos de formação e prensagem e assegura que as diferenças observadas nas demais propriedades sejam atribuíveis à matéria-prima e ao teor de adesivo. Os valores obtidos, entre 0,543 e 0,596 g cm^{-3}, ficaram abaixo da densidade nominal de 0,65 g cm^{-3}, o que se explica pelas perdas inerentes à formação manual do colchão. Essa diferença atua de forma conservadora sobre os resultados mecânicos: o T4, com a menor densidade média do experimento, foi avaliado em condição desfavorável frente à testemunha. Todos os tratamentos superaram a razão de compactação mínima de 1,3 apontada por Iwakiri (2005) como condição para área de contato suficiente entre partículas durante a prensagem, e os painéis de paricá alcançaram valores cerca de 30% superiores aos da testemunha, consequência direta da menor densidade básica da madeira (Kelly, 1977).

A estabilidade dimensional foi a propriedade em que a superioridade do paricá se manifestou de forma mais expressiva. Para o inchamento em espessura após 24 horas, os painéis de paricá formaram grupo estatístico isolado, com médias de 18,41% e 19,75%, contra 45,63% da testemunha de mesmo teor de adesivo e 73,34% da testemunha com 6% de FF, o que corresponde a reduções de 59,7% e 74,9%. O mesmo padrão se repetiu às 2 horas de imersão, com redução de até 72,4% em relação ao T1. A explicação mais consistente reside na constituição da madeira de baixa densidade, com maior proporção de lume celular disponível para acomodar a compressão sem gerar tensões residuais elevadas, que são liberadas sob umidade. Iwakiri et al. (2010), avaliando painéis de *S. parahyba* var. *amazonicum* e *Cecropia hololeuca*, observaram exatamente esse comportamento: espécies de menor densidade básica forneceram painéis com inchamento inferior ao dos painéis de *P. taeda*. Cabe destacar que o efeito superou a tendência oposta esperada pela maior razão de compactação dos painéis de paricá.

Os valores obtidos posicionam-se favoravelmente na literatura: Surdi (2012) relatou inchamento de 22,63% às 24 horas para painéis de *P. elliottii* com 6% de FF, Martarello (2015) obteve 32,58% para *E. benthamii* e Gorski (2014), 36,55% para *Pinus* sp. Para a absorção de água, os tratamentos T2, T3 e T4 compuseram grupo estatístico único, todos significativamente inferiores ao T1, em faixa compatível com a relatada por Carvalho et al. (2015) e Mendes (2001) para painéis de *Pinus* com resina fenólica. A distinção relevante é que a absorção mássica não se converteu em inchamento equivalente, comportamento tecnicamente desejável em aplicações estruturais.

4. Conclusões

Os painéis OSB produzidos com *Schizolobium parahyba* var. *amazonicum* apresentaram estabilidade dimensional substancialmente superior à da testemunha industrial de *Pinus* spp., com redução de 59,7% no inchamento em espessura após 24 horas para o mesmo teor de adesivo e de até 74,9% frente ao teor reduzido.

5. Agradecimentos

À Universidade do Estado de Santa Catarina e ao Grupo de Pesquisa em Tecnologia da Madeira do CAV/UDESC. Às empresas Tramontina S/A, LP Brasil OSB Indústria e Comércio S.A. e Bonet Madeiras e Papéis Ltda. pela doação dos materiais utilizados neste estudo.

6. Referências bibliográficas

Almeida, D. H., Scaliante, R. M., Macedo, L. B., Macêdo, A. N., Dias, A. A., Christoforo, A. L., & Calil Junior, C. (2013). Caracterização completa da madeira da espécie amazônica paricá (*Schizolobium amazonicum* Herb.) em peças de dimensões estruturais. ***Revista Árvore***, *37*(6), 1175-1181.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2013). *ABNT NBR 14810-2: Painéis de partículas de média densidade: Parte 2: Requisitos e métodos de ensaio*. ABNT.

Caniato, M., Marzi, A., da Silva, S. M., & Gasparella, A. (2021). A review of the thermal and acoustic properties of materials for timber buildings. ***Journal of Building Engineering***, *43*, 103066.

Carvalho, A. G., Mendes, R. F., Oliveira, S. L., & Mendes, L. M. (2015). Desempenho de painéis OSB com adesivos comerciais e tanino de barbatimão. ***Revista Árvore***, *39*(6), 1155-1163.

Cloutier, A. (1998). Oriented strand board (OSB): Raw material, manufacturing process, properties, and uses. In ***Anais do Seminário Internacional de Produtos Sólidos de Madeira de Alta Tecnologia*** (pp. 173-185). SIF/UFV/DEF.

European Committee for Standardization. (2003). *EN 312: Particleboards: Specifications*. CEN.

European Committee for Standardization. (2006). *EN 300: Oriented strand boards (OSB): **Definitions, classification and specifications***. CEN.

Ferro, F. S. (2013). *Painéis OSB com madeira Schizolobium amazonicum e resina poliuretana à base de óleo de mamona: Viabilidade técnica de produção* [Dissertação de mestrado, Universidade de São Paulo].

Gao, Z., & Gong, M. (2021). Strand-based engineered wood products in construction. In ***Engineered wood products for construction***. IntechOpen.

Gorski, L. (2014). *Painéis de partículas orientadas (OSB) da madeira de Pinus spp. e Eucalyptus benthamii* [Tese de doutorado, Universidade do Estado de Santa Catarina].

Iwakiri, S. (1989). *A influência de variáveis de processamento sobre propriedades de chapas de partículas de diferentes espécies de Pinus* [Tese de doutorado, Universidade Federal do Paraná].

Iwakiri, S. (2005). ***Painéis de madeira reconstituída***. FUPEF.

Iwakiri, S., Mendes, L. M., & Saldanha, L. K. (2003). Produção de chapas de partículas orientadas OSB de *Eucalyptus grandis* com diferentes teores de resina, parafina e composição em camadas. ***Ciência Florestal***, *13*(1), 89-94.

Iwakiri, S., Shimizu, J., Silva, J. C., Menezzi, C. H. S., Puehringher, A., Venson, I., & Larroca, C. (2004). Produção de painéis de madeira aglomerada de *Grevillea robusta* A. Cunn. ex R. Br. ***Revista Árvore***, *28*(6), 883-887.

Iwakiri, S., Zeller, F., Pinto, J. A., Ramirez, M. G. L., Souza, M. M., & Seixas, R. (2010). Avaliação do potencial de utilização da madeira de *Schizolobium amazonicum* (paricá) e *Cecropia hololeuca* (embaúba) para produção de painéis aglomerados. ***Acta Amazonica***, *40*(2), 303-308.

Kelly, M. W. (1977). *A critical literature review of relationships between processing parameters and physical properties of particleboards*. **USDA Forest Products Laboratory**.

Lobão, M. S., Costa, D. P., Almonacid, M. A. A., & Tomazello Filho, M. (2012). Qualidade do lenho de árvores de *Schizolobium parahyba* var. *amazonicum*, Acre, Brasil. ***Floresta e Ambiente***, *19*(3), 374-384.

Maloney, T. M. (1993). *Modern particleboard and dry-process fiberboard manufacturing* (2nd ed.). Miller Freeman.

Martarello, L. P. (2015). *Potencial tecnológico do Eucalyptus benthamii para a produção de painéis de partículas orientadas (OSB)* [Tese de doutorado, Universidade do Estado de Santa Catarina].

Maulana, M. I., Fitrianum, F., Noviyanti, D., Audy, R., Prasetia, D., Maulana, S., & Kim, N. H. (2024). Effect of pretreatment and compaction ratio on the properties of sengon (*Paraserianthes falcataria* L. Nielsen) oriented strand board**.** ***Wood Material Science & Engineering***, *19*(1), 206-219.

Mendes, L. M. (2001). *Pinus spp. na produção de painéis de partículas orientadas (OSB)* [Tese de doutorado, Universidade Federal do Paraná].

Mendes, L. M., Iwakiri, S., Matos, J. L. M., Keinert Junior, S., & Saldanha, L. K. (2002). *Pinus* spp. na produção de painéis de partículas orientadas (OSB). ***Ciência Florestal***, *12*(2), 135-145.

Mendes, R. F., Mendes, L. M., Abranches, R. A. S., Santos, R. C., & Guimarães Junior, J. B. (2010). Painéis aglomerados produzidos com bagaço de cana em associação com madeira de eucalipto. ***Scientia Forestalis***, *38*(86), 285-295.

Naumann, R. B., Vital, B. R., Carneiro, A. C. O., Della Lucia, R. M., Silva, J. C., Carvalho, A. M. M. L., & Colli, A. (2008). Propriedades de chapas fabricadas com partículas de madeira de *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake e de *Schizolobium amazonicum* Herb. ***Revista Árvore***, *32*(6), 1143-1150.

Pham Van, T., Schöpper, C., Klüppel, A., & Mai, C. (2021). Effect of wood and panel density on properties of lightweight wood-based panels**. *Wood Material Science & Engineering***, *16*(4), 237-245.

Silva, M. G., Numazawa, S., Araujo, M. M., Nagaishi, T. Y. R., & Galvão, G. R. (2016). Estudo anatômico e físico da madeira de *Schizolobium parahyba* var. *amazonicum* proveniente de povoamentos nativos da Amazônia Oriental. ***Scientia Forestalis***, *44*(110), 293-301.

Surdi, P. G. (2012). *Produção de painéis de partículas orientadas (OSB) a partir da madeira de um híbrido de Pinus elliottii var. elliottii × Pinus caribaea var. hondurensis* [Dissertação de mestrado, Universidade de São Paulo].

Trianoski, R. (2010). *Avaliação do potencial de espécies florestais alternativas de rápido crescimento para produção de painéis de madeira aglomerada* [Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Paraná].

Vidal, A. C. F., & Hora, A. B. (2012). Panorama de mercado: Painéis de madeira. ***BNDES Setorial***, *40*, 323-384.

Vidaurre, G. B., Silva, J. C., Vital, B. R., Della Lucia, R. M., & Pimenta, A. S. (2004). Produção de chapas de partículas de madeira de duas espécies nativas da Mata Atlântica e suas combinações. ***Ciência Florestal***, *14*(1), 235-242.

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Painel aglomerado produzido com partículas de madeira, bambu e resina de poliuretano à base de óleo de mamona

Jefferson Araújo da Silva[1]; Felipe Loan Barreto de Araújo[1];
Leandro Rodrigues da Silva[1], Márcia Ellen Chagas dos Santos Couto[1],
Juliana de Moura[1], Talita Dantas Pedrosa[1], Prosper Mensah[2], Rafael Rodolfo de Melo[1]

[1] Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Mossoró, RN, Brasil
[2] Forest Research Institute of Ghana, Kumasi, Ashanti, Ghana.

Resumo: Este estudo teve como objetivo desenvolver e avaliar um painel aglomerado produzido com partículas de pinus, eucalipto e bambu, utilizando poliuretano à base de óleo de mamona como adesivo. Os painéis foram confeccionados em escala laboratorial e submetidos aos ensaios físicos (densidade aparente, teor de umidade, absorção de água e inchamento em espessura). A densidade aparente observada foi de 0,59 g·cm^{-3} e o teor de umidade de 8,19%. O inchamento em espessura após 24 horas de imersão foi de 10,1%, enquanto a absorção de água atingiu 73,6% no mesmo período. Os resultados demonstram que o painel apresentou desempenho físico satisfatório e potencial para aplicação em ambientes internos, evidenciando que a utilização do poliuretano de mamona como uma alternativa tecnicamente viável e ambientalmente sustentável para a produção de painéis aglomerados.
Palavras-chave: Compósitos lignocelulósicos; Sustentabilidade; Adesivo renovável.

Particleboard Produced from Wood Particles, Bamboo, and Castor Oil-Based Polyurethane Resin

Abstract: This study aimed to develop and evaluate a particleboard produced from pine, eucalyptus, and bamboo particles, using castor oil-based polyurethane as the adhesive. The panels were manufactured on a laboratory scale and subjected to physical tests (bulk density, moisture content, water absorption, and thickness swelling). The results showed a bulk density of 0.59 g·cm^{-3} and a moisture content of 8.19%. Thickness swelling after 24 hours of immersion was 10.1%, and water absorption reached 73.6% over the same period. These results indicate satisfactory physical performance and support the potential for indoor applications, highlighting castor oil-based polyurethane as a technically viable and environmentally sustainable alternative for particleboard production.
Keywords: Lignocellulosic composites; Sustainability; Renewable adhesive.

1. Introdução

Os painéis de madeira aglomerada surgem como uma alternativa economicamente viável à madeira maciça, impulsionados pela crescente demanda dos mercados interno e externo. Segundo dados da Indústria Brasileira de Árvores – IBÁ (2025), o setor consolidou-se em 2024 com uma produção de 8,3 milhões de m³ para o mercado nacional e cerca de 1,4 milhão de m³ destinados à exportação. Diante dessa expressiva produção, a busca por sustentabilidade tem estimulado o aproveitamento de biomassas no processo de fabricação desses compostos.

No cenário nacional, as espécies dos gêneros *Eucalyptus* spp. e *Pinus* spp. constituem a base da silvicultura e representam as principais matérias-primas para a indústria de base florestal (Mendes et al., 2014). A expansão contínua dessa matriz produtiva sobre um número reduzido de espécies florestais restringe a expansão do setor para regiões onde os plantios comerciais destas espécies já se encontram consolidados. Nesse cenário, a diversificação de matérias-primas e a otimização dos processos de conversão industrial são fundamentais para assegurar a sustentabilidade e a competitividade do suprimento (Nogueira et al., 2022).

Como complemento ao tradicional uso do pinus e eucalipto, a incorporação de biomassas alternativas não madeireiras com ênfase nas gramíneas da família Poaceae (bambus) apresenta elevado potencial. O bambu destaca-se por sua cinética de crescimento rápido e expressiva produtividade por unidade de área (Chaowana, 2013), posicionando-se como uma alternativa viável para mitigar a escassez de recursos florestais e reduzir a pressão sobre plantios tradicionais (Laemlaksakul et al., 2026).

Para a união dessas partículas existem alternativas aos polímeros derivados de fontes poluentes, o poliuretano à base de óleo de mamona (*Castor Oil-Based Polyurethane*) tem se destacado na tecnologia de compósitos devido à sua baixa toxicidade, origem renovável e alta resistência à umidade (Silveira et al., 2021).

O presente trabalho tem como objetivo desenvolver e avaliar o painel aglomerado produzido a partir de partículas de *Pinus*, *Eucalyptus* e bambu, e aglutinados com o uso do poliuretano a base do óleo de mamona.

2. Material e métodos

2.1. Material de Estudo

O material utilizado foi partículas de Bambu, *Eucalyptus* e *Pinus*. Estas partículas foram coladas a partir do emprego do Poliuretano à base de óleo de mamona.

2.2. Produção dos Painéis Aglomerado

O painel aglomerado produzido a partir dos parâmetros de referência da Norma Brasileira NBR 14810-2 (ABNT, 2024), que estabelece os requisitos e os métodos de ensaio para painéis de partículas de média densidade.

O painel foi confeccionado com o adesivo produzida a partir do poliuretano a base do óleo da mamona, a partir da homogeneização de partículas de madeira (*Eucalyptus* e *Pinus*) e bambu. Após a homogeneização das partículas foram adicionadas a esta a resina poliuretano na proporção de 20% em relação a massa seca das partículas. A mistura homogeneizada foi colocada em uma forma de madeira (40 cm × 26 cm × 20 mm), onde foi distribuída de forma uniforme para garantir homogeneidade de cada painel. Os painéis foram prensados em uma prensa manual com aplicação de carga de 9 toneladas. O tempo de prensagem foi de 24 horas em temperatura ambiente

2.3. Produção de Amostras e Avaliações de Qualidade

Produziram-se amostras dos painéis de aglomerado e realizou-se avaliação da qualidade do painel produzido por meio de testes físicos. Os testes físicos realizados foram: densidade aparente, teor de umidade, absorção de água e inchamento em espessura. Estes foram realizados seguindo a normativa NBR 14810-2 (ABNT, 2024).

2.4. Ensaios Físicos e Mecânicos dos Painéis

2.4.1. Densidade e Teor de umidade

Os ensaios de densidade aparente foram realizados conforme a norma NBR 14810-2 (ABNT, 2024), com 5 repetições. Os corpos-de-prova foram secos em estufa com circulação de ar forçada por 24 h a temperatura de 105 ± 2 °C. A pesagem foi realizada utilizando balança analítica (precisão ± 0,01 g) e as dimensões de comprimento, largura e espessura (antes da secagem) foram medidas com paquímetro digital (precisão 0,01 mm). A densidade aparente foi calculada pela divisão da massa pelo volume das amostras (Equação 1)

:

$$Da = \frac{Ma}{Va} \quad \text{(Equação 1)}$$

Em que:
Da = densidade aparente, em g/cm^3;
Ma = massa atual ao teor de umidade de equilíbrio, em g;
Va = volume atual ao teor de umidade de equilíbrio, em cm^3.

O ensaio de teor de umidade seguiu a norma NBR 14810-2 (ABNT, 2024), com 5 repetições para cada tratamento. As amostras foram mantidas em sala climatizada com temperatura a 21 ± 2 °C e 65 ± 2% de umidade relativa por 10 dias. Posteriormente, foram pesados em balança analítica para obtenção da massa na condição de equilíbrio. Em seguida, estas amostras foram secas em estufa com circulação de ar forçada por 24 h a temperatura de 105 ± 2 °C e pesados novamente para obtenção da massa seca. A determinação do teor de umidade foi realizada utilizando a Equação 2.

$$TU = \frac{Ma - Ms}{Ma} \times 100 \quad \text{(Equação 2)}$$

Em que:
TU = teor de umidade, em %;
Ma = massa atual ao teor de umidade de equilíbrio, em g;
Ms = massa seca, em g.

2.4.2. Absorção de Água e Inchamento em Espessura

Os ensaios de absorção de água e inchamento em espessura foram realizados conforme a norma NBR 14810-2 (ABNT, 2024), nas dimensões dos corpos de prova, que foram confeccionados com 40 × 40 mm. Os corpos de prova foram secos em estufa de secagem e esterilização com circulação de ar forçada por 24 h à temperatura de 105 ± 2 °C. Em seguida, foram dispostos em dessecador por 30 min para atingir a temperatura ambiente. Após a climatização, foram pesados para obtenção da massa seca, utilizando balança analítica, e a

espessura foi medida com paquímetro digital. Posteriormente, os corpos de prova foram imersos em água destilada a 30 ± 2 °C, sendo reavaliados após 2 h e 24 h de imersão em água. Com estas informações, foram determinadas o percentual de absorção de água e inchamento em espessura utilizando as Equações 3 e 4, respectivamente.

$$AA = \frac{Mu - Ms}{Ms} \times 100 \quad \text{(Equação 3)}$$

$$IE = \frac{Du - Ds}{Ds} \times 100 \quad \text{(Equação 4)}$$

Em que:

AA = absorção de água, em %;

Mu = massa úmida, em g;

Ms = massa seca, em g;

IE = inchamento em espessura, em %;

Du = dimensão umidade, em cm;

Ds = dimensão seca, em cm.

3. Resultados e discussão

Os dados dos testes físicos do painel aglomerado produzido com resíduos de bambu, eucalipto e pinus (B.E.P) e adesivo COPU a 20% são apresentados na Tabela1. Foram avaliadas a densidade aparente, o teor de umidade, a absorção de água e o inchamento em espessura, de acordo com a NBR 14810-2.

Tabela 1. Valores médios (± desvio padrão) das propriedades físicas dos painéis produzidos com partículas de madeira e bambu e colados com poliuretano de mamona.

Propriedade Física	**Média**	**Desvio Padrão**
Densidade Aparente (g·cm^{-3})	0,59	0,10
Teor de Umidade (%)	8,19	0,18
Absorção de Água 2h (%)	41,9	6,2
Absorção de Água 24h (%)	73,6	12,7
Inchamento em Espessura 2h (%)	5,2	0,8
Inchamento em Espessura 24h (%)	10,1	0,5

A densidade aparente média de 0,59 g·cm⁻³ situa-se próximo ao limite inferior da faixa recomendada pela NBR 14810-2, que estabelece para painéis de partículas de média densidade valores entre 0,55 e 0,70 g·cm⁻³. Esse resultado é atribuído, primordialmente, às condições de processamento adotadas em escala laboratorial – prensagem a frio e baixa pressão específica (aproximadamente 0,85 MPa) em contraste com os processos industriais, que empregam prensagem a quente (150 a 200 °C) e pressões mais elevadas, tipicamente entre 2 e 5 MPa. O aumento da temperatura e da pressão favorece a fluidez e a cura do adesivo, promovendo maior compactação das partículas e redução dos vazios internos (Silveira et al., 2021). O valor obtido atende ao requisito normativo mínimo, o que permite classificar o painel como de média densidade.

O teor de umidade médio de 8,19% está bem abaixo do limite máximo de 12% estabelecido pela NBR 14810-2. Esse valor é coerente com o esperado para painéis produzidos com adesivo poliuretano à base de óleo de mamona, que apresenta caráter hidrofóbico e menor afinidade por água. Silveira et al. (2021) destacam que a estrutura química deste adesivo confere ao painel uma maior resistência à absorção de umidade ambiental, o que contribui para a estabilidade dimensional do painel em aplicações internas. A baixa umidade residual é um fator favorável, pois reduz o risco de empenamentos e fissuras decorrentes de variações higroscópicas ao longo do tempo.

O painel apresentou uma absorção de água de 41,9% após 2 horas e 73,6% após 24 horas de imersão. Já o inchamento em espessura atingiu 5,2% e 10,1% respectivamente. O inchamento em 24 horas atendeu ao limite máximo de 15% exigido pela NBR 14810-2 para painéis de partículas de média densidade destinados a uso interno, demonstrando que o compósito possui estabilidade dimensional adequada. A Figura 2 ilustra o aspecto visual dos corpos de prova submetidos ao ensaio de inchamento em espessura, evidenciando a integridade estrutural do painel após 24 horas de imersão.

Esse desempenho é atribuído, fundamentalmente, à eficácia do adesivo adotado na proteção das interfaces adesivo-partícula contra a penetração de água. Conforme elucidado por Silveira et al. (2021), o poliuretano à base de óleo de mamona forma, durante a cura, uma rede tridimensional reticulada com ligações uretânicas (-NH-CO-O-) que conferem caráter hidrofóbico à matriz polimérica. Essa barreira química e física dificulta a difusão de moléculas de água para o interior do painel e reduz a expansão volumétrica das partículas lignocelulósicas. O comportamento observado é semelhante aos achados de Wechsler et al. (2013), que, ao produzirem painéis aglomerados sustentáveis utilizando cascas de macadâmia e óleo de mamona, reportaram inchamentos inferiores a 12%.

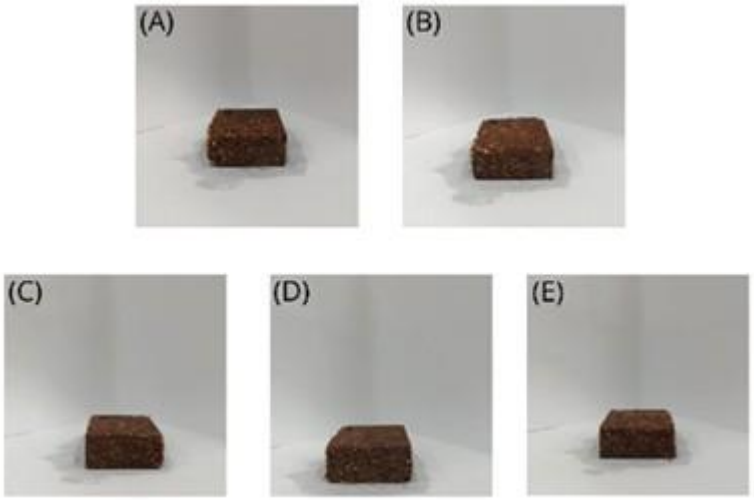


Figura 19 – Corpos-de-prova dos painéis produzidos com partículas de madeira e bambu e colados com poliuretano de mamona após o ensaio de inchamento em espessura.

Embora o inchamento tenha se mantido dentro do padrão normativo, a absorção de água em 24 horas (73,6%) foi elevada quando comparada a painéis comerciais de maior densidade. Esse resultado pode ser explicado pela densidade aparente do painel, que, embora atenda ao limite inferior da faixa normativa, ainda permite um volume considerável de vazios internos entre as partículas, os quais são preenchidos pela água.

4. Conclusão

O painel aglomerado produzido com partículas de bambu, *Eucalyptus* e *Pinus* utilizando o poliuretano à base de óleo de mamona como ligante, apresentou propriedades físicas compatíveis com os requisitos estabelecidos pela NBR 14810-2 para painéis de média densidade destinados ao uso interno. Os resultados obtidos para densidade aparente, teor de umidade e inchamento em espessura indicam que o material possui desempenho físico satisfatório, atendendo aos parâmetros normativos avaliados.

Assim, conclui-se que a utilização das partículas destes materiais lignocelulósicos, associados ao adesivo a base de mamona representa uma alternativa tecnicamente viável para a produção de painéis aglomerados, contribuindo o desenvolvimento de materiais mais sustentáveis.

5. Referências bibliográficas

Associação Brasileira de Normas Técnicas – *ABNT. NBR 14810-2:* painéis de partículas de média densidade — requisitos e métodos de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 2024.

Nogueira, N. D., Narciso, C. R. P., Felix, A. L. & Mendes, R. F. (2022). Pressing temperature effect on the properties of medium density particleboard made with sugarcane bagasse and plastic bags. *Materials Research, 25*, e20210491. https://doi.org/10.1590/1980-5373-MR-2021-0491

Laemlaksakul, V., Ngamrungroj, D., Srijunruk, S., and Sukhawipat, N. (2026). A green and sustainable three-layer bamboo particleboard from chopstick waste bonded with bio-based polyurethane composite for engineering applications. *European Journal of Wood and Wood Products, 84*, Article 62. https://doi.org/10.1007/s00107-026-02415-3

Indústria Brasileira de Árvores (IBÁ). (2024). *Relatório anual 2024*. IBÁ. https://www.iba.org/datafiles/publicacoes/relatorios/relatorio2024.pdf

Mendes, R. F., Mendes, L. M., Mendonça, L. L., Guimarães Júnior, J. B., & Mori, F. A. (2014). Qualidade de painéis aglomerados homogêneos produzidos com a mistura de madeira de *Pinus oocarpa* e *Eucalyptus grandis*. *Cerne, 20*(2), 291–298. https://doi.org/10.1590/01047760.201420021273

Chaowana, P. (2013). Bamboo: An alternative raw material for wood and wood-based composites. *Journal of Materials Science Research, 2*(2), 90–95. https://doi.org/10.5539/jmsr.v2n2p90

Silveira, V. S., Bianchi, O., Fiorio, R., & Zattera, A. J. (2021). Mechanical properties of composites of castor oil-based polyurethane and wood flour. *Materials Research, 19*(3), 651–657. https://doi.org/10.1590/1980-5373-MR-2021-0287

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Perfil de densidade de painéis aglomerados de média densidade produzidos com resíduos de espécies amazônicas

Geisimara Santos de Jesus[1]; Geraldo Bortoletto Júnior[1]

[1] Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" - Universidade de São Paulo

Resumo: A análise do perfil de densidade vertical (PDV) é fundamental para determinar a eficiência da prensagem na consolidação de painéis aglomerados. Este estudo avaliou o PDV de aglomerados produzidos com densidade e espessura nominal de 750 kg/m³ e 15,7 mm, respectivamente, utilizando resíduos de madeiras amazônicas, colados com 10% de resina uréia formaldeído (UF). Avaliaram-se seis tratamentos: T1 (100% *Pinus caribaea* var *caribaea* - testemunha); T2 (100% *Cariniana micrantha*); T3 a T5 (misturas nas proporções 20:20:60, combinando *C. micrantha*, uma espécie secundária - *Protium puncticulatum*, *Iryanthera grandis* e *Tachigali* spp., respectivamente, e *P. caribaea* var *caribaea*); e T6 (mistura equitativa das quatro espécies, 25% cada). O delineamento foi o inteiramente casualizado, utilizando análise estatística não paramétrica ($p < 0,05$). Os painéis T3 a T5 apresentaram perfil em "M" semelhante à testemunha (T1), com maiores densidades nas superfícies. Conclui-se que o PDV se destacou como uma ferramenta preditiva eficiente para analisar o processo de consolidação dos painéis, apontando tendências estruturais a serem validadas mecanicamente em estudos futuros.

Palavras-chave: Densitometria de raios X; Resíduos agroflorestais; Painéis de partículas.

Density profile of medium-density particleboards produced with amazonian wood species residues

Abstract: The analysis of the vertical density profile (VDP) is essential for determining the pressing efficiency in the consolidation of particleboards. This study evaluated the VDP of particleboards produced with a nominal density and thickness of 750 kg/m³ and 15.7 mm, respectively, using Amazonian wood residues bonded with 10% urea-formaldehyde (UF) resin. Six treatments were evaluated: T1 (100% *Pinus caribaea* var. *caribaea* – control); T2 (100% *Cariniana micrantha*); T3 to T5 (mixtures at a 20:20:60 ratio, combining *C. micrantha*, a secondary species - *Protium puncticulatum*, *Iryanthera grandis*, and *Tachigali* spp., respectively, and *P. caribaea* var. *caribaea*); and T6 (an equal mixture of the four species, 25% each). A completely randomized design was used, employing non-parametric statistical analysis ($p < 0.05$). Panels T3 to T5 exhibited an "M"-shaped profile similar to that of the control (T1), although T1 displayed significantly higher densities at the surfaces. It was concluded that the VDP stood out as an efficient predictive tool for analyzing the consolidation process of particleboards, indicating structural trends to be mechanically validated in future studies.

Keywords: X-ray densitometry; Agroforestry residues; Particleboards.

1. Introdução

Os painéis de partículas de média densidade são produtos reconstituídos, compostos por partículas de madeira incorporados com resina sintética ou natural (Bertolini *et al*., 2013; Maloney, 1993). Historicamente, a produção desses painéis surgiu da necessidade de substituir o uso de madeira maciça na indústria moveleira (Walker *et al*, 1992).

No cenário atual, o mercado é predominantemente abastecido por espécies de baixa densidade, como as dos gêneros *Pinus* spp. e *Eucalyptus* spp. (Sozim *et al*., 2019; Iwakiri *et al*., 2012). Contudo, estudos recentes sugerem que espécies amazônicas ou a mistura de resíduos de espécies com diferentes densidades (baixa, média e alta) pode representar um caminho promissor para a produção de painéis com qualidade tecnológica (Surdi *et al*., 2019; Zau *et al*., 2014; Iwakiri *et al*., 2012).

Nesse contexto, para produzir painéis com adequado desempenho físico-mecânico, torna-se necessário avaliar os fatores inerentes à madeira e ao processo, a exemplo da densidade aparente e do ciclo de prensagem, que exercem influência direta nas propriedades do material (Iwakiri, 2005). Uma das formas de determinar a eficiência do ciclo de prensagem na consolidação e densificação de painéis aglomerados é analisar o comportamento do perfil de densidade ao longo da espessura, fundamental para avaliar as variáveis operacionais e as características da matéria-prima (Wang *et al*., 2006).

Diante do exposto, evidencia-se a importância de compreender como a incorporação de novas espécies madeireiras no processo afeta a estrutura interna do painel. Assim, este trabalho tem como objetivo avaliar o perfil de densidade vertical de painéis aglomerados produzidos com o aproveitamento de resíduos do processamento mecânico primário da madeira de espécies amazônicas.

2. Material e métodos

2.1 Obtenção da matéria-prima e manufatura dos painéis aglomerados

Foram confeccionados painéis aglomerados com mistura de resíduos do processamento primário da madeira de cinco espécies do bioma amazônico: *Iryanthera paraensis* (arurá-vermelho), *Cariniana micrantha* (tauari-vermelho), e a mistura de *Tachigali paraensis* (tachi-branco) e *Tachigali paniculata* (tachi-preto), denominada de *Tachigali* spp., e *Protium puncticulatum* (breu-vermelho).

Parte dos resíduos e da madeira (pranchões e tábuas), das cinco espécies foram coletados na serraria da Mil Madeiras Preciosas (Itacoatiara - AM). O material foi encaminhado para o Laboratório de Ensaios Mecânicos de Madeira e Derivados (LEMMAD), localizado no Departamento de Ciências Florestais - LCF da Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz - ESALQ, polo da Universidade de São Paulo - USP, situado no município de Piracicaba, São Paulo.

No laboratório as pranchas de madeira foram processadas para a confecção de corpos de provas para ensaios físicos e mecânicos. Já as tábuas foram enviadas para uma indústria em Tietê - SP, para a produção de pisos. Os resíduos de ambas as operações foram aproveitados para a fabricação dos painéis. Adicionalmente, utilizou-se madeira de *Pinus caribaea* var. *caribaea* obtida de resíduos provenientes de experimentos anteriores do Laboratório de Laminação e Painéis de Madeira - LLAPAM do LCF.

Os painéis foram produzidos com densidade nominal de 750 kg/m^3 e espessura nominal de 15,7 mm. Na produção dos painéis foram adotados seis tratamentos (Tabela 1), cada um deles com três repetições, totalizando 18 painéis. O delineamento experimental utilizado foi inteiramente casualizado.

Tabela 1 – Tratamentos para a produção dos painéis aglomerados a partir da madeira de espécies amazônicas

Tratamento	Espécie	Proporção de Mistura* (%)	Adesivo (UF)
T1	*Pinus caribaea* var *caribaea*	100	10
T2	*Cariniana micrantha*	100	10
T3	*Cariniana micrantha*:*Protium puncticulatum*: *Pinus caribaea* var *caribaea*	20:20:60	10
T4	*Cariniana micrantha*: *Iryanthera grandis*:*Pinus caribaea* var *caribaea*	20:20:60	10
T5	*Cariniana micrantha*:*Tachigali* spp.:*Pinus caribaea* var *caribaea*	20:20:60	10
T6	*Cariniana micrantha*:*Tachigali* spp.:*Protium puncticulatum*:*Pinus*	25:25:25:25	10

	caribaea var *caribaea*

*Percentual de cada espécie na mistura, referente à massa total de partículas do painel.

Para a colagem das partículas, utilizou-se resina à base de ureia-formaldeído (UF) na proporção de 10% de sólidos resinosos em relação à massa seca das partículas. À UF foi misturado o catalisador na proporção de 5% em relação à quantidade de adesivo. Parafina líquida, também, foi aplicada sobre as partículas na quantidade de 1% de sólidos, calculada com o mesmo parâmetro utilizado para o adesivo.

Os painéis foram prensados em uma temperatura de 180°C, com pressão máxima utilizada durante a prensagem de 35 kgf/cm², e tempo total de prensagem de 10 minutos, inclusos 1 minuto para o fechamento e 1 minuto para a abertura dos pratos da prensa.

2.2 Determinação do perfil de densidade vertical

Os perfis de densidade vertical, foram obtidos de quatro corpos de prova retirados de cada painel, totalizando 12 por tratamento, com comprimento de 50 ±1 mm e largura de 50 ±1 mm.

As análises foram realizadas com o auxílio do densitrômetro de raio X, da marca QMS, modelo QDP-01 X (Figura 1 a). Os corpos de prova foram encaixados no porta-amostras do equipamento, com capacidade de receber 12 amostras por análise (Figura 1 b). Para determinar a densidade aparente das amostras, os feixes de raios X que atravessam os corpos de prova são transformados em valores pontuais de densidade aparente por meio do *software* QMS.



Figura 1 - Densitrômetro de raio X (a); Porta-amostras com os 12 corpos de provas encaixados.

A leitura da densidade aparente é realizada em um intervalo constante, a cada 40 µm de distância linear, ao longo da espessura das amostras. Através dessa leitura, é possível determinar a densidade média do perfil (i), a densidade média das faces (ii) e a densidade média do miolo (região central do painel) (iii).

2.3 Determinação da densidade aparente dos painéis aglomerados por gravimetria

Foram selecionados 12 corpos de prova (50 × 50 mm), quatro por painel produzido. Para obtenção da densidade aparente foram feitas medições diretas, com a utilização de uma balança de precisão, a massa (g) foi obtida, com o auxílio de um paquímetro e um micrômetro a largura, comprimento e espessura foram obtidas. Com o cálculo do volume (m^3), a densidade aparente (kg/m^3) foi determinada pela divisão entre massa e volume, seguindo as orientações da normativa em vigência NBR 14810-2 (ABNT, 2024).

2.4 Análise estatística

As densidades aparentes médias foram comparadas por meio da análise de variância (ANOVA), com o objetivo de verificar a existência de diferenças significativas entre os tratamentos.

Para a análise dos perfis de densidade vertical, devido à não normalidade dos dados, utilizou-se o teste de Kruskal-Wallis seguido do teste de Dunn com correção de Bonferroni (Dunn, 1964; Kruskal; Wallis, 1952). Todas as análises foram conduzidas no *software* RStudio, versão 4.4.1 (2024).

3. Resultados e discussão

A densidade aparente dos painéis (DP, obtida por gravimetria), ou seja, a densidade efetiva obtida após a manufatura, variou entre 752 kg/m^3 e 791 kg/m^3 (Tabela 2). Não houve diferença estatística entre os tratamentos.

Quanto ao perfil de densidade, houve diferenças significativas entre os tratamentos em todas as regiões analisadas, ou seja, no perfil completo, nas faces externas e no miolo dos painéis (Tabela 2). Os valores médios da densidade aparente ao longo do perfil completo variaram entre 785 kg/m^3 e 819 kg/m^3. Verificou-se diferença significativa apenas entre os tratamentos T1 e T4.

Tabela 2 – Valores médios da densidade aparente e do perfil de densidade vertical dos painéis aglomerados

Tratamentos	Densidade aparente (kg/m³)			
	DP	Perfil	Faces externas	Miolo
T1	752 [a]	819 [a]	929 [a]	817 [ab]
T2	791 [a]	791 [ab]	863 [ab]	819 [ab]
T3	773 [a]	804 [ab]	894 [ab]	832 [ab]
T4	772 [a]	785 [b]	870 [b]	816 [a]
T5	765 [a]	788 [ab]	863 [b]	816 [a]
T6	777 [a]	812 [ab]	892 [b]	842 [b]

DP: Densidade aparente. Médias na mesma coluna seguidas por letras iguais não diferem estatisticamente (p > 0,05).

Os valores médios das faces externas variaram entre 863 kg/m³ e 929 kg/m³. O tratamento T1 diferiu estatisticamente dos tratamentos T4, T5 e T6, e apresentou valor médio da densidade das faces significativamente superior.

O miolo apresentou valores médios de densidade aparente variando entre 816 kg/m³ e 842 kg/m³. Houve diferença estatística apenas entre o tratamento T6 e os tratamentos T4 e T5, sendo que estes revelaram valores inferiores.

Os valores efetivos da DP foram ligeiramente superiores a nominal (750 kg/m³), indicando que as perdas de material durante a produção foram menores que as estimadas nos cálculos iniciais. Segundo a NBR 14810-1 (ABNT, 2013), a faixa de densidade para determinar se um painel aglomerado pode ser considerado de média densidade é de 551 kg/m³ a 750 kg/m³. No entanto, a NBR 14810-2 (ABNT, 2024) estabelece uma tolerância de ± 7% em relação ao valor da densidade média dos painéis.

O padrão dos seis tratamentos exibidos no gráfico (Figura 2) consolida-se durante a prensagem a quente. O gráfico com os valores médios dos perfis exibiu o formato característico da letra “M” (Figura 2), distinguindo-se por apresentar o ponto máximo da curva nas faces externas e valores reduzidos na parte central da espessura dos painéis, o miolo.

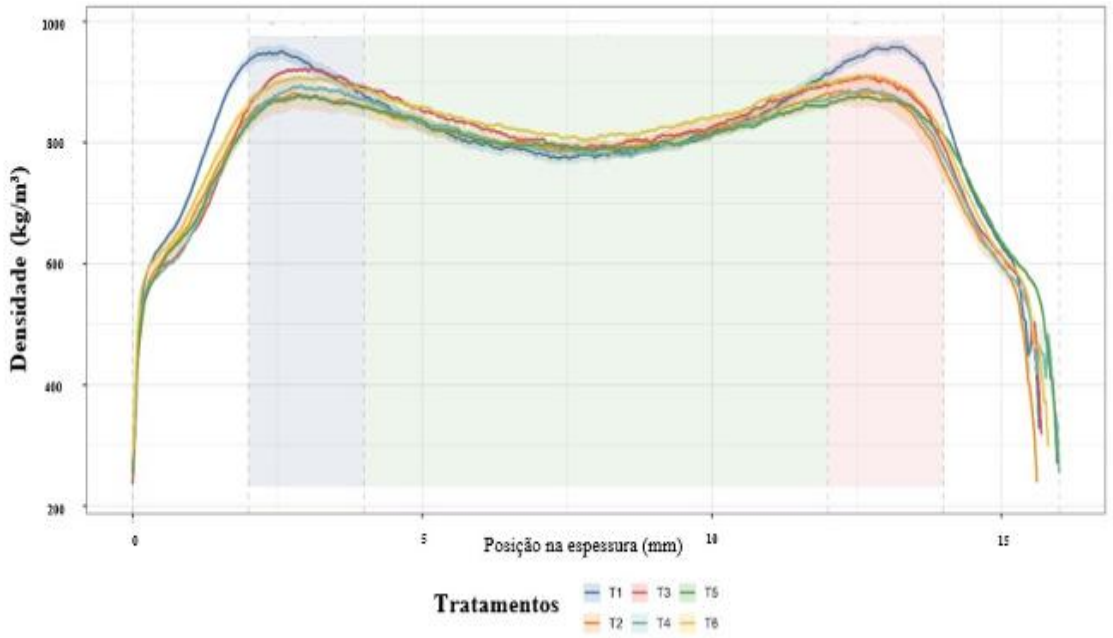


Figura 2 - Perfis médios de densidade por tratamento (linhas: médias ± desvio padrão); áreas sombreadas: regiões de análise.

A formação desse perfil de densidade está relacionada à forma como o calor é distribuído entre as diferentes camadas do colchão de partículas durante a prensagem a quente. O contato direto dos pratos aquecidos da prensa com as superfícies do colchão, região onde a condução é o mecanismo predominante, fornece o maior transporte de calor para as camadas externas; portanto, o processo de adensamento das faces externas é acelerado quando comparado ao miolo, onde o fluxo térmico depende da convecção do vapor d'água gerado. Por ser uma transferência intrinsecamente mais lenta, a polimerização da resina ocorre de forma tardia no centro do painel que, aliada a uma menor intensidade de compactação, contribui para a formação de uma camada com menor densidade (Iwakiri, 2005).

O tratamento composto por 100% de partículas de *Pinus caribaea* var *caribaea* apresentou tendência de maiores picos de densidade nas faces externas dos painéis, em comparação aos demais tratamentos. Sendo assim, é possível supor que os colchões de partículas dos painéis do tratamento T1 ofereceram menor resistência à compressão perpendicular durante a prensagem a quente, dando origem a picos de densidade superiores nas superfícies.

De acordo com Kelly (1977), a densidade das superfícies dos painéis afeta diretamente as suas propriedades mecânicas, tais como os módulos de ruptura (MOR) e de elasticidade (MOE) na flexão estática. Isso ocorre porque as tensões de flexão — especialmente as de

compressão e de tração — são maiores exatamente nas faces externas da amostra ensaiada, tornando-as as porções mais exigidas do material. Por consequência, os valores de MOR e MOE são altamente dependentes da densidade superficial do painel, parâmetro este identificado por meio da determinação do perfil de densidade vertical, o qual não pode ser obtido apenas pela medição da densidade aparente por gravimetria.

Considerando o relato da literatura e a estrutura do perfil vertical observada neste estudo, infere-se uma tendência de melhor desempenho em flexão estática para os painéis do tratamento T1 em relação àqueles com menores picos de densidade nas faces. Contudo, por se tratar de uma projeção baseada nas características físicas do material, essa hipótese necessita ser confirmada por meio de ensaios mecânicos destrutivos em investigações futuras com os mesmos materiais, inclusive para validação estatística.

4. Conclusões

O perfil de densidade vertical confirmou o formato característico em "M" para todos os tratamentos considerados, validando a eficiência do ciclo de prensagem na consolidação dos painéis.

O tratamento T1 (100% *Pinus caribaea* var. *caribaea*) destacou-se com picos de densidade significativamente superiores nas faces externas em comparação às misturas com resíduos amazônicos.

As misturas contendo espécies amazônicas (T3 a T5) apresentaram comportamento de adensamento superficial semelhante e satisfatório, demonstrando viabilidade técnica na consolidação interna do painel.

A densitometria de raios X destacou-se como importante ferramenta preditiva de tendências físicas e mecânicas, servindo como base norteadora para validações destrutivas e estatísticas em investigações futuras.

5. Agradecimentos

Os autores expressam seu sincero agradecimento à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão da bolsa ao primeiro autor; à Fundação de Estudos Agrários “Luiz de Queiroz” (FEALQ), pelo auxílio financeiro complementar à bolsa; e ao Prof. Dr. Mário Tommasiello Filho e à equipe do Laboratório de Anatomia, Identificação e Densitometria de Raios X em Madeira (LAIM/ESALQ), pelo suporte técnico fundamental.

6. Referências bibliográficas

Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2013). *Painéis de partículas de média densidade – Parte 1: Terminologia* (ABNT NBR 14810-1). ABNT.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2024). *Painéis de partículas de média densidade – Parte 2: Requisitos e métodos de ensaio* (ABNT NBR 14810-2). ABNT.

Bertolini, M. S., Lahr, F. A. R., Nascimento, M. F., & Agnelli, J. A. M. (2013). Accelerated artificial aging of particleboards from residues of CCB treated Pinus sp. and castor oil resin. *Materials Research*, 16, 293–303. https://doi.org/10.1590/S1516-14392013005000003

Dunn, O. J. (1964). Multiple comparisons using rank sums. *Technometrics*, 6(3), 241-252.

Iwakiri, S. (2005). *Painéis de madeira reconstituída*. FUPEF.

Iwakiri, S., Vianez, B. F., Weber, C., Trianoski, R., & Almeida, V. C. (2012). Avaliação das propriedades de painéis aglomerados produzidos com resíduos de serrarias de nove espécies de madeiras tropicais da Amazônia. *Acta Amazonica*, 42, 59-64. https://doi.org/10.1590/S0044-59672012000100007

Kelly, M. W. (1977). *Critical literature review of relationships between processing parameters and physical properties of particleboards* (General Technical Report FPL-10). Forest Products Laboratory.

Kruskal, W. H., & Wallis, W. A. (1952). Use of ranks in one-criterion variance analysis. Journal of the American Statistical Association, 47(260), 583–621.

Maloney, T. M. (1993). *Modern particleboard and dry-process fiberboard manufacturing*. Miller Freeman.

Sozim, P. C. L., Napoli, L. M., Ferro, F. S., Mustefaga, E. C., & Hillig, É. (2019). Propriedades de painéis aglomerados produzidos com madeiras de Ligustrum lucidum e Pinus taeda. *Pesquisa Florestal Brasileira*, *39*. https://doi.org/10.4336/2019.pfb.39e201801696

Surdi, P. G., Bortoletto Júnior, G., Castro, V. R., Brito, F. M. S., Berger, M. S., & Zanuncio, J. C. (2019). Particleboard production with residues from mechanical processing of Amazonian woods. *Revista Árvore*, 43, e430102. https://doi.org/10.1590/1806-90882019000100002

Walker, J. C. F. (1992). Wood panels: particleboards and fibreboards. Em J. C. F. Walker (Ed.), *Primary wood processing: Principles and practice* (pp. 419-480). Chapman & Hall.

Wang, X., Mohammad, M., Hu, LJ, & Salenikovich, A. (2006). Avaliação da distribuição de densidade em painéis à base de madeira usando varredura de raios X. *Journal of Nondestructive Testing* , *11* (4).

Zau, M. D. L., Vasconcelos, R. P. de, Giacon, V. M., & Lahr, F. A. R. (2014). Avaliação das propriedades química, física e mecânica de painéis aglomerados produzidos com resíduo de madeira da Amazônia-Cumaru (*Dipteryx odorata*) e resina poliuretana à base de óleo de mamona. *Polímeros*, *24*, 726–732. https://doi.org/10.1590/0104-1428.1594

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

POTENCIAL ANTIFÚNGICO DO EXTRATO NATURAL DA MADEIRA DE *Paulownia tomentosa* FRENTE A FUNGOS DETERIORADORES

Giovani Mateus Wermeier Weber[1]; Roberta Rodrigues Roubuste[1]; Talita Baldin[1], Carine Setter[1], Cristiane Pedrazzi[1]

[1] Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), Santa Maria, RS, Brasil

Resumo: A deterioração da madeira por agentes xilófagos reduz sua durabilidade, tornando necessária a busca por alternativas sustentáveis aos preservantes convencionais. Neste contexto, este estudo teve como objetivo avaliar o potencial antifúngico do extrato da madeira de *Paulownia tomentosa* frente a fungos deterioradores da madeira. Inicialmente, realizou-se a caracterização química da madeira por meio da determinação dos teores de umidade, cinzas, extrativos totais e lignina, visando verificar a presença de compostos com potencial bioativo. Em razão do elevado teor de extrativos observado, procedeu-se à obtenção do extrato aquoso por extração em banho-maria a 100 °C, o qual foi avaliado nas concentrações de 25, 50, 75 e 100%, além da testemunha. O efeito antifúngico foi determinado por meio do índice de crescimento micelial de fungos da podridão branca (*Pycnoporus sanguineus*), parda (*Gloeophyllum trabeum*) e mole (*Chaetomium globosum*). A madeira apresentou teores médios de 13,23% de umidade, 0,45% de cinzas, 14,31% de extrativos totais e 20,78% de lignina. Houve redução significativa do crescimento micelial com o aumento da concentração do extrato. Os maiores efeitos de toxicidade foram observados para *Gloeophyllum trabeum* e *Chaetomium globosum*, cujos valores médios de ICM foram reduzidos de 39,94 para 2,22 e de 56,73 para 0,47, respectivamente, entre a testemunha e a concentração de 100%. Os resultados indicam que o elevado teor de extrativos está associado à presença de compostos bioativos com atividade antifúngica. Conclui-se que o extrato da madeira de *P. tomentosa* apresenta potencial para aplicação como preservante natural da madeira, contribuindo para o desenvolvimento de produtos sustentáveis.

Palavras-chave: Biodeterioração; Extrativos; Preservação da madeira; Toxicidade.

ANTIFUNGAL POTENTIAL OF *Paulownia tomentosa* WOOD NATURAL EXTRACT AGAINST WOOD-DECAY FUNGI

Abstract: Wood deterioration caused by xylophagous agents reduces its durability, making it necessary to seek sustainable alternatives to conventional wood preservatives. In this context, the present study aimed to evaluate the antifungal potential of *Paulownia tomentosa* wood extract against wood-decaying fungi. Initially, the chemical characterization of the wood was carried out by determining its moisture, ash, total extractives, and lignin contents in order to verify the presence of compounds with potential bioactive properties. Due to the high extractive content observed, an aqueous extract was obtained through hot-water extraction in a water bath at 100 °C and evaluated at concentrations of 25, 50, 75, and 100%, in addition to an untreated control. The antifungal effect was assessed using the mycelial growth index (MGI) of white-rot (*Pycnoporus sanguineus*), brown-rot (*Gloeophyllum trabeum*), and soft-rot (*Chaetomium globosum*) fungi. The wood presented average contents of 13.23% moisture, 0.45% ash, 14.31%

total extractives, and 20.78% lignin. A significant reduction in mycelial growth was observed with increasing extract concentration. The highest toxicity effects were recorded for *Gloeophyllum trabeum* and *Chaetomium globosum*, whose mean MGI values decreased from 39.94 to 2.22 and from 56.73 to 0.47, respectively, between the control treatment and the 100% extract concentration. The results indicate that the high extractive content is associated with the presence of bioactive compounds exhibiting antifungal activity. It can be concluded that *P. tomentosa* wood extract has potential for application as a natural wood preservative, contributing to the development of sustainable wood protection products.

Keywords: Biodeterioration; Extractives; Wood preservation; Toxicity.

1. Introdução

A madeira é um material amplamente utilizado em diversos setores industriais devido às suas propriedades físicas, mecânicas, químicas e estéticas. Contudo, por ser de origem orgânica, torna-se suscetível ao ataque de organismos xilófagos (Woźniak, 2022, Martín & López, 2023). Os xilófagos utilizam a madeira como abrigo e desenvolvimento, ou ainda degradam os componentes da parede celular e usam como fonte de nutrientes, promovendo alterações estruturais que interferem diretamente na resistência mecânica, estabilidade dimensional e durabilidade de produtos oriundos da madeira (Ezeilo et al., 2017). Em razão dos impactos econômicos e ambientais causados por agentes biodeterioradores, é fundamental a utilização de métodos de proteção relacionados com compostos naturais obtidos a partir de espécies vegetais.

A busca por alternativas sustentáveis em relação aos preservativos convencionais tem aumentado o interesse por compostos naturais presentes nas plantas, principalmente aqueles que são encontrados na madeira. Os extrativos encontrados na madeira são responsáveis pela durabilidade natural de diversas espécies florestais. Esses compostos são constituídos principalmente por substâncias fenólicas, taninos, flavonoides, terpenos e outros metabólitos secundários que atuam como mecanismos naturais de defesa contra fungos, insetos e demais agentes biodeterioradores (Kirker et al., 2024). Os metabólitos apresentam atividade fungitóxica, podendo ser empregados no desenvolvimento de preservativos naturais da madeira, reduzindo o uso de produtos químicos tóxicos ao ambiente e à saúde humana (Broda, 2020). Além disso, a utilização de extratos naturais representa uma estratégia promissora na valorização da biomassa florestal e ampliação da sustentabilidade na preservação da madeira.

Nesse contexto, a espécie *Paulownia tomentosa* (Thunb.) Steud. (Paulowniaceae), conhecida popularmente como kiri japonês, caracteriza-se pela madeira com baixa densidade (em torno de 0,35 g/cm³), elevada estabilidade dimensional, boa trabalhabilidade e facilidade de processamento, propriedades as quais favorecem sua utilização na fabricação de móveis,

painéis, instrumentos musicais e materiais compósitos (Esteves et al., 2022). O rápido incremento volumétrico e a elevada produção de biomassa tornam a espécie uma alternativa promissora para sistemas florestais e na obtenção de produtos de maior valor agregado (Lee et al., 2024).

A composição química da madeira de *P. tomentosa* caracteriza-se por elevados teores de holocelulose e extrativos, associados a um baixo teor de lignina quando comparada a outras espécies florestais para finalidade comercial (Welter et al., 2024). Os extrativos indicam a presença de compostos bioativos relacionados à resistência biológica da madeira e à atividade antifúngica de extratos produzidos com a madeira. Esses constituintes químicos evidenciam o potencial da espécie para aplicações tecnológicas no desenvolvimento de produtos de maior valor agregado.

Além disso, extratos vegetais obtidos a partir da madeira de *P. tomentosa* apresentam uma diversidade de metabólitos secundários, incluindo compostos fenólicos, flavonoides e derivados aromáticos. Esses constituintes são reconhecidos por suas propriedades antioxidantes, antimicrobianas e antifúngicas, desempenhando mecanismos naturais contra organismos deterioradores (Seoane et al., 2021). A presença desses metabólitos, associada ao elevado teor de extrativos da espécie, demonstra que extratos vegetais oriundos da madeira podem apresentar potencial para o desenvolvimento de preservantes naturais destinados ao controle de organismos xilófagos.

Nesse sentido, o estudo teve como objetivo avaliar o potencial antifúngico do extrato natural da madeira de *Paulownia tomentosa* frente a fungos deterioradores da madeira.

2. Material e métodos

Para a realização do experimento, foi utilizada uma árvore de *P. tomentosa* obtida por doação de resíduos gerados na atividade de manejo e limpeza de arborização, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), Santa Maria, RS. O material proveniente da madeira foi transformado em serragem e acondicionado em câmara climatizada a temperatura de 20 °C e umidade relativa de 65%. Na sequência, o mesmo foi seco em estufa a temperatura de 40 °C até obter peso constante.

Num primeiro momento foram realizadas as análises das propriedades químicas da madeira de *P. tomentosa*, com o material classificado em agitador de peneiras, na fração 40/60 mesh. As análises foram conduzidas no Laboratório de Química da Madeira (LAQUIM-UFSM), sendo as normativas TAPPI: determinação da umidade (T210 cm-93), teor de cinzas

(T211 om-93), extrativos totais (T204 cm-97) e lignina Klason (T222 om-98). Foram realizadas três repetições de cada amostra em cada análise química.

Para o ensaio fungitóxico em laboratório, o extrato vegetal foi preparado a partir da madeira de *P. tomentosa*, utilizando-se a proporção de 15 g de biomassa para 250 mL de água destilada. A mistura foi acondicionada em um béquer de vidro e submetida à extração em banho-maria, à temperatura de 100 °C, durante 1 hora. Após, o extrato foi filtrado para a separação do material da biomassa. O extrato foi diluído com água destilada em diferentes concentrações: 25%, 50%, 75% e 100%, e todos os tratamentos foram comparados com as testemunhas (amostras sem extrato vegetal).

Os extratos foram misturados com o meio de cultura Batata Dextrose Ágar (BDA) e esterilizado em autoclave a 120 °C por 20 minutos. Posteriormente, o meio de cultura foi vertido em placas de petri de e mantidas em câmara de fluxo até a solidificação.

Na sequência, no centro de cada placa foram dispostos discos miceliais dos fungos *Pycnoporus sanguineus* (PS), *Gloeophyllum trabeum* (GT) e *Chaetomium globosum* (CG), representantes da podridão branca, parda e mole, respectivamente, em cinco repetições por tratamento, em delineamento inteiramente casualizado (DIC). As placas foram armazenadas em incubadora Biochemical Oxygen Demand (BOD) a temperatura de 25 ºC, umidade relativa de 75 ± 5% e fotófase de 12 horas, para as medições do crescimento micelial.

As avaliações foram realizadas com auxílio de paquímetro digital e finalizaram até que os fungos das placas das testemunhas ocupassem toda o espaço da placa. O índice de crescimento micelial (ICM) foi calculado pela Equação 1.

$$\text{ICM} = \frac{C1}{N1} + \frac{C2}{N2} + ... + \frac{Cn}{Nn} \quad (1)$$

Onde:

ICM = Índice de crescimento micelial;

C1, C2, Cn = Crescimento micelial dos fungos na primeira, segunda e última avaliação;

N1, N2, Nn = Número de dias avaliados.

Os dados foram submetidos ao teste de Bartlett e Kolmogorov-Smirnov para verificar a homogeneidade das variâncias e a normalidade dos erros, respectivamente. Foram atendidas todas as pressuposições, não sendo necessário a transformação dos dados. Posteriormente, os mesmos foram avaliados pela análise de variância (ANOVA) e, quando significativo, foram

comparados pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade de erro para comparação das médias, considerando os fatores concentrações do extrato natural e tipos de fungos deterioradores, bem como a interação entre esses fatores, com a utilização do software estatístico Sisvar 5.6 (Ferreira, 2019).

3. Resultados e discussão

Os valores médios da análise química da madeira de *P. tomentosa* evidenciaram elevado teor de extrativos totais (14,31%), indicando potencial para maior resistência natural ao ataque de organismos xilófagos. Além disso, o baixo teor de cinzas (0,45%) indica reduzida concentração de material inorgânico na madeira (Tabela 1).

Tabela 1 – Composição química média da madeira de *Paulownia tomentosa*

Análise química	Valor médio (%)
Umidade	13,23
Cinzas	0,45
Extrativos totais	14,31
Lignina Klason	20,78

Os resultados da composição química da madeira de *P. tomentosa* evidenciaram características do potencial tecnológico da espécie para aplicações de maior valor agregado. O teor de extrativos totais pode estar relacionado com a presença de compostos como fenóis, flavonoides, terpenos e outros metabólitos secundários. Esses compostos caracterizam-se pela durabilidade natural da madeira e associados na atividade antimicrobiana e antifúngica. Os valores obtidos são próximos do estudo realizado por Welter et al. (2024), que encontraram 17,3% de extrativos totais e 0,6% de cinzas.

As diferentes concentrações dos extratos de *P. tomentosa* promoveram diferenças significativas ($p < 0,05$) em relação à testemunha para os fungos PS e GT. (Tabela 2). Os índices de crescimento micelial (ICM) (Figura 1) foram menores para o fungo *G. trabeum*, enquanto que para *P. sanguineus* e *C. globosum* foram nas concentrações de 75 e 100% a maior toxicidade do extrato em estudo.

Tabela 2 – Índice de crescimento micelial (ICM) dos fungos *Pycnoporus sanguineus* (PS), *Gloeophyllum trabeum* (GT) e *Chaetomium globosum* (CG) referente aos extratos naturais com a madeira de *Paulownia tomentosa*

Concentrações (%)	ICM		
	PS	GT	CG
0	50,72 bB	39,94 bB	56,73 bB
25	30,40 abB	8,61 aA	46,33 bB
50	25,12 abB	6,76 aA	32,67 bB
75	19,67 aB	5,34 aA	4,53 aA
100	19,28 aB	2,22 aA	0,47 aA

*Médias nas colunas seguidas por letras minúsculas iguais não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro. *Médias nas linhas seguidas por letras maiúsculas iguais não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro.

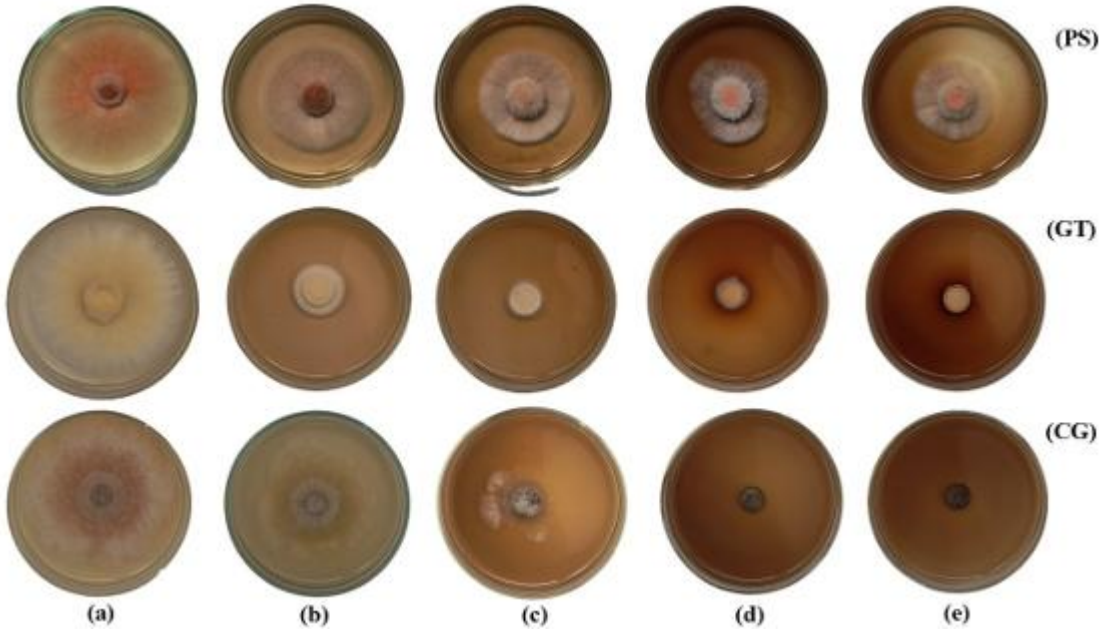


Figura 1 – Crescimento micelial dos fungos *Pycnoporus sanguineus* (PS), *Gloeophyllum trabeum* (GT) e *Chaetomium globosum* (CG) em relação as diferentes concentrações do extrato natural com a madeira de *Paulownia tomentosa*. Testemunha (a), 25% (b), 50% (c), 75% (d) e 100% (e)

O extrato da madeira de *P. tomentosa* apresentou efeito inibitório sobre o crescimento micelial dos três fungos avaliados, sendo observada redução significativa do ICM com o aumento da concentração do extrato. Para *C. globosum*, o extrato teve maior toxicidade, com baixos valores do ICM de 56,73 para a testemunha e de 0,47 na maior concentração testada (100%), indicando elevada sensibilidade do fungo aos compostos presentes no extrato. Para o fungo *G. trabeum* (GT), o ICM reduziu de 39,94 para 2,22 entre a testemunha e concentração de 100%, respectivamente. Já para *P. sanguineus*, embora tenha ocorrido redução significativa do crescimento micelial, os valores permaneceram mais elevados nas maiores concentrações, indicando maior tolerância do fungo aos metabólitos presentes na madeira de *P. tomentosa*.

Segundo Woźniak (2022), esses resultados mostram que os compostos bioativos presentes nos extratos vegetais atuam de forma diferenciada sobre os mecanismos fisiológicos e enzimáticos dos fungos avaliados.

A atividade antifúngica observada neste estudo está associada à composição química da madeira de *P. tomentosa*, a qual apresentou valor médio de 14,31 % de teor de extrativos totais, mostrando a toxicidade dos extrativos presentes contra os fungos testados. A maior resistência de *P. sanguineus* em comparação a *G. trabeum* e *C. globosum* está relacionada à elevada capacidade dos fungos de podridão branca de adaptarem-se ao ambiente e maior tolerância a componentes presentes em extratos, como por exemplo, compostos fenólicos, flavonoides, dentre outros (Civzele & Mezule, 2024, Woźniak et al., 2025). Os resultados encontrados indicam que os extratos da madeira de *P. tomentosa* possuem potencial para aplicação como produtos naturais na preservação de madeira, contribuindo para o desenvolvimento de alternativas mais sustentáveis aos preservantes convencionais.

4. Conclusões

Os extratos aquosos da madeira de *Paulownia tomentosa* apresentaram atividade antifúngica frente aos fungos deterioradores *Pycnoporus sanguineus*, *Gloeophyllum trabeum* e *Chaetomium globosum*, promovendo redução significativa do índice de crescimento micelial com o aumento da concentração dos extratos. Entre as espécies avaliadas, *G. trabeum* e *C. globosum* apresentaram maior sensibilidade aos compostos presentes nos extratos.

O estudo reforça a importância da caracterização química prévia da madeira, uma vez que o elevado teor de extrativos totais evidencia o potencial da espécie como fonte de compostos bioativos, provavelmente associados à inibição do crescimento micelial e à resistência natural da madeira frente a fungos deterioradores.

Dessa forma, os resultados demonstram o potencial da madeira de *P. tomentosa* como fonte de preservantes naturais para o controle de fungos deterioradores, contribuindo para o desenvolvimento de tecnologias mais sustentáveis para a preservação da madeira.

5. Referências bibliográficas

Broda, M. 2020. Natural Compounds for Wood Protection against Fungi - A Review. Molecules, 25(15), 1-24. https://doi.org/ 10.3390/molecules25153538.

Civzele, A. & Mezule, L. (2024). Isolation and screening of wood-decaying fungi for lignocellulolytic enzyme production and bioremediation processes. Frontiers in Fungal Biology, 5, 1-13. https://doi.org/10.3389/ffunb.2024.1494182.

Esteves, B., Lopes, L. C., Viana, H., Ferreira, J., Domingos, I. & Nunes, L. J. R. (2022). Forests, 13(5), 1-12. https://doi.org/10.3390/f13050700.

Ezeilo, U. R., Zakaria, I. I., Huyop, F. & Wahab, R. A. (2017). Enzymatic Breakdown of Lignocellulosic Biomass: The Role of Glycosyl Hydrolases and Lytic Polysaccharide Monooxygenases. Biotechnol. Biotechnol. Equip, 31, 647-662. https://doi.org/10.1080/13102818.2017.1330124.

Ferreira, D. F. (2019). SISVAR: A computer analysis system to fixed effects split plot type designs. Revista Brasileira de Biometria, 37(4), 529-535. https://doi.org/10.28951/rbb.v37i4.450.

Kirker, G., Hassan, B., Mankowski, M. E. & Eller, F. J. 2024. Critical Review on the Use of Extractives of Naturally Durable Woods as Natural Wood Protectants. Insects, 15(1), 1-16. https://doi.org/10.3390/insects15010069.

Lee, L. Q., Zhao, H., Ge, J., Zhou, Y. & Li, H. (2024). Valorization of fast-growing Paulownia wood to green chemicals and green hydrogen. Green Chem., 26(4), 1949-1963. https://doi.org/10.1039/d3gc03458e.

Martín, J. A. & López, R. (2023). Biological Deterioration and Natural Durability of Wood in Europe. Forests, 14(2), 1-34. https://doi.org/10.3390/f14020283.

Seoane, P. R., Reinoso, B. D. & Domínguez, H. (2021). Pressurized Solvent Extraction of *Paulownia* Bark Phenolics. Molecules, 27(1), 254. https://doi.org/ 10.3390/molecules27010254.

Technical association of the pulp and paper industry. 1997. TAPPI - T 204 cm-97: Solvent extractives of wood and pulp: Standards Regulations and Style Guidelines. Atlanta: TAPPI Press.

Technical association of the pulp and paper industry. 1997. TAPPI - T 210 cm-93: Sampling and testing wood pulp shipments for moisture. Atlanta: TAPPI Press.

Technical association of the pulp and paper industry. 1997. TAPPI - T 211 om-93: Ash in Wood, Pulp, Paper, and Paperboard: Combustion at 525 ºC. Atlanta: TAPPI Press.

Technical association of the pulp and paper industry. TAPPI - T 222 om-98: Acid Insoluble Lignin in Wood and Pulp. Atlanta: TAPPI Press, 1997.

Welter, C. A., Roso, M. da S., Farias, D. T. de, Schimitt, E., Silva, D. M. da, Wacht, W. L., Martins, V. de M., Ratzlaff, F. R., Coldebella, R., Silva, G. T. da, Pedrazzi, C. (2024). Physicochemical properties of *Paulownia tomentosa* Steud. Wood. Ciência Florestal, 34(4), 1-19. https://doi.org/10.5902/1980509885562.

Woźniak, M. 2022. Antifungal agents in wood protection - a review. Molecules, 27(19), 1-30. https://doi.org/10.3390/molecules27196392.

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Potencial da casca de *Araucaria angustifolia* na estabilidade dimensional de painéis aglomerados de *Pinus* spp.

Marine Alves Antonello[1]; Alexsandro Bayestorff da Cunha[1]; Camila Alves Corrêa[1]; Tarcísio Francisco de Camargo[1]; Ricardo Ritter de Souza Barnasky[1]; Maickele Aparecida Muniz[1]; Marcelo Callegari Scipioni[2]; Nicolas Costa Pucci[1]

[1] Universidade do Estado de Santa Catarina – UDESC/CAV
[2] Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC

Resumo: O uso de resíduos lignocelulósicos na produção de painéis de partículas representa uma alternativa aos materiais florestais por reduzir a dependência de madeira convencional. Este trabalho avaliou as propriedades físicas de painéis de baixa densidade produzidos com partículas de *Pinus* spp. e casca de *Araucaria angustifolia*, colados com resina poliuretana à base de mamona. Os painéis foram produzidos com densidade nominal de 600 kg.m^{-3}, 12% de resina e prensagem a 100 °C, 4 MPa, por 10 minutos, em cinco tratamentos: 100% *Pinus*; 75% *Pinus* e 25% casca; 50% *Pinus* e 50% casca; 25% *Pinus* e 75% casca; e 100% casca. Foram avaliadas as propriedades de densidade aparente, razão de compactação, teor de umidade e inchamento em espessura. A densidade ficou dentro dos parâmetros de classificação para baixa densidade, a razão de compactação foi superior a 1,3, e o inchamento permaneceu abaixo de 22%. Conclui-se que a casca de *A. angustifolia* apresenta potencial para compor painéis de baixa densidade, principalmente pela estabilidade dimensional observada.

Palavras-chave: Resíduo florestal; Estabilidade dimensional; Adesivo sustentável.

Potential of *Araucaria angustifolia* Bark on the Dimensional Stability of *Pinus* spp. Particleboards

Abstract: The use of lignocellulosic residues in particleboard production represents an alternative to add value to forest materials and reduce dependence on conventional wood. This study evaluated the physical properties of low-density particleboards produced with *Pinus* spp. particles and *Araucaria angustifolia* bark, bonded with castor oil-based polyurethane resin. Five treatments were evaluated: 100% *Pinus*; 75% *Pinus* and 25% bark; 50% *Pinus* and 50% bark; 25% *Pinus* and 75% bark; and 100% bark. The panels were produced with a nominal density of 600 kg.m^{-3}, 12% resin content, and hot pressing at 100 °C and 4 MPa for 10 minutes. Apparent density, compaction ratio, moisture content, and thickness swelling were evaluated. Density ranged from 528 to 614 kg.m^{-3}, classifying all panels as low-density particleboards. The compaction ratio was higher than 1.3, and thickness swelling remained below 22%. It is concluded that *A. angustifolia* bark has potential for use in low-density particleboards, mainly due to the dimensional stability observed.

Keywords: Forest Residue; Dimensional Stability; Sustainable Adhesive.

1. Introdução

A indústria de painéis de madeira reconstituída possui grande importância para o aproveitamento de partículas, cavacos, resíduos de serraria e outros materiais lignocelulósicos. Tradicionalmente, painéis aglomerados são produzidos com partículas de *Pinus* spp. e/ou *Eucalyptus* spp., associadas a adesivos sintéticos. Embora esse modelo seja consolidado industrialmente, a pressão sobre a matéria-prima madeireira, o custo de produção e a necessidade de aproveitamento de resíduos têm estimulado pesquisas com materiais alternativos para compor estes painéis (Mendes et al., 2012; Trianoski et al., 2013).

Estudos com diferentes resíduos, como bagaço de cana, fibras de coco, cascas e galhos, demonstram que materiais lignocelulósicos alternativos podem ser incorporados aos painéis, desde que suas características físicas, químicas e geométricas sejam compatíveis com o processo de produção e com o desempenho final do produto (Fiorelli et al., 2011; Fiorelli et al., 2012; Rios et al., 2015).

Entre os resíduos de interesse, a casca de *A. angustifolia* pode apresentar potencial tecnológico por ser um material lignocelulósico proveniente de uma espécie representativa da região Sul do Brasil. Hess et al. (2018) destacam que o manejo da *A. angustifolia* deve estar associado à conservação da espécie e ao conhecimento de suas taxas de crescimento. Assim, o uso de seus resíduos deve estar vinculado a fontes legalmente disponíveis, como material oriundo de queda natural, manejo autorizado ou descarte proveniente de atividades permitidas. No caso de painéis reconstituídos, a incorporação de resíduos de *A. angustifolia* pode representar uma alternativa para ampliar o aproveitamento de biomassa e reduzir a dependência exclusiva de madeira industrial. Rios et al. (2015), ao avaliarem painéis produzidos com partículas de galhos secos de *A. angustifolia* e madeira de *Eucalyptus grandis*, indicaram a viabilidade técnica do uso de resíduos dessa espécie na produção de painéis.

A avaliação de propriedades físicas, como densidade aparente, teor de umidade e inchamento em espessura, é uma etapa fundamental no estudo de painéis de partículas, pois essas variáveis estão diretamente relacionadas ao controle de qualidade, à estabilidade dimensional e à possibilidade de uso do produto.

Além da matéria-prima lignocelulósica, o tipo de adesivo utilizado exerce influência direta no desempenho físico e na estabilidade dimensional dos painéis de partículas. Na indústria de painéis reconstituídos, adesivos à base de formaldeído, como a ureia-formaldeído, são amplamente empregados devido ao baixo custo e à eficiência de colagem. No entanto, seu

uso tem sido discutido em razão das emissões de formaldeído e das crescentes exigências ambientais associadas à produção, uso e descarte desses materiais (Cardozo et al., 2023).

Nesse contexto, a resina poliuretana à base de óleo de mamona apresenta-se como uma alternativa de origem vegetal para a colagem de partículas lignocelulósicas, além de apresentar caráter mais hidrofóbico em comparação a adesivos convencionais, podendo contribuir para a redução da afinidade do painel com a água. Fiorelli et al. (2012), ao avaliarem painéis produzidos com fibra de coco e resina poliuretana de mamona, observaram menor absorção de água e menor inchamento em espessura quando comparados aos painéis produzidos com ureia-formaldeído. De forma semelhante, Marinho et al. (2013) verificaram que o aumento do teor de poliuretano derivado de óleo de mamona em compósitos com partículas de bambu promoveu redução no teor de umidade, na absorção de água e no inchamento.

Assim, o objetivo deste trabalho foi avaliar as propriedades físicas de painéis de partículas de baixa densidade produzidos com diferentes proporções de partículas de *Pinus* spp. e casca de *A. angustifolia*, colados com resina poliuretana à base de mamona, considerando a densidade aparente, a razão de compactação, o teor de umidade e o inchamento em espessura. Dessa forma, pretende-se gerar informações sobre proporções tecnicamente viáveis de incorporação da casca em painéis de baixa densidade, sem comprometer a estabilidade dimensional e contribuindo para a agregação de valor a esse resíduo em comparação ao seu uso tradicional para geração de energia.

2. Material e métodos

As partículas de *Pinus* spp. utilizadas neste estudo foram obtidas a partir do processo produtivo de uma empresa de painéis, enquanto as cascas de *A. angustifolia* foram provenientes de árvores centenárias que caíram após eventos de chuvas extremas no Parque Ecológico René Frey, localizado em Fraiburgo, Santa Catarina (Scipioni et al., 2026).

Após a obtenção dos materiais, as partículas de *Pinus* spp. foram processadas em moinho, visando adequar suas granulometrias para a produção dos painéis. As cascas de *A. angustifolia* foram saturadas em água por 72 horas antes da moagem, com o objetivo de facilitar o processamento e obter partículas de melhor qualidade, uma vez que o material seco apresentava tendência à formação de pó e partículas menores que as desejadas. O tempo de saturação foi definido após testes preliminares realizados com períodos menores, de 24 e 48 horas, nos quais o material ainda apresentava dificuldade de processamento. Após esse processo, os materiais foram secos em estufa a 103 °C até atingirem aproximadamente 3% de

umidade, buscando reduzir e padronizar o teor de umidade das partículas antes da aplicação do adesivo. Em seguida, os materiais foram classificados em peneiras, sendo as partículas de *Pinus* spp. classificadas em malha 12 mesh, conforme procedimentos rotineiros do laboratório para essa espécie, e as partículas de casca de *A. angustifolia* em malha 4 mesh, de acordo com a análise visual das partículas obtidas.

A colagem das partículas foi realizada com resina poliuretana AG 1315, fornecida pela Imperveg, composta por pré-polímero e poliol. Os componentes foram misturados na proporção de 1:1,5, conforme recomendação de aplicação, e o teor de resina utilizado foi de 12% em relação à massa seca das partículas. A escolha da resina poliuretana à base de mamona foi baseada no interesse por adesivos de origem vegetal e na possibilidade de substituir sistemas adesivos com formaldeído.

O plano experimental foi composto por cinco tratamentos, definidos pela variação da proporção de partículas de *Pinus* spp. e casca de *A. angustifolia*. A densidade nominal dos painéis foi estabelecida em 600 $kg.m^{-3}$, valor compatível com a classificação de painéis de baixa densidade, conforme a norma ANSI A208.1 (2016), que considera nessa classe os painéis com densidade inferior a 640 $kg.m^{-3}$. O ciclo de prensagem foi definido com temperatura de 100 °C, pressão específica de 4 MPa e tempo de 10 minutos, conforme Fiorelli et al. (2011).

A determinação das propriedades físicas foi realizada conforme a ASTM D1037 (2012), com exceção da razão de compactação, calculada pela relação entre a densidade aparente dos painéis e a densidade das partículas. Para esse cálculo, foram consideradas as densidades de 380 $kg.m^{-3}$ para as partículas de *Pinus* spp. e 410 $kg.m^{-3}$ para as partículas de casca de *A. angustifolia*. As propriedades avaliadas foram: densidade aparente, razão de compactação, teor de umidade e inchamento em espessura.

Os resultados foram submetidos à estatística paramétrica por meio de análise de variância. Quando observadas diferenças significativas entre os tratamentos, aplicou-se o teste de Scott-Knott, considerando 95% de probabilidade. Os valores médios também foram comparados com os requisitos da ANSI A208.1 (2016), para classificação dos painéis de baixa densidade, e com a NBR 14810 (2018), utilizada como referência para o inchamento em espessura.

3. Resultados e discussão

Os resultados das propriedades físicas e de estabilidade dimensional dos painéis estão apresentados na Tabela 1. De maneira geral, a variação na proporção de partículas de *Pinus* spp. e casca de *A. angustifolia* influenciou a densidade aparente, a razão de compactação, o teor de umidade e o inchamento em espessura. Esse comportamento demonstra que a substituição da matéria-prima tradicional por casca altera a estrutura interna do painel e pode modificar a interação entre partículas, resina e água.

Tabela 1 – Propriedades físicas e estabilidade dimensional dos painéis

Tratamento	Densidade aparente ($kg.m^{-3}$)	Razão de Compactação	Teor de umidade (%)	Inchamento em espessura (%)
T1 **100P-0A**	528 c (4,18)	1,39 c (4,18)	9,41 a (1,07)	13,78 b (8,65)
T2 **75P-25A**	533 c (6,19)	1,37 c (6,19)	9,89 a (1,56)	14,58 b (7,21)
T3 **50P-50A**	572 b (6,27)	1,45 b (6,27)	10,19 b (0,99)	17,64 c (5,22)
T4 **25P-75A**	614 a (3,81)	1,52 a (3,81)	10,69 c (1,26)	13,99 b (14,15)
T5 **0P-100A**	612 a (7,22)	1,61 a (7,22)	11,12 d (0,78)	10,71 a (24,90)

Legenda: P: partículas de *Pinus* spp.; A: casca de *Araucaria angustifolia*. Os números após as letras P e A indicam a porcentagem de cada matéria-prima no tratamento. Valores entre parênteses correspondem ao coeficiente de variação (%). Médias seguidas pela mesma letra na coluna não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Scott-Knott a 5% de significância.

A densidade aparente dos painéis foi influenciada pela proporção de casca de *A. angustifolia* na composição dos tratamentos. Os menores valores foram observados em T1 e T2, enquanto T4 e T5 apresentaram as maiores médias, indicando que a maior participação da casca contribuiu para o aumento da densidade dos painéis. Mesmo com essa variação, todos os tratamentos permaneceram abaixo de 640 $kg.m^{-3}$, enquadrando-se como painéis de baixa densidade, conforme a ANSI A208.1 (2016). O tratamento T5 apresentou densidade aproximadamente 15,9% superior à de T1, evidenciando que a substituição total das partículas de *Pinus* spp. pela casca aumentou a massa específica aparente sem descaracterizar a classe de densidade proposta.

A razão de compactação variou de 1,37 a 1,61, com maiores valores nos tratamentos com maior proporção de casca de *A. angustifolia*. Esse aumento acompanhou a elevação da densidade aparente, indicando maior adensamento do colchão durante a prensagem. Todos os tratamentos apresentaram razão de compactação superior a 1,3, valor considerado adequado para a consolidação de painéis de partículas. Dias et al. (2005) destacam que essa variável está relacionada à qualidade de ligação entre as partículas e pode influenciar o desempenho físico

dos painéis. Nas condições avaliadas, a maior compactação observada em T4 e T5 pode ter favorecido a estabilidade dimensional, especialmente pela redução de espaços vazios internos.

O teor de umidade aumentou com a elevação da proporção de casca de *A. angustifolia*. Os tratamentos T1 e T2 apresentaram médias de 9,41% e 9,89%, respectivamente, permanecendo dentro do limite máximo de 10% recomendado pela ANSI A208.1 para o produto acabado. A partir de T3, os valores ultrapassaram esse limite, atingindo 10,19% em T3, 10,69% em T4 e 11,12% em T5. Esse comportamento indica que a substituição de 50% ou mais das partículas de *Pinus* spp. pela casca aumentou a retenção de umidade nos painéis, possivelmente em razão da maior heterogeneidade, porosidade e superfície irregular das partículas desse resíduo. Rios et al. (2015), ao avaliarem painéis produzidos com resíduos de *A. angustifolia*, também indicaram que materiais provenientes dessa espécie podem influenciar o comportamento físico dos painéis. Assim, os resultados evidenciam a necessidade de maior controle tecnológico quando a casca for utilizada em proporções iguais ou superiores a 50%, especialmente quanto à umidade inicial das partículas, ao tempo de secagem, ao condicionamento dos painéis após a prensagem e ao armazenamento em ambiente com umidade relativa controlada.

Para o inchamento em espessura, os valores médios variaram de 10,71 a 17,64%, permanecendo abaixo do limite de 22% estabelecido pela NBR 14810 para inchamento após 24 horas. O maior valor foi observado em T3, enquanto o menor ocorreu em T5, composto por 100% de casca. O inchamento de T5 foi aproximadamente 39% inferior ao de T3 e cerca de 22% inferior ao de T1, indicando que o aumento da proporção de casca contribuiu para reduzir a variação dimensional dos painéis.

A menor variação dimensional nos tratamentos com maior teor de casca pode estar relacionada, principalmente, à maior densificação do colchão. O tratamento T5 apresentou a maior razão de compactação e o menor inchamento em espessura, indicando que a estrutura mais adensada pode ter reduzido a quantidade de espaços vazios disponíveis para a entrada e movimentação de água. Dessa forma, visto que a caracterização química da casca não foi o foco desta etapa do estudo, a razão de compactação constitui a explicação mais consistente para o melhor desempenho dimensional observado nos tratamentos com maior proporção desse resíduo.

Além disso, características químicas da casca, como a presença de extrativos, também podem ter contribuído para menor afinidade do painel com a água. Yemele et al. (2008) observaram que características químicas e geométricas da casca influenciam o inchamento em espessura de painéis de partículas, enquanto Nemli et al. (2006) verificaram que extrativos de casca podem melhorar a resistência ao inchamento.

A estabilidade dimensional observada pode estar associada, em parte, ao uso da resina poliuretana à base de óleo de mamona. Fiorelli et al. (2012), ao avaliarem painéis produzidos com resina poliuretana de mamona, observaram desempenho físico favorável e redução da absorção de água em determinados tratamentos. De forma semelhante, Marinho et al. (2013) verificaram redução no teor de umidade, na absorção de água e no inchamento em compósitos com partículas de bambu e poliuretano derivado de óleo de mamona. Embora o teor de resina tenha sido mantido constante em 12%, esses resultados reforçam a importância do sistema adesivo na estabilidade dimensional dos painéis.

Os resultados também estão de acordo com Trianoski et al. (2013), que observaram que a inclusão de casca em painéis aglomerados não comprometeu, necessariamente, o desempenho físico dos materiais avaliados. No entanto, esse efeito depende da espécie utilizada, da granulometria, da proporção incorporada, da densidade do painel e do sistema adesivo empregado. Assim, os resultados obtidos reforçam que a casca de *A. angustifolia* pode ser incorporada aos painéis de baixa densidade, desde que seu uso seja associado ao controle adequado do processo produtivo.

Considerando conjuntamente as propriedades físicas avaliadas, os tratamentos com maior proporção de casca apresentaram maior densidade aparente, maior razão de compactação e menor inchamento em espessura, especialmente T5. Por outro lado, esses tratamentos também apresentaram maior teor de umidade, ultrapassando o limite de 10% a partir de T3. Assim, o desempenho físico dos painéis não deve ser interpretado por uma única variável, mas pelo equilíbrio entre densidade, estabilidade dimensional, controle de umidade e finalidade de uso. De modo geral, a casca de *A. angustifolia* mostrou-se promissora para compor painéis de partículas de baixa densidade, desde que sejam realizados ajustes no controle de secagem, condicionamento e armazenamento do produto.

4. Conclusões

Os painéis produzidos com partículas de *Pinus* spp. e casca de *A. angustifolia*, colados com resina poliuretana à base de óleo de mamona, foram classificados como painéis de baixa densidade, uma vez que todos os tratamentos apresentaram densidade média inferior a 640 $kg.m^{-3}$.

A inclusão da casca de *A. angustifolia* influenciou as propriedades físicas dos painéis, promovendo aumento da densidade aparente e da razão de compactação nos tratamentos com maior proporção desse resíduo. O teor de umidade aumentou com o incremento da quantidade de casca, ultrapassando o limite de 10% a partir do tratamento T3, o que indica a necessidade de ajustes no controle de secagem das partículas, condicionamento dos painéis e armazenamento do produto.

Todos os tratamentos apresentaram inchamento em espessura inferior ao limite de 22%, com menor valor médio observado em T5, composto por 100% de casca. Esse resultado evidencia o potencial da casca de *A. angustifolia* para contribuir com a estabilidade dimensional dos painéis.

Com base nas propriedades físicas avaliadas, conclui-se que a casca de *A. angustifolia* apresenta potencial para compor painéis de partículas de baixa densidade, tanto em mistura com partículas de *Pinus* spp. quanto em maior proporção. A principal contribuição deste trabalho está em demonstrar que esse resíduo florestal pode ser utilizado como matéria-prima alternativa em painéis aglomerados, sem comprometer a classificação de baixa densidade e com desempenho favorável quanto ao inchamento em espessura. Recomenda-se, em estudos futuros, avaliar diferentes teores de resina poliuretana à base de mamona e condições de secagem, visando otimizar o controle de umidade e a estabilidade dimensional dos painéis.

5. Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio da Universidade do Estado de Santa Catarina (UDESC) e da Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação de Santa Catarina (FAPESC) ao desenvolvimento da pesquisa.

6. Referências bibliográficas

American National Standards Institute. (2016). *ANSI A208.1: Particleboard*. Composite Panel Association.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2018). *ABNT NBR 14810: Painéis de partículas de madeira*. ABNT.

ASTM International. (2012). *ASTM D1037-12: Standard test methods for evaluating properties of wood-base fiber and particle panel materials*. ASTM International. https://doi.org/10.1520/D1037-12

Cardozo, J. C., Carvalho, A. M. de, Batalha, L. A. R., Gomes, F. J. B., Cardozo, R. N., Salomão, M. S., & Cruz, L. A. (2023). Evaluation of the emission of formaldehyde from wood-based panels (MDFs and MDPs) in Brazil after use. *Floresta e Ambiente, 30*, e20220079. https://doi.org/10.1590/2179-8087-FLORAM-2022-0079

Dias, F. M., Nascimento, M. F. do, Martinez-Espinosa, M., Lahr, F. A. R., & Valarelli, I. D. D. (2005). Relation between the compaction rate and physical and mechanical properties of particleboards. *Materials Research, 8*(3), 329–333. https://doi.org/10.1590/S1516-14392005000300018

Fiorelli, J., Curtolo, D. D., Barrero, N. G., Savastano Júnior, H., Pallone, E. M. J. A., & Johnson, R. (2012). Particulate composite based on coconut fiber and castor oil polyurethane adhesive: An eco-efficient product. *Industrial Crops and Products, 40*, 69–75. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2012.02.033

Fiorelli, J., Lahr, F. A. R., Nascimento, M. F. do, Savastano Júnior, H., & Rossignolo, J. A. (2011). Painéis de partículas à base de bagaço de cana e resina de mamona: Produção e propriedades. *Acta Scientiarum. Technology, 33*(4), 401–406. https://doi.org/10.4025/actascitechnol.v33i4.9615

Hess, A. F. F., Loiola, T., Souza, I. A. de, Minatti, M., Ricken, P., & Borsoi, G. A. (2018). Forest management for the conservation of *Araucaria angustifolia* in Southern Brazil. *Floresta, 48*(3), 373–382. https://doi.org/10.5380/rf.v48i3.55452

Marinho, N. P., Nascimento, E. M., Nisgoski, S., Magalhães, W. L. E., Claro Neto, S., & Azevedo, E. C. (2013). Caracterização física e térmica de compósito de poliuretano derivado de óleo de mamona associado com partículas de bambu. *Polímeros, 23*(2), 201–205. https://doi.org/10.4322/S0104-14282013005000007

Mendes, L. M., Guimarães Júnior, J. B., Santos, R. C. dos, & César, A. A. da S. (2012). Efeito da associação de bagaço de cana, do tipo e do teor de adesivo na produção de painéis aglomerados. *Ciência Florestal, 22*(1), 161–170. https://doi.org/10.5902/198050985088

Nemli, G., Gezer, E. D., Yildiz, S., Temiz, A., & Aydin, A. (2006). Evaluation of the mechanical, physical properties and decay resistance of particleboard made from particles impregnated with *Pinus brutia* bark extractives. *Bioresource Technology, 97*(16), 2059–2064. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2005.09.013

Rios, P. D. A., Vieira, H. C., Stupp, Â. M., Kniess, D. D. C., Borba, M. H., & Cunha, A. B. da. (2015). Avaliação física e mecânica de painéis reconstituídos compostos por partículas de galhos secos de *Araucaria angustifolia* (Bertol.) Kuntze e madeira de *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden. *Scientia Forestalis, 43*(106), 283–289.

Scipioni, M. C., Seeber, A., Alvares, C. A., Schmitt, D. E., Delben, G. J., & Cysneiros, V. C. (2026). Climate-driven tree failures: How extreme rainfall threatens the survival of monumental *Araucaria angustifolia* trees. *Agricultural and Forest Meteorology, 384*, 111168. https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2026.111168

Trianoski, R., Iwakiri, S., Matos, J. L. M. de, & Prata, J. G. (2013). Propriedades físicas e mecânicas de painéis de madeira aglomerada de *Acrocarpus fraxinifolius*, compostos com diferentes percentuais de casca. *Ciência Florestal, 23*(4), 761–769. https://doi.org/10.5902/1980509812360

Yemele, M. C. N., Blanchet, P., Cloutier, A., & Koubaa, A. (2008). Effects of bark content and particle geometry on the physical and mechanical properties of particleboard made from black spruce and trembling aspen bark. *Forest Products Journal, 58*(11), 48–56.

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Potencial da casca de *Araucaria angustifolia* na resistência mecânica de painéis aglomerados de *Pinus* spp.

Marine Alves Antonello[1]; Alexsandro Bayestorff da Cunha[1]; Camila Alves Corrêa[1]; Tarcísio Francisco de Camargo[1]; Ricardo Ritter de Souza Barnasky[1]; Maickele Aparecida Muniz[1]; Marcelo Callegari Scipioni[2]; Nicolas Costa Pucci[1]

[1] Universidade do Estado de Santa Catarina – UDESC/CAV
[2] Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC

Resumo: Esta pesquisa teve como objetivo avaliar as propriedades mecânicas de painéis de baixa densidade produzidos com partículas de *Pinus* spp. e casca de *A. angustifolia* e colados com resina poliuretana à base de mamona. Foram avaliados cinco tratamentos, constituídos pelas proporções de 100% *Pinus*, 75% *Pinus* e 25% de casca, 50% *Pinus* e 50% de casca, 25% *Pinus* e 75% de casca e 100% de casca. Os painéis foram produzidos com densidade nominal de 600 kg·m^{-3} e 12% de resina e prensados a 100 °C e 4 MPa por 10 minutos. Avaliaram-se o módulo de ruptura (MOR), o módulo de elasticidade (MOE), a tração perpendicular e o arrancamento de parafuso. O aumento da proporção de casca reduziu principalmente o MOR e o MOE, enquanto a tração perpendicular não diferiu entre os tratamentos. A composição com 25% de casca preservou o MOR e o arrancamento de parafuso, apresentando o melhor equilíbrio entre o aproveitamento do resíduo e o desempenho mecânico.
Palavras-chave: Qualidade tecnológica; Adesivo sustentável; Matéria-prima alternativa.

Potential of *Araucaria angustifolia* bark on the mechanical performance of *Pinus* spp. particleboards

Abstract: This study aimed to evaluate the mechanical properties of low-density particleboards produced with *Pinus* spp. particles and *A. angustifolia* bark and bonded with castor oil-based polyurethane resin. Five treatments were evaluated, consisting of the following proportions: 100% *Pinus*, 75% *Pinus* and 25% bark, 50% *Pinus* and 50% bark, 25% *Pinus* and 75% bark, and 100% bark. The panels were manufactured with a nominal density of 600 kg·m^{-3} and 12% resin and pressed at 100 °C and 4 MPa for 10 minutes. Modulus of rupture (MOR), modulus of elasticity (MOE), internal bond strength, and screw withdrawal resistance were evaluated. Increasing the proportion of bark primarily reduced MOR and MOE, whereas internal bond strength did not differ among treatments. The composition containing 25% bark maintained MOR and screw withdrawal resistance, providing the best balance between residue utilization and mechanical performance.
Keywords: Technological quality; Sustainable adhesive; Alternative raw material.

1. Introdução

A indústria de painéis de madeira reconstituída possui grande importância para o aproveitamento de partículas, cavacos, resíduos de serraria e outros materiais lignocelulósicos. Tradicionalmente, os painéis aglomerados são produzidos com partículas de *Pinus* spp. e/ou *Eucalyptus* spp., associadas a adesivos sintéticos. Embora esse modelo seja consolidado industrialmente, a pressão sobre a matéria-prima madeireira, o custo de produção e a

necessidade de melhor aproveitamento da biomassa têm estimulado pesquisas com materiais alternativos para compor esses painéis (Lee et al., 2022; Faria et al., 2024).

A incorporação de resíduos lignocelulósicos pode agregar valor à materiais de menor uso comercial, mas seu desempenho depende das características das partículas, como granulometria, geometria, superfície de contato, presença de extrativos e capacidade de compactação. Esses fatores interferem na adesão, na formação do colchão e na transferência de esforços, influenciando propriedades como resistência à flexão, rigidez, ligação interna e fixação de parafusos (Barbirato et al., 2014; Rios et al., 2015; Lee et al., 2022). Entre essas características, a relação entre o comprimento e a espessura das partículas, expressa pela razão de esbeltez, é particularmente relevante para o comportamento dos painéis, uma vez que a geometria interfere na área de contato entre partículas, na distribuição do adesivo e na transferência de esforços no painel (Buzo et al., 2019).

A casca de *A. angustifolia*, por sua vez, apresenta potencial como matéria-prima alternativa para a produção de painéis reconstituídos. A espécie possui elevada importância ecológica e é característica da região Sul do Brasil. Hess et al. (2018) destacam que o manejo de *A. angustifolia* deve estar associado à conservação da espécie. Assim, o aproveitamento de seus resíduos deve ocorrer a partir de fontes legalmente disponíveis, como material proveniente de queda natural, manejo autorizado ou descarte decorrente de atividades permitidas.

O uso de resíduos de *A. angustifolia* em painéis reconstituídos já foi indicado como tecnicamente viável por Rios et al. (2015), que avaliaram partículas de galhos secos dessa espécie associadas à madeira de *Eucalyptus grandis*. Entretanto, ainda são limitadas as informações sobre o desempenho mecânico de painéis de baixa densidade produzidos especificamente com casca de *A. angustifolia*, partículas de *Pinus* spp. e adesivo de origem vegetal. A contribuição específica deste estudo consiste em avaliar essa combinação de matérias-primas e identificar proporções que permitam incorporar a casca sem comprometer o desempenho mecânico dos painéis.

Além da matéria-prima, o adesivo exerce influência direta no desempenho dos painéis. As resinas à base de formaldeído, como a ureia-formaldeído, são amplamente empregadas na indústria, mas seu uso tem sido discutido em razão das emissões de formaldeído e das exigências ambientais associadas à produção e ao uso desses materiais (Cardozo et al., 2023). Nesse sentido, a resina poliuretana à base de óleo de mamona apresenta-se como alternativa de origem vegetal para a colagem de partículas lignocelulósicas. Buzo et al. (2019) observaram maior eficiência desse adesivo em painéis constituídos por partículas de *Pinus* e bagaço de cana,

em comparação à ureia-formaldeído. Outros estudos com fibra de coco e resíduos agroflorestais também demonstram a viabilidade da poliuretana de mamona na produção de compósitos particulados (Fiorelli et al., 2012; Fiorelli et al., 2013; Faria et al., 2024).

Diante disso, o objetivo deste trabalho foi avaliar as propriedades mecânicas de painéis de partículas de baixa densidade produzidos com diferentes proporções de partículas de *Pinus* spp. e casca de *A. angustifolia*, colados com resina poliuretana à base de mamona, considerando o módulo de ruptura, o módulo de elasticidade, a tração perpendicular e o arrancamento de parafuso.

2. Material e métodos

As partículas de *Pinus* spp. utilizadas neste estudo foram obtidas a partir do processo produtivo de uma empresa de painéis, enquanto a casca de *A. angustifolia* foi proveniente de uma árvore centenária que caiu após evento de chuva extrema no Parque Ecológico René Frey, localizado em Fraiburgo, Santa Catarina (Scipioni et al., 2026).

Após a obtenção dos materiais, as partículas de *Pinus* spp. foram processadas em moinho para adequação da granulometria destinada à produção dos painéis. As cascas de *A. angustifolia* foram saturadas em água por 72 horas antes da moagem, com o objetivo de facilitar o processamento e reduzir a formação de pó e de partículas menores que as desejadas. O tempo de saturação foi definido após testes preliminares de 24 e 48 horas, nos quais o material ainda apresentou dificuldade de processamento. Posteriormente, os materiais foram secos em estufa a 103 °C até atingirem aproximadamente 3% de umidade, buscando reduzir e padronizar o teor de umidade antes da aplicação do adesivo. Em seguida, as partículas foram classificadas, utilizando peneiras com abertura nominal de 2,00 mm para as partículas de *Pinus* spp., conforme procedimentos rotineiros do laboratório para essa espécie, e de 6,3 mm para as partículas de casca de A. *angustifolia*, de acordo com as características do material obtido.

Para a caracterização geométrica das matérias-primas, foram selecionadas aleatoriamente 100 partículas de *Pinus* spp. e 100 de casca de *A. angustifolia*, seguindo procedimento semelhante ao de Sozim et al. (2021). O comprimento e a espessura de cada partícula foram mensurados com paquímetro digital, e a razão de esbeltez foi obtida pela relação entre essas dimensões.

A colagem das partículas foi realizada com resina poliuretana AG 1315, fornecida pela Imperveg, composta por pré-polímero e poliol. Os componentes foram misturados na proporção de 1:1,5, conforme recomendação de aplicação, e o teor de resina utilizado foi de 12% em relação à massa seca das partículas.

O plano experimental foi composto por cinco tratamentos: T1 (100% *Pinus* spp.), T2 (75% *Pinus* spp. e 25% de casca), T3 (50% *Pinus* spp. e 50% de casca), T4 (25% *Pinus* spp. e 75% de casca) e T5 (100% de casca). A densidade nominal foi estabelecida em 600 kg·m^{-3}, compatível com a classificação de painéis de baixa densidade adotada pela ANSI A208.1 (2016), que contempla painéis com densidade inferior a 640 kg·m^{-3}. O ciclo de prensagem foi realizado a 100 °C, com pressão específica de 4 MPa, durante 10 minutos, conforme Fiorelli et al. (2011).

Após a prensagem, os painéis foram acondicionados para estabilização e posteriormente seccionados para obtenção dos corpos de prova. A determinação das propriedades mecânicas foi realizada conforme a norma ASTM D1037 (2012). As propriedades mecânicas avaliadas foram módulo de ruptura (MOR), módulo de elasticidade (MOE), tração perpendicular (TP) e arrancamento de parafuso no topo e na face dos painéis.

Os resultados foram submetidos à análise de variância e, quando observadas diferenças significativas entre os tratamentos, aplicou-se o teste de Scott-Knott a 5% de probabilidade. Além disso, os valores médios foram comparados com os limites estabelecidos pela ANSI A208.1 (2016), para painéis de baixa densidade.

3. Resultados e discussão

As propriedades mecânicas dos painéis de baixa densidade estão apresentadas na Tabela 1. O efeito da incorporação da casca de *A. angustifolia* variou de acordo com a propriedade avaliada.

Tabela 1- Propriedades de resistência e rigidez

Tratamento	Flexão estática (MPa)		TP (MPa)	Arrancamento de parafuso (N)	
	MOR	MOE		Topo	Face
T1 **100P-0A**	4,41 a (24,29)	1052,04 a (9,48)	0,26 a (9,65)	674,29 a (20,88)	832,43 a (19,80)
T2 **75P-25ª**	4,33 a (16,40)	909,60 b (3,92)	0,23 a (7,87)	738,14 a (17,67)	772,29 a (9,59)
T3 **50P-50ª**	3,57 b (17,97)	779,85 c (14,60)	0,27 a (14,76)	565,29 b (19,18)	665,86 b (17,24)
T4 **25P-75ª**	3,03 b (9,31)	621,90 d (2,53)	0,30 a (17,46)	646,14 a (17,27)	591,43 b (18,81)
T5 **0P-100ª**	1,55 c (20,87)	408,48 e (16,88)	0,27 a (13,12)	440,57 b (19,40)	490,14 c (18,44)

Legenda: P: *Pinus* spp.; A: *Araucaria angustifolia*; MOR: módulo de ruptura; MOE: módulo de elasticidade; TP: tração perpendicular. Valores entre parênteses correspondem ao coeficiente de variação (%). Médias seguidas pela mesma letra na coluna não diferem estatisticamente pelo teste de Scott-Knott a 5% de probabilidade.

Os painéis utilizados nos ensaios mecânicos também foram caracterizados quanto à densidade aparente, apresentando médias de 528, 533, 572, 614 e 612 kg·m^{-3} para T1, T2, T3, T4 e T5, respectivamente. A variação em relação ao valor nominal pode estar associada às

condições de fabricação em escala laboratorial, como a expansão lateral do colchão durante a prensagem. Apesar dessa variação, todos os tratamentos permaneceram na classificação de painéis de baixa densidade.

A incorporação de casca de *A. angustifolia* influenciou de forma distinta as propriedades mecânicas dos painéis. Para o módulo de ruptura (MOR), T1 e T2 apresentaram médias de 4,41 e 4,33 MPa, sem diferença estatística entre si. A partir de 50% de casca houve redução significativa da resistência, com valores de 3,57 MPa em T3 e 3,03 MPa em T4, enquanto T5 apresentou o menor desempenho, com 1,55 MPa. Para o módulo de elasticidade (MOE), todos os tratamentos diferiram estatisticamente, com redução progressiva de 1052,04 MPa em T1 para 408,48 MPa em T5. Dessa forma, a incorporação de 25% de casca preservou a resistência à ruptura, embora a rigidez tenha sido reduzida já no primeiro nível de substituição.

Comportamento semelhante foi observado por Faria et al. (2024) em painéis produzidos com partículas de madeira de seringueira e proporções crescentes de palha de feijão, colados com adesivo poliuretano vegetal. Os autores verificaram reduções de 52,5% no MOR e 66,4% no MOE com o aumento da participação do resíduo lignocelulósico. Resultados recentes de Trevisan et al. (2026) também demonstraram influência da composição sobre a flexão em painéis colados com poliuretana à base de óleo de mamona, sendo os maiores valores de MOR e MOE obtidos na composição constituída exclusivamente por *Pinus taeda*. Esses resultados reforçam que a incorporação de matérias-primas alternativas pode ser tecnicamente viável, mas a proporção utilizada deve ser adequada ao desempenho mecânico esperado para o produto.

Brito et al. (2022), ao avaliarem painéis produzidos com casca de amendoim e madeira de *Pinus oocarpa*, também verificaram que a proporção entre as matérias-primas influenciou as propriedades tecnológicas do produto. Esse resultado reforça que a substituição da madeira por partículas de casca deve ser realizada em proporções adequadas, pois as características distintas dos materiais interferem na formação e no desempenho dos painéis.

A relação entre a densidade aparente dos painéis e a densidade básica das matérias-primas, expressa pela razão de compactação, reforça essa interpretação. Considerando as densidades básicas de 380 $kg \cdot m^{-3}$ para as partículas de *Pinus* spp. e 410 $kg \cdot m^{-3}$ para a casca de *A. angustifolia*, as razões de compactação foram de aproximadamente 1,39 em T1 e 1,49 em T5. Assim, embora os painéis com maior proporção de casca tenham apresentado maior razão de compactação, seu desempenho em flexão e na resistência ao arrancamento de parafuso foi inferior, indicando que essa redução não esteve associada à menor densificação dos painéis.

A caracterização geométrica evidenciou diferenças entre as matérias-primas. As partículas de casca apresentaram maior comprimento e espessura médios, porém menor razão de esbeltez em relação às partículas de *Pinus* spp. A razão de esbeltez média foi de 20,36 para a casca e 30,74 para o *Pinus*, indicando que as partículas de madeira eram proporcionalmente mais longas em relação à sua espessura. Sozim et al. (2021) observaram que maiores razões de esbeltez estiveram associadas a melhor desempenho em flexão estática, enquanto menores razões de esbeltez foram relacionadas a valores inferiores nessa propriedade. Dessa forma, a menor esbeltez das partículas de casca pode ter contribuído para a redução progressiva da resistência à flexão e da rigidez com o aumento de sua proporção nos painéis.

Além das características geométricas, a composição química da matéria-prima também pode contribuir para o desempenho dos painéis. Rios et al. (2015), ao caracterizarem galhos secos de *A. angustifolia*, encontraram teor de extrativos totais de 24,95% e destacaram que o elevado teor desses compostos pode interferir na adesão e resultar em ligações de menor resistência entre as partículas. Embora esses resultados tenham sido obtidos para galhos secos e não possam ser diretamente atribuídos à casca utilizada neste estudo, eles indicam que a composição química da casca, especialmente o teor de extrativos, merece ser investigada como possível fator associado ao desempenho mecânico observado. Estudos futuros devem incluir a caracterização química da casca, especialmente quanto ao teor de extrativos, para avaliar sua possível influência sobre a adesão e o desempenho mecânico dos painéis.

Considerando os valores mínimos de referência da ANSI A208.1 (2016), de 2,8 MPa para MOR e 500 MPa para MOE, T1 a T4 apresentaram médias superiores aos limites adotados, enquanto T5 permaneceu abaixo de ambos. Assim, nas condições avaliadas, a substituição integral das partículas de *Pinus* spp. por casca comprometeu o desempenho em flexão.

Diferente das propriedades de flexão, a tração perpendicular não diferiu significativamente entre os tratamentos, com médias entre 0,23 e 0,30 MPa. Todos os tratamentos apresentaram valores superiores aos mínimos de 0,10 MPa para LD1 e 0,14 MPa para LD2 estabelecidos pela ANSI A208.1. Isso indica que, nas condições avaliadas, a incorporação da casca não reduziu significativamente a coesão interna dos painéis. Sozim et al. (2021) observaram que partículas com menor razão de esbeltez podem favorecer a resistência à tração perpendicular, evidenciando que a geometria pode exercer efeitos distintos conforme a propriedade mecânica avaliada.

Para o arrancamento de parafuso na face, todos os tratamentos apresentaram médias superiores ao valor mínimo de 360 N estabelecido para painéis LD1. Considerando o valor

mínimo de 520 N para LD2, T1 a T4 apresentaram médias superiores à referência, enquanto T5 apresentou média inferior. A ANSI A208.1 (2016) não estabelece requisito mínimo para o arrancamento de parafuso no topo; portanto, nessa posição, a comparação foi realizada somente entre os tratamentos. T1 e T2 apresentaram as maiores médias, enquanto T5 apresentou o menor desempenho. Esses resultados indicam que a incorporação de 25% de casca preservou a capacidade de fixação mecânica dos painéis, enquanto a substituição integral provocou redução dessa propriedade.

4. Conclusões

O aumento da proporção de casca de *A. angustifolia* alterou o desempenho mecânico dos painéis de baixa densidade, principalmente em relação à resistência à flexão e à rigidez. A substituição de 25% das partículas de *Pinus* spp. por casca manteve o MOR, a tração perpendicular e as resistências ao arrancamento de parafuso no topo e na face estatisticamente semelhantes às do tratamento constituído exclusivamente por *Pinus* spp., embora tenha reduzido o MOE. Em proporções mais elevadas, a incorporação da casca resultou em maiores reduções de resistência e rigidez.

A caracterização geométrica evidenciou diferenças entre as matérias-primas, com menor razão de esbeltez das partículas de casca em comparação às de *Pinus* spp., característica que pode ter contribuído para o comportamento mecânico observado. Entre as proporções avaliadas, a incorporação de 25% de casca apresentou o melhor equilíbrio entre o aproveitamento do resíduo e a manutenção do desempenho mecânico. Estudos futuros devem incluir a caracterização química da casca, especialmente quanto ao teor de extrativos, para avaliar sua possível influência sobre a adesão e o desempenho dos painéis.

5. Agradecimentos

Os autores agradecem a Universidade do Estado de Santa Catarina (UDESC), a Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação de Santa Catarina (FAPESC).

6. Referências bibliográficas

American National Standards Institute. (2016). *Particleboard (ANSI A208.1-2016).* Composite Panel Association.

ASTM International. (2012). *Standard test methods for evaluating properties of wood-base fiber and particle panel materials (ASTM D1037-12).* https://doi.org/10.1520/D1037-12

Barbirato, G., Fiorelli, J., Garzón Barrero, N. M., Pallone, E. M. de J. A., Lahr, F. A. R., Cristoforo, A. L., & Savastano Junior, H. (2014). Painel aglomerado híbrido de casca de

amendoim reforçado com partículas de madeira itaúba. *Ciência Florestal, 24*(3), 685–697. https://doi.org/10.5902/1980509815726

Brito, F. M. S., Silva, B. A., Carvalho, I. M., Baúti, S. B., Mendes, L. M., & Guimarães Júnior, J. B. (2022). Technological properties of medium density particleboards produced with peanut (*Arachis hypogaea*) and *Pinus oocarpa* hulls. *Floresta e Ambiente, 29*(2), e20210101. https://doi.org/10.1590/2179-8087-FLORAM-2021-0101

Buzo, A. L. S. C., Sugahara, E. S., Silva, S. A. M. da, Morales, E. A. M., & Azambuja, M. dos A. (2019). Painéis de pínus e bagaço de cana empregando-se dois adesivos para uso na construção civil. *Ambiente Construído, 19*(4), 183–193. https://doi.org/10.1590/s1678-86212019000400350

Cardozo, J. C., Carvalho, A. M. de, Batalha, L. A. R., Gomes, F. J. B., Cardozo, R. N., Salomão, M. S., & Cruz, L. A. (2023). Evaluation of the emission of formaldehyde from wood-based panels (MDFs and MDPs) in Brazil after use. *Floresta e Ambiente, 30*(1), e20220079. https://doi.org/10.1590/2179-8087-FLORAM-2022-0079

Faria, D. L., Gonçalves, F. G., Maffioletti, F. D., Scatolino, M. V., Soriano, J., Protásio, T. de P., Lopez, Y. M., Paes, J. B., Mendes, L. M., Guimarães Junior, J. B., & Tonoli, G. H. D. (2024). Particleboards based on agricultural and agroforestry wastes glued with vegetal polyurethane adhesive: An efficient and eco-friendly alternative. *Industrial Crops and Products, 214*, 118540. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2024.118540

Fiorelli, J., Curtolo, D. D., Barrero, N. G., Savastano Júnior, H., Pallone, E. M. J. A., & Johnson, R. (2012). Particulate composite based on coconut fiber and castor oil polyurethane adhesive: An eco-efficient product. *Industrial Crops and Products, 40*, 69–75. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2012.02.033

Fiorelli, J., Lahr, F. A. R., Nascimento, M. F. do, Savastano Júnior, H., & Rossignolo, J. A. (2011). Painéis de partículas à base de bagaço de cana e resina de mamona: produção e propriedades. *Acta Scientiarum. Technology, 33*(4), 401–406. https://doi.org/10.4025/actascitechnol.v33i4.9615

Fiorelli, J., Sartori, D. L., Cravo, J. C. M., Savastano Júnior, H., Rossignolo, J. A., Nascimento, M. F. do, & Lahr, F. A. R. (2013). Sugarcane bagasse and castor oil polyurethane adhesive-based particulate composite. *Materials Research, 16*(2), 439–446. https://doi.org/10.1590/S1516-14392013005000004

Hess, A. F., Loiola, T., Souza, I. A. de, Minatti, M., Ricken, P., & Borsoi, G. A. (2018). Forest management for the conservation of *Araucaria angustifolia* in Southern Brazil. *Floresta*, *48*(3), 373–382. https://doi.org/10.5380/rf.v48i3.55452

Lee, S. H., Lum, W. C., Boon, J. G., Kristak, L., Antov, P., Pędzik, M., Rogoziński, T., Taghiyari, H. R., Lubis, M. A. R., Fatriasari, W., Yadav, S. M., Chotikhun, A., & Pizzi, A. (2022). Particleboard from agricultural biomass and recycled wood waste: A review. *Journal of Materials Research and Technology, 20*, 4630–4658. https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.08.166

Rios, P. D., Vieira, H. C., Stupp, Â. M., Kniess, D. D. C., Borba, M. H., & Cunha, A. B. da. (2015). Avaliação física e mecânica de painéis reconstituídos compostos por partículas de galhos secos de *Araucaria angustifolia* (Bertol.) Kuntze e madeira de *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden. *Scientia Forestalis, 43*(106), 283–289. https://www.ipef.br/publicacoes/scientia/nr106/cap04.pdf

Scipioni, M. C., Seeber, A., Alvares, C. A., Schmitt, D. E., Delben, G. J., & Cysneiros, V. C. (2026). Climate-driven tree failures: How extreme rainfall threatens the survival of monumental *Araucaria angustifolia* trees. *Agricultural and Forest Meteorology, 384*, 111168. https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2026.111168

Sozim, P. C. L., Hillig, E., Marchesan, R., & Ferro, F. S. (2021). Use of *Populus deltoides* wood in the production of MDP and HDP. *Floresta e Ambiente, 28*(4), e20200090. https://doi.org/10.1590/2179-8087-FLORAM-2020-0090

Trevisan, M. F., Poleto, A. S., Santos Junior, A. J., Silva, S. A. M. da, De Araujo, V. A., Azevedo, A. R. G. de, Monteiro, S. N., & Christoforo, A. L. (2026). Performance of rubberwood-pine particleboards bonded with castor-oil polyurethane and their numerical application as stiffening layers for glass fiber-reinforced polymer (GFRP) roofing sheets. *Journal of Materials Research and Technology, 43*, 502–516. https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2026.06.093

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Potencial de Duas Novas Espécies Florestais para Produção de Polpa Kraft Branqueada

Stéphani Caroline de Lana Arêdes [1]; Marcelo Moreira da Costa [1]

[1] Universidade Federal de Viçosa

Resumo: O objetivo deste trabalho foi avaliar o efeito da inserção de Eucalyptus tereticornis e Acacia mearnsii em misturas de madeira destinadas à produção de polpa celulósica kraft branqueada. Foram avaliadas diferentes composições de mixes, incluindo variações na proporção das espécies e na espessura dos cavacos de E. tereticornis. As matérias-primas foram caracterizadas quanto à densidade básica, composição química e perfil de metais, sendo posteriormente submetidas à polpação kraft modificada, branqueamento ECF e avaliação das propriedades físico-mecânicas das polpas após refino. Os resultados mostraram que E. tereticornis apresentou maior densidade básica, com 561 kg/m³, característica relevante para o aproveitamento industrial da madeira. Entretanto, seu maior teor de lignina total, de 31,72%, indica maior exigência no processo de deslignificação. A Acacia mearnsii apresentou menor teor de lignina total, com 20,37%, maior teor de pentosanas e desempenho favorável na polpação e no branqueamento, atingindo alvuras próximas de 90% ISO. A inserção controlada de E. tereticornis, especialmente em cavacos de 3 a 6 mm, favoreceu menor exigência alcalina no cozimento. Conclui-se que ambas as espécies apresentam potencial técnico para compor o mix de madeira, desde que suas proporções sejam ajustadas para equilibrar rendimento, consumo químico, branqueabilidade e qualidade final da polpa.

Palavras-chave: Produtos florestais; celulose; branqueamento.

Potential of Two Alternative Forest Species for Bleached Kraft Pulp Production

Abstract: This study aimed to evaluate the effect of incorporating Eucalyptus tereticornis and Acacia mearnsii into wood furnishes intended for the production of bleached kraft pulp. Different furnish compositions were assessed, including variations in species proportion and in the wood chip thickness of E. tereticornis. The raw materials were characterized in terms of basic density, chemical composition, and metal profile, and were subsequently subjected to modified kraft pulping, ECF bleaching, and evaluation of the physical and mechanical properties of the pulps after refining. The results showed that E. tereticornis had the highest basic density, reaching 561 kg/m³, a relevant characteristic for industrial wood utilization. However, its higher total lignin content, 31.72%, indicates a greater requirement during the delignification process. Acacia mearnsii showed lower total lignin content, 20.37%, higher pentosan content, and favorable performance in pulping and bleaching, reaching brightness levels close to 90% ISO. The controlled addition of E. tereticornis, especially using 3–6 mm wood chips, contributed to a lower alkali requirement during cooking. It is concluded that both species have technical potential for use in wood furnish composition, provided that their proportions are properly adjusted to balance yield, chemical consumption, bleachability, and final pulp quality.
Keywords: Forest products; cellulose; Bleaching.

1. Introdução

A indústria de celulose e papel tem buscado ampliar a eficiência do uso da matéria-prima florestal, reduzir o consumo de reagentes e manter a qualidade da polpa destinada ao mercado. Nesse contexto, a diversificação do suprimento de madeira pode contribuir para processos mais competitivos, desde que as propriedades físicas, químicas, anatômicas e tecnológicas das espécies sejam compatíveis com as exigências da polpação kraft e do branqueamento. Entre esses parâmetros, destacam-se a densidade básica da madeira, as dimensões dos cavacos, os teores de lignina, extrativos, pentosanas, inorgânicos e metais, além da morfologia das fibras e da resposta da matéria-prima em termos de número kappa, rendimento depurado, seletividade e branqueabilidade (Colodette et al., 2002; Correa et al., 2023; Furszyfer Del Rio et al., 2022; Iglesias et al., 2020; Ribeiro et al., 2018).

A polpação kraft continua sendo a principal rota industrial para obtenção de polpas químicas, pois permite elevada remoção de lignina, recuperação de químicos e produção de fibras com propriedades adequadas a diferentes aplicações papeleiras. Entretanto, o desempenho do processo depende da densidade básica, teor de lignina, extrativos, hemiceluloses, composição mineral e dimensões dos cavacos, os quais influenciam o número kappa, o rendimento depurado, a seletividade e a branqueabilidade (Colodette et al., 2002; Correa et al., 2023; Ribeiro et al., 2018).

Entre as alternativas avaliadas, *Eucalyptus tereticornis* apresenta interesse para a indústria de celulose e papel devido à elevada densidade básica e à adaptação a diferentes condições ambientais, características que podem favorecer o suprimento e o aproveitamento industrial da madeira. A *Acacia mearnsii*, por sua vez, é tradicionalmente utilizada para extração de taninos da casca, enquanto sua madeira é destinada principalmente à energia, carvão e pellets. No entanto, seu menor teor de lignina, maior teor de pentosanas, potencial para polpação kraft e características anatômicas favoráveis à resistência do papel justificam sua avaliação como matéria-prima para celulose. Assim, a inserção dessas espécies em misturas de madeira pode contribuir para diversificar o suprimento fibroso e melhorar a eficiência do processo kraft, desde que sejam considerados rendimento, consumo químico, branqueabilidade e qualidade final da polpa (Chan et al., 2015; Coldebella et al., 2023; Giesbrecht et al., 2022; González et al., 2023; Neiva et al., 2015).

Dessa forma, o objetivo deste trabalho foi avaliar, o efeito da inserção de *Eucalyptus tereticornis* e *Acacia mearnsii* em misturas de madeira sobre a caracterização da matéria-prima,

o desempenho na polpação kraft modificada, o branqueamento livre de cloro elementar (ECF) e as propriedades físico-mecânicas das polpas obtidas (Colodette et al., 2002; Iglesias et al., 2020).

2. Material e métodos

Foram avaliadas misturas compostas por espécies de eucalipto já utilizadas como base industrial, incluindo *Eucalyptus dunnii*, *Eucalyptus saligna*, *Eucalyptus urograndis* e *Eucalyptus benthamii*, com a inserção de *Eucalyptus tereticornis* e *Acacia mearnsii*. Para *E. tereticornis*, também foi considerado o efeito da espessura dos cavacos, com amostras menores que 3 mm e entre 3 e 6 mm, conforme a composição apresentada na Tabela 1 (González et al., 2023; Ribeiro et al., 2018).

Tabela 1 – Definição dos mixes com inserção de *Eucalyptus tereticornis* e *Acacia mearnsii*

Espécies	*E. tereticornis* (< 3 mm)	*E. tereticornis* (3 - 6 mm)	Mix T1	Mix T2	Mix T3	*A. mearnsii*	Mix A1	Mix A2	Mix A3	Mix A4
E. dunnii	-	-	10%	9%	9%	-	10%	10%	20%	20%
E. saligna	-	-	72%	66%	59%	-	69%	64%	59%	54%
E. urograndis	-	-	10%	9%	9%	-	8%	8%	8%	8%
E. benthamii	-	-	8%	8%	8%	-	8%	8%	8%	8%
E. tereticornis	100%	100%	0%	8%	15%	-	-	-	-	-
A. mearnsii	-	-	-	-	-	100%	5%	10%	5%	10%
Madeira total	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%

As madeiras foram caracterizadas quanto à densidade básica, teor de inorgânicos, insolúveis em HCl, perfil de metais, pentosanas, lignina insolúvel, lignina solúvel, lignina total, extrativos em diclorometano, relação siringil/guaiacil e ácidos urônicos. As análises seguiram métodos normativos aplicáveis, principalmente normas Standards: Regulations and Style Guidelines (TAPPI), buscando relacionar a composição da madeira com o desempenho posterior no cozimento e no branqueamento (Neiva et al., 2015; TAPPI, 2023).

A polpação kraft modificada foi iniciada com impregnação dos cavacos em licor negro fraco a 105 °C por 50 minutos. Esse licor corresponde a uma corrente diluída do processo kraft, composta por matéria orgânica dissolvida da madeira, como fragmentos de lignina e carboidratos degradados, além de compostos inorgânicos residuais, como sais de sódio e álcali

residual. Embora sua composição analítica detalhada não tenha sido apresentada, seu uso foi associado à melhoria da impregnação dos cavacos e à maior uniformidade da deslignificação. Em seguida, o cozimento foi realizado em duas zonas, a 140 °C e 148 °C, com ajuste da carga de álcali efetivo para obtenção de número kappa próximo de 17,5. Ao final, foram avaliados o rendimento depurado, a seletividade e o álcali efetivo residual, visando verificar a eficiência da polpação e a preservação dos carboidratos da madeira (Colodette et al., 2002; Ribeiro et al., 2018).

As polpas marrons obtidas após a polpação kraft modificada foram caracterizadas para avaliar sua qualidade antes do branqueamento. Foram determinados a viscosidade intrínseca, conforme TAPPI T 254 cm-22; a alvura, conforme TAPPI T 452 om-23; os ácidos hexenurônicos, conforme TAPPI T 282 om-23; e a morfologia das fibras, conforme TAPPI T 401 om-20. O perfil de metais, incluindo Ca, Mg, Cu, Fe e Mn, foi determinado por ICP-OES. Em seguida, as polpas foram submetidas ao branqueamento ECF, composto por estágios com oxigênio, peróxido de hidrogênio e dióxido de cloro. Nessa etapa, foram avaliados a alvura final, o consumo de dióxido de cloro, a viscosidade e a branqueabilidade, parâmetros relacionados à eficiência do branqueamento e à preservação da qualidade das fibras (Isaza Ferro et al., 2021; TAPPI, 2023).

Após o branqueamento, as polpas foram refinadas em moinho PFI e avaliadas quanto ao grau Schopper-Riegler, volume específico aparente, índice de tração, índice de rasgo e índice de estouro, morfologia, retenção de água e comportamento das propriedades mecânicas após o refino (Gharehkhani et al., 2015; Motamedian et al., 2019).

3. Resultados e discussão

3.1. Caracterização físico-química da madeira

Conforme apresentado na Tabela 2, a densidade básica variou entre as espécies avaliadas, com destaque para *E. tereticornis*, que apresentou o maior valor, de 561 kg/m³, superior ao observado para *A. mearnsii* (539 kg/m³) e para as demais espécies de eucalipto avaliadas. Essa característica física pode favorecer maior massa de madeira por volume processado, o que é relevante para a produtividade industrial. Entretanto, a densidade deve ser analisada em conjunto com a composição química da madeira, especialmente teor de lignina, extrativos, inorgânicos e metais, bem como com a resposta da matéria-prima ao cozimento kraft, pois esses fatores influenciam o consumo de álcali, o número kappa, o rendimento

depurado e a branqueabilidade da polpa (Colodette et al., 2002; Neiva et al., 2015; Ribeiro et al., 2018).

Tabela 2 – Caracterização físico-química das madeiras

Amostra	Densidade básica (kg/m³)	Inorgânicos (%)	Insolúvel em HCl (%)	Perfil de metais via ICP (mg/kg)				
				Ca	Mg	Cu	Fe	Mn
E. benthamii	535	0.23	0.1	517	115	2.05	384	9.23
E. dunnii	533	0.55	1.55	356	200	2.35	31.7	15.9
E. saligna	493	0.14	0.09	573	122	2.06	17.4	10.06
E. tereticornis	561	0.32	0.11	521	140	1.2	16.3	21.5
E. urograndis	469	0.14	0.1	393	82	2.37	52.2	56.6
A. mearnsii	539	0.37	0.02	840	220	0.6	23	9.95

A *Acacia mearnsii* apresentou maiores teores de cálcio e magnésio na madeira, o que pode afetar etapas alcalinas e de branqueamento pela presença de metais no sistema. Por outro lado, seu menor teor de lignina total, observado na Tabela 3, sugere maior facilidade de deslignificação e possível redução da demanda química em condições adequadas de processo (Uushona et al., 2021).

Tabela 3 – Caracterização físico-química das madeiras

Amostra	Pentosanas (%)	Lignina insolúvel (%)	Lignina solúvel (%)	Lignina total (%)	Extrativos em DCM (%)	S/G	Urônicos (%)
E. tereticornis	11.4	30.3	1.47	31.72	0.55	2.17	4.44
A. mearnsii	20.3	19.0	1.34	20.37	4.0	2.03	3.69

A comparação entre *E. tereticornis* e *A. mearnsii* evidencia diferenças relevantes para o processo. O maior teor de lignina total em *E. tereticornis* pode elevar a exigência de álcali e reagentes oxidantes, enquanto o maior teor de pentosanas em *A. mearnsii* pode contribuir para rendimento e desenvolvimento de ligações interfibrilares, aspectos importantes para resistência do papel (Giesbrecht et al., 2022; Neiva et al., 2015).

3.2. Polpação kraft modificada

Como observado na Figura 1, a relação entre número kappa e carga de álcali efetivo demonstrou que a resposta de *Eucalyptus tereticornis* na polpação kraft modificada depende tanto da proporção da espécie no mix quanto da espessura dos cavacos. A inserção controlada em menor proporção, especialmente no Mix T2, favoreceu a obtenção da faixa de kappa desejada com menor exigência alcalina, indicando melhor equilíbrio entre a remoção de lignina e a preservação dos carboidratos da madeira. Esse comportamento reforça a importância do controle da composição do suprimento fibroso e das dimensões dos cavacos para otimizar rendimento, seletividade e consumo químico no cozimento kraft (Colodette et al., 2002; Ribeiro et al., 2018).

Figura 1 – Número kappa em função do álcali efetivo para amostras contendo *Eucalyptus tereticornis*.

Como observado na Figura 2, a amostra composta por 100% de *Acacia mearnsii* apresentou desempenho favorável na polpação kraft modificada, com tendência de menor demanda de álcali efetivo para atingir a faixa de número kappa desejada, em comparação aos mixes contendo menores proporções da espécie. Esse comportamento indica melhor resposta à deslignificação e pode estar associado ao menor teor de lignina total da madeira de *A. mearnsii*, bem como às características químicas e anatômicas já descritas para essa espécie em estudos voltados à produção de polpa kraft. Assim, os resultados reforçam o potencial técnico da *A. mearnsii* como matéria-prima alternativa ou complementar no suprimento de madeira para produção de polpa celulósica branqueada (Coldebella et al., 2023; Giesbrecht et al., 2022).

Figura 2 – Número kappa em função do álcali efetivo para amostras contendo *Acacia mearnsii*.

3.3. Branqueamento ECF

Como apresentado na Figura 3, as curvas de alvura em função do consumo de dióxido de cloro na etapa D1 indicaram que as polpas obtidas a partir dos mixes contendo *Eucalyptus tereticornis* alcançaram valores próximos à meta de alta alvura, em torno de 90% ISO, embora com diferenças no consumo químico entre as composições avaliadas. Esse comportamento demonstra que a proporção de *E. tereticornis* no mix influencia a resposta ao branqueamento

ECF, possivelmente em razão das diferenças na carga residual de lignina, ácidos hexenurônicos e demais grupos cromóforos presentes na polpa marrom. Assim, a composição do mix de madeira deve ser ajustada para equilibrar alvura final, consumo de dióxido de cloro e preservação da qualidade da fibra durante a sequência de branqueamento (Isaza Ferro et al., 2021; Shatalov & Pereira, 2009).

Figura 3 – Alvura em função do consumo de dióxido de cloro para polpas contendo *Eucalyptus tereticornis*.

Como apresentado na Figura 4, a relação entre alvura e consumo de dióxido de cloro na etapa D1 indicou comportamento favorável para as polpas contendo *Acacia mearnsii*, especialmente para a amostra composta por 100% da espécie, que atingiu valores elevados de alvura, próximos de 90% ISO, com baixa demanda química. Esse desempenho pode ser associado ao menor teor de lignina total da madeira de *A. mearnsii* e à maior facilidade de remoção dos grupos cromóforos durante a sequência de branqueamento ECF. Dessa forma, os resultados reforçam o potencial da espécie para a produção de polpa kraft branqueada, considerando sua boa resposta ao branqueamento e a possibilidade de redução do consumo de reagentes oxidantes (Giesbrecht et al., 2022; Isaza Ferro et al., 2021; Shatalov & Pereira, 2009).

Figura 4 – Alvura em função do consumo de dióxido de cloro para polpas contendo *Acacia mearnsii*.

De modo geral, os resultados de branqueamento mostram comportamentos distintos entre as espécies. A inserção controlada de *E. tereticornis* exige equilíbrio entre proporção no mix e consumo químico, enquanto *A. mearnsii* apresenta maior facilidade de branqueamento, reforçando seu potencial para composições voltadas à produção de polpa kraft branqueada de mercado (Isaza Ferro et al., 2021; Shatalov & Pereira, 2009).

3.4. Propriedades físico-mecânicas

Nos testes físicos, as polpas apresentaram resposta típica ao refino em moinho PFI, com aumento do grau Schopper-Riegler à medida que o número de revoluções foi elevado. Esse comportamento indica maior fibrilação e maior interação entre fibras, favorecendo a formação

da folha e o desenvolvimento das propriedades de resistência (Gharehkhani et al., 2015; Motamedian et al., 2019).

De forma geral, o volume específico aparente diminuiu com o aumento do refino, atingindo valores próximos de 1,1 a 1,5 cm^3/g nos maiores níveis avaliados. Essa faixa é mais compatível com papéis de estrutura mais compacta, como papéis kraft, offset ou papéis que demandam maior fechamento da folha, enquanto produtos tissue e papéis absorventes normalmente requerem maior volume específico aparente, frequentemente na faixa de 2,0 a 4,0 cm^3/g ou superior, dependendo da tecnologia de formação, prensagem, secagem e crepagem. Assim, a redução do volume específico observada após o refino indica maior compactação da rede fibrosa, o que favoreceu o aumento dos índices de tração, rasgo e estouro. Dessa forma, os resultados sugerem que tanto os mixes com Eucalyptus tereticornis quanto aqueles com Acacia mearnsii apresentam potencial para formação de papéis com resistência adequada, desde que o nível de refino seja ajustado conforme a aplicação final desejada, equilibrando resistência mecânica, bulk e absorção (Gharehkhani et al., 2015; Motamedian et al., 2019).

4. Conclusões

A inserção de *Eucalyptus tereticornis* e *Acacia mearnsii* em misturas de madeira apresentou potencial técnico para diversificar o suprimento fibroso destinado à produção de polpa kraft branqueada. O *E. tereticornis* mostrou melhor desempenho quando utilizado em proporção controlada, especialmente com cavacos de 3 a 6 mm, contribuindo para menor exigência alcalina no cozimento.

A *Acacia mearnsii* destacou-se pelo menor teor de lignina total, maior rendimento depurado e boa resposta ao branqueamento, indicando potencial para uso industrial em polpas de mercado. De modo geral, os resultados demonstram que o ajuste adequado das proporções no mix é essencial para equilibrar rendimento, consumo químico, branqueabilidade e propriedades físico-mecânicas, favorecendo maior eficiência do processo kraft e melhor aproveitamento da matéria-prima florestal.

5. Agradecimentos

Os autores agradecem à Universidade Federal de Viçosa, ao Laboratório de Celulose e Papel, à CMPC Celulose Riograndense LTDA. e às agências de fomento (CAPES, CNPq e FAPEMIG).

6. Referências bibliográficas

Chan, J. M., Day, P., Feely, J., Thompson, R., Little, K. M., & Norris, C. H. (2015). Acacia mearnsii industry overview: current status, key research and development issues. *Southern Forests*, *77*(1), 19–30. https://doi.org/10.2989/20702620.2015.1006907

Coldebella, R., Giesbrecht, B. M., Pedrazzi, C., Machado, P. F. D. S., Costa, H. W. D., Vivian, M. A., Denardi, L., & Gomes, C. M. (2023). Anatomical characterization of black wattle wood for the pulp and paper production. *Ciencia Rural*, *53*(9). https://doi.org/10.1590/0103-8478cr20210865

Colodette, J. L., Gomide, J. L., Girard, R., Jääskeläinen, A.-S., & Argyropoulos, D. S. (2002). Influence of pulping conditions on eucalyptus kraft pulp yield, quality, and bleachability. *TAPPI JOURNAL*.

Correa, I. B., de Souza, M. B., & Secchi, A. R. (2023). On the modeling of continuous kraft pulp digesters: Inclusion of wood characteristics. *Chemical Engineering Research and Design*, *196*, 711–724. https://doi.org/10.1016/j.cherd.2023.07.012

Furszyfer Del Rio, D. D., Sovacool, B. K., Griffiths, S., Bazilian, M., Kim, J., Foley, A. M., & Rooney, D. (2022). Decarbonizing the pulp and paper industry: A critical and systematic review of sociotechnical developments and policy options. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *167*, 112706. https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112706

Gharehkhani, S., Sadeghinezhad, E., Kazi, S. N., Yarmand, H., Badarudin, A., Safaei, M. R., & Zubir, M. N. M. (2015). Basic effects of pulp refining on fiber properties—A review. *Carbohydrate Polymers*, *115*, 785–803. https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2014.08.047

Giesbrecht, B. M., Coldebella, R., Gentil, M., Nunes, G. R. S., Finger, M. R., Jardim, J. M., Pedrazzi, C., & Cardoso, G. V. (2022). The performance of Acacia mearnsii De Wild for kraft pulping. *Ciencia Florestal*, *32*(1), 266–286. https://doi.org/10.5902/1980509850295

González, M., Resquín, F., & Balmelli, G. (2023). Estimation of genetic parameters for productive traits in Eucalyptus tereticornis and implications for breeding. *Bosque*, *44*(3), 493–502. https://doi.org/10.4067/S0717-92002023000300493

Iglesias, M. C., Gomez-Maldonado, D., Via, B. K., Jiang, Z., & Peresin, M. S. (2020). Pulping processes and their effects on cellulose fibers and nanofibrillated cellulose properties: A review. *Forest Products Journal*, *70*(1), 10–21. https://doi.org/10.13073/FPJ-D-19-00038

Isaza Ferro, E., Ruuttunen, K., Perrin, J., & Vuorinen, T. (2021). Sustainable bleaching of Eucalyptus sp. kraft pulp with hypochlorous acid, ozone and hydrogen peroxide. *Industrial Crops and Products*, *172*. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2021.114004

Motamedian, H. R., Halilovic, A. E., & Kulachenko, A. (2019). Mechanisms of strength and stiffness improvement of paper after PFI refining with a focus on the effect of fines. *Cellulose*, *26*(6), 4099–4124. https://doi.org/10.1007/s10570-019-02349-5

Neiva, D., Fernandes, L., Araújo, S., Lourenço, A., Gominho, J., Simões, R., & Pereira, H. (2015). Chemical composition and kraft pulping potential of 12 eucalypt species. *Industrial Crops and Products*, *66*, 30–30. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2014.12.016

Ribeiro, R. A., Colodette, J. L., & Vaz Júnior, S. (2018). EFFECT OF RESIDUAL EFFECTIVE ALKALI ON EUCALYPTUS KRAFT PULP YIELD AND CHEMISTRY. *CERNE*, *24*(4), 408–419. https://doi.org/10.1590/01047760201824042593

Shatalov, A. A., & Pereira, H. (2009). Impact of hexenuronic acids on xylanase-aided bio-bleaching of chemical pulps. *Bioresource Technology*, *100*(12), Article 100(12). https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.01.020

TAPPI. (2023). *TAPPI Standards: Regulations and Style Guidelines*.

Uushona, T., Chikwanha, O. C., Tayengwa, T., Katiyatiya, C. L. F., Strydom, P. E., & Mapiye, C. (2021). Nutraceutical and preservative potential of Acacia mearnsii and Acacia dealbata leaves for ruminant production and product quality enhancement. *Journal of Agricultural Science*, *159*(9–10), Article undefined. https://doi.org/10.1017/S0021859621001015

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Predição da umidade da madeira através da resistência à perfuração em árvores de eucalipto

Renata do Nascimento Maia[1]; João Philipe Dordenoni Côra[1]; Letícia de Souza Barbosa Martins[1]; Stéffany de Lima Araujo[1]; Gustavo Jaske da Conceição[1]; Thayanne Caroline Castor Neto[1]; Glaycianne Christine Vieira dos Santos Ataide[2]; Graziela Baptista Vidaurre[1]

[1] Universidade Federal do Espírito Santo, Alegre, Espírito Santo, Brasil.
[2] Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, Brasil.

Resumo: O objetivo deste trabalho foi estimar a umidade da madeira de eucalipto em árvores em pé por meio da resistência à perfuração. Foram avaliadas 120 árvores de quatro clones de eucalipto, com oito anos de idade, provenientes de plantios comerciais localizados no Rio Grande do Sul, Brasil. As leituras resistográficas foram realizadas no diâmetro à altura do peito, utilizando o penetrógrafo IML Resi PD Series 400, enquanto a umidade foi determinada pelo método gravimétrico. O teor de umidade variou de 96 a 144%, com média de 118%. Foram ajustados modelos de regressão simples e múltipla com as variáveis rotação e avanço. O modelo baseado na rotação apresentou o melhor desempenho, com r = 0,88, R^2 ajustado de 76,80% e erro padrão da estimativa de 8,08%. A inclusão do avanço não melhorou o modelo múltiplo. Assim, a resistência à perfuração demonstrou potencial para estimativas rápidas, menos destrutivas e aplicáveis à avaliação da umidade da madeira em condições de campo.

Palavras-chave: Métodos não destrutivos; Penetrógrafo; Qualidade da madeira.

Prediction of wood moisture through drilling resistance in eucalyptus trees

Abstract: The objective of this study was to estimate the moisture content of eucalyptus wood in standing trees using drilling resistance. A total of 120 eight-year-old trees from four eucalyptus clones, originating from commercial plantations located in Rio Grande do Sul, Brazil, were evaluated. Drilling resistance measurements were performed at breast height using an IML Resi PD Series 400 device, while moisture content was determined by the gravimetric method. Moisture content ranged from 96 to 144%, with an average of 118%. Simple and multiple regression models were fitted using rotation and feed speed as predictor variables. The rotation-based model showed the best performance, with r = 0.88, an adjusted R^2 of 76.80%, and a standard error of estimate of 8.08%. The inclusion of feed speed did not improve the multiple regression model. Therefore, drilling resistance demonstrated potential for rapid, less destructive estimates applicable to the assessment of wood moisture content under field conditions.

Keywords: Non-destructive methods; Penetrograph; Wood quality.

1. Introdução

O eucalipto é o principal gênero cultivado no setor florestal brasileiro. Em 2024, a área destinada ao plantio de árvores para fins industriais alcançou 10,52 milhões de hectares, sendo

8,1 milhões ocupados por eucalipto (Indústria Brasileira de Árvores - IBÁ, 2025). A relevância do gênero está associada à produtividade e à ampla utilização da madeira em diferentes segmentos industriais (Medeiros *et al*., 2025).

Entre as propriedades de maior influência na qualidade da madeira, destaca-se a umidade, pois o teor de água interfere no processamento, na secagem, na estabilidade dimensional e no desempenho final dos produtos madeireiros (Yang *et al*., 2022).

A determinação convencional da umidade demanda retirada de amostras, pesagem, secagem em estufa e maior tempo de análise. Nesse contexto, métodos não destrutivos têm sido utilizados para estimar propriedades da madeira em campo (Jesus *et al*., 2023). Entre eles, a resistência à perfuração mede a resistência oferecida pela madeira à penetração de uma broca rotativa, permitindo estimar propriedades tecnológicas e detectar alterações internas (Góes & Carrasco., 2024).

Estudos recentes demonstram o potencial da resistência à perfuração para predição da densidade básica e de propriedades mecânicas da madeira (Papandrea *et al*., 2022; Singh *et al*., 2022; Elissetche *et al*., 2024). Entretanto, ainda há poucas pesquisas que avaliem essa técnica para estimativa da umidade. Assim, o objetivo deste trabalho foi estimar a umidade da madeira de eucalipto em árvores em pé por meio da resistência à perfuração.

2. Material e métodos

2.1 Área de estudo e amostragem

O material utilizado foi proveniente de clones pertencentes ao Programa Cooperativo sobre Densidade da Madeira (ProDM), coordenado pelo Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais (IPEF). Madeiras de quatro clones de eucalipto, com oito anos de idade, correspondentes a *E. saligna*, *E. urophylla* x *E. maidenii*, *E. dunnii* e *E. urophylla*, obtidos em plantios comerciais no Rio Grande do Sul, Brasil, foram avaliadas.

Para cada clone, 30 árvores representativas do diâmetro médio do respectivo talhão foram selecionadas, totalizando 120 árvores. Indivíduos localizados nas duas primeiras linhas de bordadura foram desconsiderados, e a altura comercial foi definida pelo limite mínimo de 5 cm de diâmetro ao longo do fuste.

2.2 Coleta dos dados de resistência à perfuração

As avaliações com o penetrógrafo foram realizadas em árvores em pé, na altura do diâmetro à altura do peito (DAP), por meio de perfurações diametrais com casca. Para cada

árvore, foi efetuada uma leitura no sentido norte-sul, totalizando 120 perfis resistográficos obtidos em campo (Figura 1).



Figura 1 – 1) Esquema amostral da avaliação de resistência à perfuração realizada em árvores em pé na altura do DAP, com perfuração diametral no sentido norte-sul; 2) Preparo das amostras em campo para preservar a umidade da madeira; 3) Determinação da umidade da madeira em laboratório.

O penetrógrafo IML Resi PD Series 400 foi utilizado e configurado com velocidade de avanço de 150 cm min^{-1}, rotação de 3500 rpm, haste com diâmetro de 1,5 mm e aresta de corte de 3,0 mm. Durante as perfurações, manteve-se o ângulo de inserção da haste em 90° em relação ao eixo longitudinal da árvore. Os dados foram exportados, convertidos para planilhas eletrônicas e processados no RStudio. Os trechos correspondentes à casca e às regiões sem material lenhoso foram removidos dos perfis. Posteriormente, os perfis de amplitude de rotação foram corrigidos para minimizar a influência do atrito da haste durante a perfuração e o efeito do atrito nos perfis de rotação foram corrigidos.

2.3 Coleta das amostras e determinação da umidade

De cada árvore, um disco de madeira com aproximadamente 1,5 cm de espessura na região do DAP foi retirado. Os discos foram envolvidos em filme plástico para reduzir a perda de água por evaporação. Em laboratório, os discos foram pesados para obtenção da massa úmida e secos em estufa a 105±2 °C por aproximadamente 96 horas, até massa seca. O teor de umidade foi determinado pelo método gravimétrico, conforme a ABNT NBR 7190-3 (Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT, 2022).

2.4 Análise de dados

As análises estatísticas foram realizadas no ambiente R, versão 4.0.2 (R Core Team, 2020), com auxílio do RStudio, adotando-se nível de significância de 5% ($p \leq 0,05$). O experimento foi conduzido em delineamento inteiramente casualizado. A normalidade dos resíduos foi avaliada pelo teste de Shapiro-Wilk, e a homogeneidade das variâncias pelo teste de Levene.

Os dados dos clones foram analisados em conjunto, totalizando 120 árvores. Média, mínimo, máximo, desvio padrão e coeficiente de variação para umidade e variáveis obtidas pela resistência à perfuração (avanço e rotação) foram calculados. Os modelos de regressão linear simples e múltipla, também foram ajustados, quando possível, para a predição da umidade utilizando rotação, avanço e rotação associada ao avanço como variáveis independentes. Os modelos foram comparados pelo R^2 ajustado, significância, erro padrão da estimativa e análise gráfica dos valores observados, estimados e resíduos.

3. Resultados e discussão

O teor de umidade da madeira variou de 96 a 144%, com média de 118%, desvio padrão de 13% e coeficiente de variação de 11% (Tabela 1). Essa amplitude evidencia variação considerável entre as árvores avaliadas, embora as amostras tenham sido retiradas na mesma posição do fuste, correspondente ao DAP. As coletas foram realizadas em dias distintos, entretanto, todos os discos foram enviados conjuntamente ao laboratório, com intervalo máximo de uma semana entre a coleta e o envio do material.

Tabela 1 – Estatística descritiva do teor de umidade da madeira e das variáveis obtidas pela resistência à perfuração em árvores de eucalipto.

Variáveis	Umidade (%)	Rotação (%)	Avanço (%)
Máximo	144	38	39
Média	118	28	18
Mínimo	96	19	12
Desvio padrão	13	5	4
Coeficiente de variação	11	17	24

As variáveis obtidas pela resistência à perfuração também apresentaram variação entre as árvores. A rotação variou de 19 a 38%, com média de 28% e coeficiente de variação de 17%.

Já o avanço variou de 12 a 39%, com média de 18% e coeficiente de variação de 24%, indicando maior dispersão relativa dessa variável.

A maior variação do avanço pode estar relacionada à sensibilidade da perfuração às diferenças internas da madeira, como variações de densidade, umidade e anatomia no sentido radial. Estudos com resistência à perfuração mostram que os perfis resistográficos são influenciados por características físicas e anatômicas da madeira (Jesus *et al*., 2023; Elissetche *et al*., 2024).

Os modelos ajustados para predição da umidade apresentaram desempenhos distintos (Tabela 2). O modelo com rotação apresentou o melhor ajuste, com r = 0,88, R^2aj. = 76,80%, EPE = 8,08% e significância estatística (p<0,001). A equação ajustada indicou relação negativa entre a rotação e o teor de umidade.

Tabela 2 – Modelos de regressão ajustados para predição do teor de umidade da madeira a partir das variáveis de resistência à perfuração.

Variáveis independentes	r	R^2aj. (%)	EPE (%)	p-valor				Equação
				Regressão	Constante	Rotação	Avanço	
Rotação	0,88	76,8	8,08	<0,001*	<0,001*	<0,001*	-	U = 202,85 - 3,04 * R
Avanço	0,67	44,2	12,52	<0,001*	<0,001*	<0,001*	-	U = 164,48 - 2,61 * A
Rotação e avanço	0,88	76,8	8,08	<0,001*	<0,001*	<0,001*	0,321^{ns}	U = 203,35 - 3,24 * R

r: coeficiente de correlação de Pearson; R^2aj.: coeficiente de determinação ajustado; EPE: erro padrão da estimativa; *significativo a 5%; ^{ns} não significativo a 5%; U: umidade (%); R: rotação (%); A: avanço (%).

O modelo com avanço apresentou menor capacidade preditiva, com r = 0,67, R^2aj. = 44,20% e EPE = 12,52%. Embora significativo (p<0,001), esse modelo explicou menor parte da variação da umidade, indicando que o avanço, isoladamente, foi menos eficiente para estimar essa propriedade.

O modelo contendo rotação e avanço apresentou desempenho semelhante ao modelo com rotação isolada, com r = 0,88, R^2aj. = 76,80% e EPE = 8,08%. No entanto, o avanço não foi significativo no modelo múltiplo (p=0,321^{ns}), demonstrando que sua inclusão não melhorou a estimativa da umidade. Assim, o modelo com rotação pode ser considerado o mais adequado.

A relação entre os valores observados e estimados confirmou o melhor desempenho dos modelos com rotação (Figura 2). Nesses modelos, os pontos ficaram mais próximos da linha de referência, indicando maior concordância entre a umidade observada e estimada. No modelo com avanço, houve maior dispersão dos pontos, evidenciando menor precisão.

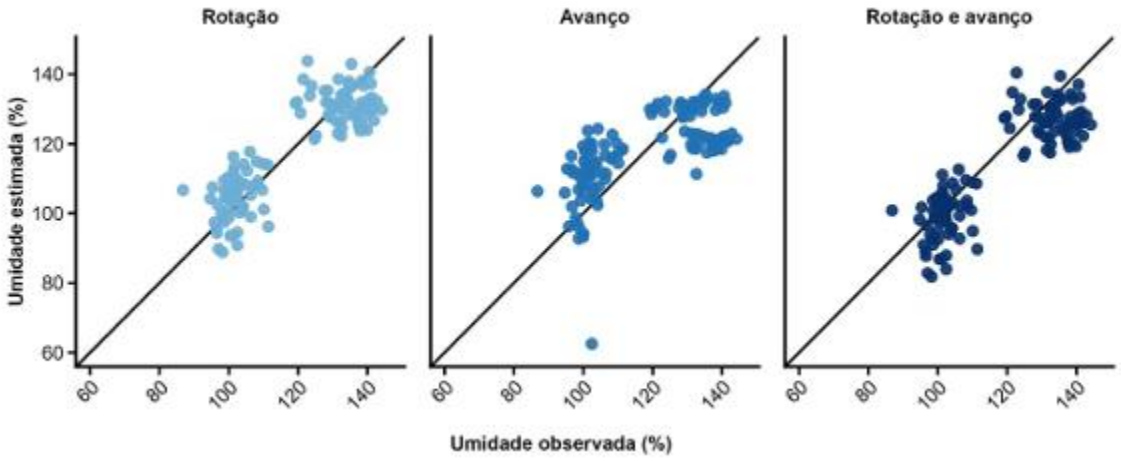


Figura 2 – Relação entre os valores observados e estimados de umidade da madeira pelos modelos ajustados com as variáveis rotação, avanço e rotação associada ao avanço.

Os resíduos dos modelos também indicaram melhor ajuste para a rotação (Figura 3). O modelo com avanço apresentou maior dispersão residual, com valores variando aproximadamente de -23 a 40%. Já os modelos com rotação e rotação associada ao avanço apresentaram resíduos mais concentrados, em geral entre -20 e 20%, indicando menor erro de estimativa.

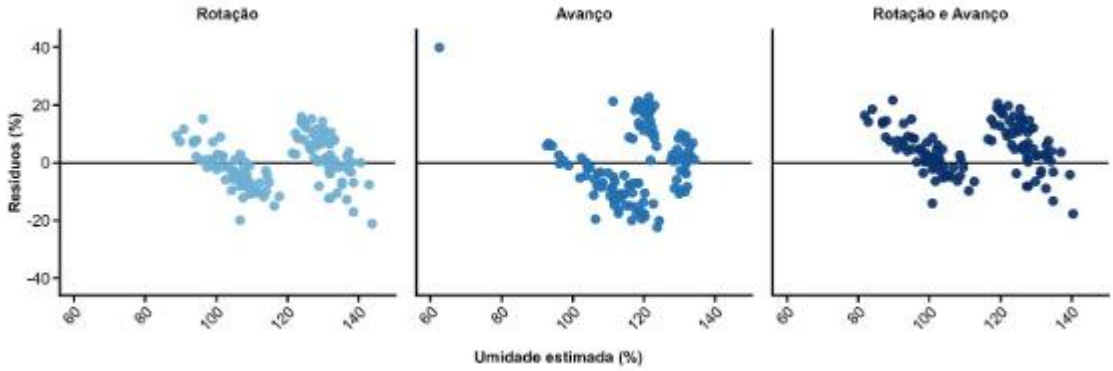


Figura 3 – Distribuição dos resíduos dos modelos de predição da umidade da madeira ajustados com as variáveis rotação, avanço e rotação associada ao avanço.

Apesar do bom desempenho, houve formação de grupos nos gráficos de resíduos (Figura 4). Esse comportamento pode estar associado à variabilidade entre clones ou às diferenças internas da madeira no sentido radial, como cerne e alburno e lenho inicial e tardio. Assim, fatores genéticos, anatômicos e físicos ainda podem influenciar a relação entre resistência à perfuração e umidade.

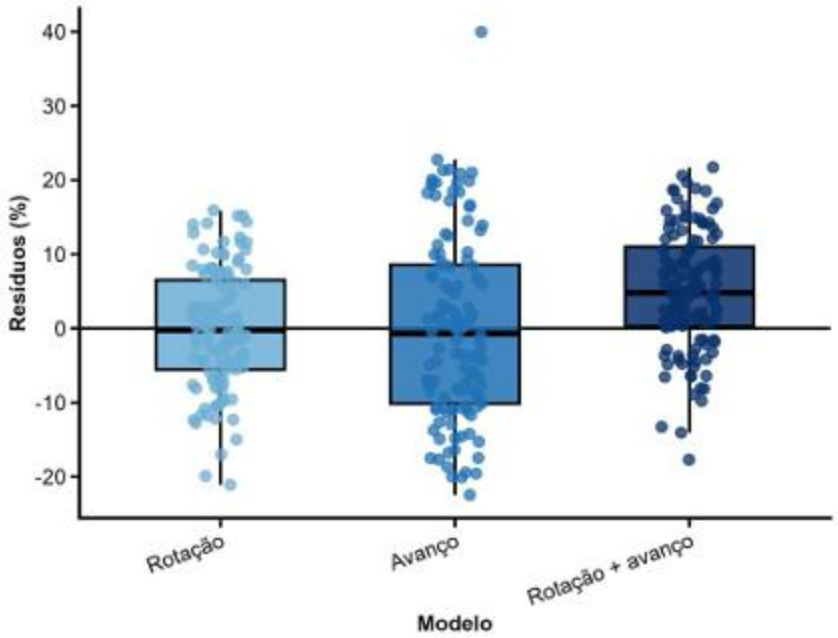


Figura 4 – Variação dos resíduos dos modelos de predição da umidade da madeira em função dos valores estimados.

A rotação foi a variável mais eficiente para estimar a umidade da madeira de eucalipto em árvores em pé. O modelo explicou 76,80% da variação dos dados e apresentou erro padrão de 8,08%, demonstrando potencial para uso em avaliações rápidas e menos destrutivas em campo.

4. Conclusões

A resistência à perfuração apresentou potencial para estimar o teor de umidade da madeira de eucalipto em árvores em pé. Entre as variáveis avaliadas, a rotação foi a mais eficiente, explicando 76,80% da variação da umidade, com erro padrão da estimativa de 8,08%.

O modelo ajustado apenas com rotação apresentou desempenho semelhante ao modelo com rotação e avanço, indicando que a inclusão do avanço não melhorou a precisão da estimativa. Dessa forma, o modelo com rotação é mais adequado por ser simples, significativo e apresentar boa capacidade preditiva.

A resistência à perfuração pode ser considerada uma alternativa rápida e menos invasiva para avaliações preliminares da umidade da madeira em campo, contribuindo para o controle da qualidade da madeira e para a seleção de materiais em programas florestais.

5. Agradecimentos

Os autores agradecem à Universidade Federal do Espírito Santo (UFES), ao Núcleo de Qualidade da Madeira (NUQMAD), ao Programa Cooperativo sobre Densidade da Madeira (ProDM), ao Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais (IPEF), à Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação do Espírito Santo (FAPES), à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e aos colaboradores de campo e laboratório pelo apoio à realização deste estudo.

6. Referências bibliográficas

Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2022). ABNT NBR 7190-3: Projeto de estruturas de madeira - Parte 3: Métodos de ensaio para corpos de prova isentos de defeitos para madeiras de florestas nativas. ABNT.

Elissetche, J. P., Alzamora, R. M., Espinoza, Y., Emhart, V., Pincheira, M., Medina, A., & Rubilar, R. (2024). Wood basic density assessment of Eucalyptus genotypes growing under contrasting water availability conditions. Forests, 15, 185. https://doi.org/10.3390/f15010185

Góes, M. B., & Carrasco, E. V. M. (2024). Avaliação avançada de madeira com resistógrafo: Métodos não destrutivos e análise estrutural. Revista PPC - Políticas Públicas e Cidades, 13(1), 1-16. https://doi.org/10.23900/2359-1552v13n1-35-2024

Indústria Brasileira de Árvores. (2025). Relatório anual 2025. IBÁ.

Jesus, D. S., Oliveira, J. T. S., & Nascimento, A. M. (2023). Relationship between wood density and anatomy with drilling resistance by non-destructive evaluation method. Floresta, 53(3), 371-376. https://doi.org/10.5380/rf.v53i3.84759

Medeiros, P. L., Pimenta, A. S., Miranda, N. O., Melo, R. R., Amorim, J. S., & Azevedo, T. K. B. (2025). The myth that eucalyptus trees deplete soil water: A review. Forests, 16(3), 423. https://doi.org/10.3390/f16030423

Papandrea, S. F., Cataldo, M. F., Bernardi, B., Zimbalatti, G., & Proto, A. R. (2022). The predictive accuracy of modulus of elasticity (MOE) in the wood of standing trees and logs. Forests, 13, 1273. https://doi.org/10.3390/f13081273

R Core Team. (2020). R: A language and environment for statistical computing (Version 4.0.2). R Foundation for Statistical Computing. https://www.R-project.org/

Singh, K. P., Siregar, I. Z., Abad, J. I. M., & Karlinasari, L. (2022). Non-destructive modeling using a drilling resistance tool to predict wood basic density of standing trees in a eucalypts plantation in North Sumatra, Indonesia. Biodiversitas, 23(12), 6218-6226. https://doi.org/10.13057/biodiv/d231217

Yang, L., Zheng, J., & Huang, N. (2022). The characteristics of moisture and shrinkage of Eucalyptus urophylla x E. grandis wood during conventional drying. Materials, 15(9), 3386. https://doi.org/10.3390/ma15093386

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Propriedades físicas de painéis MDP híbridos madeira-EPS produzidos com *Ochroma pyramidale* e *Pinus* spp.

José Fellip Catique Marinho[1]; Thâmara dos Santos Osaki[1]; Natalia Durigon Melo[1]; Rodrigo Schmitz[1]; Romulo Koeche[1]; Alexsandro Bayestorff da Cunha[1]; Polliana D'Angelo Rios[1]

[1] Centro de Ciências Agroveterinarias – CAV. Universidade do Estado de Santa Catarina – UDESC.

Resumo: A incorporação de poliestireno expandido (EPS) reciclado em painéis de partículas de média densidade (MDP) representa uma alternativa para o aproveitamento de resíduos poliméricos e o desenvolvimento de materiais mais sustentáveis. Este estudo avaliou as propriedades físicas de painéis MDP híbridos produzidos com *Ochroma pyramidale* e *Pinus* spp. contendo 0, 7,5 e 10% de EPS. Os painéis foram fabricados com densidade nominal de 600 kg m^{-3}, utilizando resina ureia-formaldeído e emulsão de parafina, com incorporação do EPS na camada central. Determinaram-se a densidade aparente, a absorção de água e o inchamento em espessura após 2 e 24 horas de imersão, conforme ABNT NBR 14810-2 (2024). A densidade aparente não foi influenciada pela espécie nem pelo teor de EPS. Em contrapartida, a absorção de água e o inchamento em espessura dependeram da interação entre a espécie e o teor de EPS, evidenciando que a eficiência do polímero está relacionada às características da matéria-prima.

Palavras-chave: Estabilidade dimensional; Poliestireno expandido; Compósitos híbridos.

Physical properties of hybrid wood–EPS particleboards manufactured from *Ochroma pyramidale* and *Pinus* spp.

Abstract: The incorporation of recycled expanded polystyrene (EPS) into medium-density particleboards (MDP) represents an alternative for recycling polymeric waste and developing more sustainable materials. This study evaluated the physical properties of hybrid wood–EPS particleboards manufactured from *Ochroma pyramidale* and *Pinus* spp. containing 0, 7.5, and 10% EPS. The panels were produced at a nominal density of 600 kg m^{-3} using urea-formaldehyde resin and paraffin emulsion, with EPS incorporated into the core layer. Apparent density, water absorption, and thickness swelling after 2 and 24 h of water immersion were determined. Apparent density was not affected by either wood species or EPS content. In contrast, water absorption and thickness swelling depended on the interaction between wood species and EPS content, demonstrating that the effectiveness of EPS is closely related to the characteristics of the lignocellulosic raw material.

Keywords: Dimensional stability; Expanded polystyrene; Hybrid composites.

1. Introdução

A crescente demanda por materiais sustentáveis tem impulsionado o desenvolvimento de painéis reconstituídos que promovam o melhor aproveitamento de recursos florestais e a incorporação de resíduos industriais. Nesse contexto, os painéis de partículas de média densidade (MDP) destacam-se pela ampla utilização nos setores moveleiro e da construção civil, enquanto a incorporação de poliestireno expandido (EPS) reciclado surge como uma alternativa promissora para agregar valor a esse resíduo e reduzir impactos ambientais.

A utilização de espécies de diferentes características anatômicas e densidades pode influenciar significativamente o desempenho físico dos painéis híbridos madeira–EPS. Espécies de baixa densidade, como *Ochroma pyramidale*, e de maior densidade, como *Pinus* spp., apresentam comportamentos distintos durante a consolidação do painel, refletindo em propriedades como teor de umidade, absorção de água e inchamento em espessura. Entretanto, ainda são escassos os estudos que avaliam a influência dessas espécies na produção de painéis MDP híbridos contendo EPS reciclado.

Diante desse contexto, este trabalho teve como objetivo avaliar as propriedades físicas de painéis MDP híbridos madeira–EPS produzidos com *Ochroma pyramidale* e *Pinus* spp., visando contribuir para o desenvolvimento de materiais mais sustentáveis e para o aproveitamento de resíduos poliméricos na indústria de painéis de madeira.

2. Material e métodos

Para a produção dos painéis MDP, utilizaram-se partículas de *Ochroma pyramidale* provenientes de três árvores com 10 anos de idade, oriundas de um plantio comercial localizado em Mira Estrela (SP), e partículas de *Pinus* spp. provenientes da linha de produção industrial da empresa Bonet Madeiras e Papéis Ltda., em Santa Cecília (SC). O poliestireno expandido (EPS), proveniente de material reciclado, foi fragmentado em grânulos de aproximadamente 5 a 10 mm antes da incorporação aos painéis.

Com a densidade pré-estabelecida de 600 $kg.m^{-3}$, 12% de UF e 1% de emulsão de parafina, a fabricação dos painéis envolveu o cálculo das proporções dos componentes, aplicação de resina ureia-formaldeído (UF) e emulsão de parafina por aspersão em tambor giratório (20 rpm, 10 min), formação do colchão em três camadas (25:50:25), com incorporação do EPS apenas na camada central, nas proporções de 0, 7,5 e 10%, seguida de prensagem a quente a 160 °C por 10 min. Após climatização (20 ± 2 °C e 65 ± 3% de umidade relativa) até

massa constante, os painéis foram esquadrejados e confeccionados os corpos de prova. Avaliaram-se a densidade aparente, a absorção de água e o inchamento em espessura após 2 e 24 h de imersão, conforme a ABNT NBR 14810-2 (2024). O experimento foi conduzido em delineamento inteiramente casualizado, em esquema fatorial 2 × 3 (duas espécies × três teores de EPS), sendo os dados submetidos à análise de variância e, quando necessário, ao teste de Tukey ($p \leq 0,05$).

3. Resultados e discussão

3.1 Densidade aparente

A densidade dos painéis não foi influenciada pela espécie de madeira nem pelo teor de EPS, uma vez que não foram observados efeitos significativos da interação entre esses fatores ($p > 0,05$). Da mesma forma, os efeitos principais de espécie e teor de EPS também não apresentaram diferenças significativas para essa propriedade ($p > 0,05$). As médias variaram de 605,68 a 608,98 kg·m^{-3} entre as espécies e de 606,20 a 609,91 kg·m^{-3} entre os teores de EPS, sem formação de grupos distintos pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade, valores próximos à densidade nominal previamente estabelecida de 600 kg.m³.

De acordo com a ABNT NBR 14810-2 (2024), painéis de partículas com densidade entre 551 e 750 kg/m³ são classificados como painéis de média densidade (MDP). Dessa forma, todos os tratamentos avaliados enquadram-se nessa categoria, atendendo aos requisitos normativos estabelecidos para essa classificação.

Tabela 1 - Efeitos principais de espécie e teor de EPS sobre a densidade dos painéis.

Fator	**Nível**	**Densidade (kg.m^{-3})**
Espécie	*Pinus*	605,68a
	O. pyramidale	608,98a
Teor de EPS (%)	0	606,20a
	7,5	609,91a
	10	607,54a

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

A ausência de diferenças significativas na densidade está relacionada ao fato de que a densidade final dos painéis é predominantemente determinada pela massa do colchão e pelo

volume consolidado durante a prensagem. A incorporação de EPS atua principalmente preenchendo vazios e modificando a microestrutura interna do painel, sem alterar substancialmente a relação massa/volume quando a densidade nominal é previamente estabelecida. Esse comportamento foi igualmente observado por Luo *et al*. (2020), Rofdi *et al*. (2024) e Boruszewski *et al*. (2022), que relataram densidades finais semelhantes entre tratamentos contendo diferentes teores de EPS.

3.2 Absorção de água (AA)

Para a absorção de água após 2 h, a análise de variância indicou efeito significativo dos fatores espécie ($p < 0,0001$) e teor de EPS ($p = 0,0206$), enquanto a interação entre esses fatores não foi significativa ($p = 0,2357$). Dessa forma, os fatores atuaram de maneira independente sobre a propriedade avaliada, permitindo a interpretação dos efeitos principais (Tabela 2).

Tabela 2 – Efeitos principais dos fatores sobre a absorção de água após 2h. Médias seguidas pela mesma letra dentro de cada fator, não diferem estatisticamente entre si ($p > 0,05$).

Fator	**Nível**	**AA (%)**
Espécie	*Pinus*	$28,04_{(11,59)}{}^{b}$
	O. pyramidale	$57,96_{(15,08)}{}^{a}$
EPS (%)	0	$42,54_{(19,04)}{}^{a}$
	7,5	$46,78_{(24,08)}{}^{a}$
	10	$32,75_{(15,64)}{}^{b}$

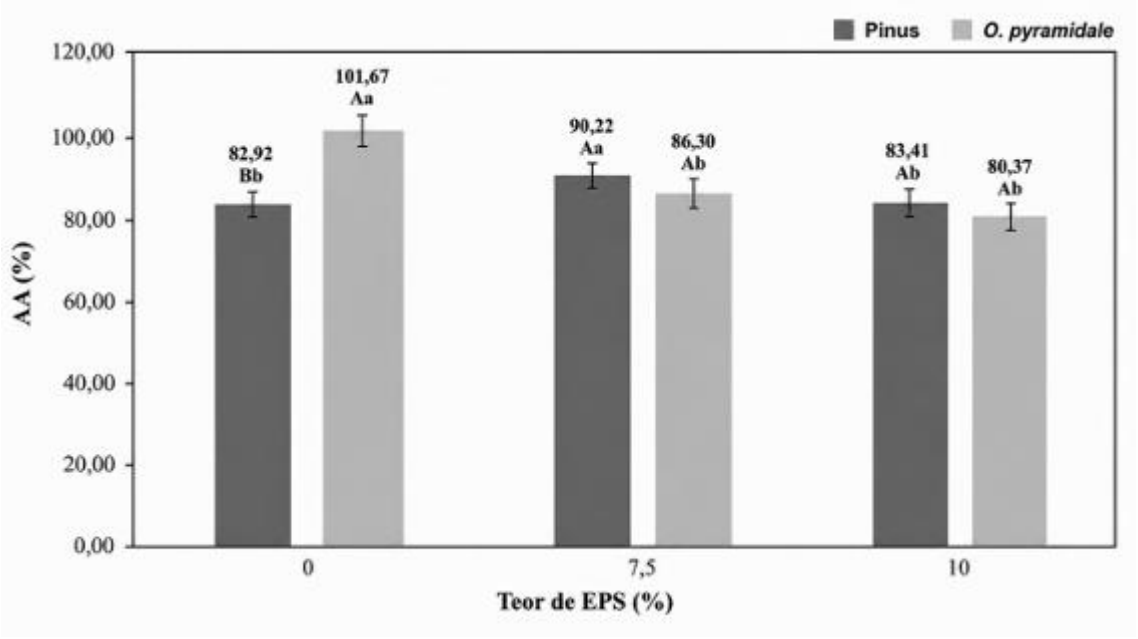
Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Em relação à espécie, os painéis produzidos com madeira de balsa apresentaram maior absorção de água que aqueles produzidos com pinus, evidenciando a elevada susceptibilidade da madeira de balsa à penetração de água devido à sua menor densidade e maior porosidade (Barbirato *et al.*, 2020).

Para o fator EPS, é observado que a incorporação de 10% de EPS resultou na menor absorção média de água, diferindo dos níveis 0% e 7,5%, os quais não apresentaram diferença significativa entre si. Esse resultado indica que o aumento da proporção de EPS foi eficiente em reduzir a absorção inicial de água dos painéis, provavelmente em razão da natureza hidrofóbica do polímero.

Para a absorção de água após 24 h de imersão, foi observada interação significativa entre a espécie e o teor de EPS ($p < 0,0001$), indicando que o efeito do polímero depende da espécie utilizada. Dessa forma, a interpretação foi realizada com base no desdobramento dos fatores (Figura 1).

Figura 1 – Desdobramento da interação Espécie x EPS para Absorção de Água em 24 h. Médias seguidas pela mesma letra maiúscula, para um mesmo teor de EPS, e pela mesma letra minúscula, para uma mesma espécie, não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$).



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Na ausência de EPS, os painéis produzidos com *O. pyramidale* apresentaram absorção de água significativamente superior à observada para os painéis de *Pinus*. Entretanto, com a incorporação de 7,5% e 10% de EPS, as diferenças entre as espécies deixaram de ser significativas, indicando que a adição do polímero foi capaz de reduzir a discrepância inicial de absorção entre os materiais.

Dentro da espécie *O. pyramidale*, a incorporação de EPS promoveu redução significativa da absorção de água, sendo observado o maior valor na ausência do polímero. Os tratamentos contendo 7,5% e 10% de EPS apresentaram menores médias de absorção, sem diferença significativa entre si. Esse comportamento evidencia a eficiência do EPS na redução da absorção de água em longo período de imersão. De forma semelhante, Bekhta *et al*. (2022) e Luo *et al*. (2020) observaram que a incorporação de EPS em painéis particulados melhora a estabilidade hídrica do material, promovendo reduções na absorção de água.

Para os painéis produzidos com *Pinus*, foi observado comportamento não linear, com aumento da absorção na concentração intermediária de 7,5%, seguido de redução no teor de 10%, o qual é estatisticamente igual ao observado para 0%.

Diante disso, os resultados demonstram que a eficiência do EPS depende da espécie utilizada, uma vez que o efeito hidrofóbico foi mais pronunciado nos painéis produzidos com *O. pyramidale*, enquanto os painéis de *Pinus* apresentaram baixa sensibilidade à incorporação do polímero. Diferentemente dos estudos disponíveis na literatura, que normalmente avaliam apenas uma espécie de madeira, o presente trabalho evidencia que a resposta à incorporação de EPS é dependente da matéria-prima utilizada. Essa diferença pode estar relacionada às características anatômicas e estruturais das espécies, como densidade básica, porosidade, geometria das partículas e razão de compactação, fatores reconhecidamente importantes para o comportamento higroscópico de painéis particulados (Kelly, 1977; Maloney, 1993).

3.2 Inchamento em espessura (IE)

A análise de variância indicou efeito significativo dos fatores espécie ($p < 0,0001$) e concentração de EPS ($p = 0,0027$), enquanto a interação entre esses fatores não foi significativa ($p = 0,0974$). Dessa forma, o comportamento dos níveis de EPS foi semelhante para ambas as espécies, permitindo a interpretação dos efeitos principais (Tabela 3).

Tabela 3 – Efeitos principais dos fatores sobre o inchamento em espessura (IE) após 2h. Médias seguidas pela mesma letra dentro de cada fator, não diferem estatisticamente entre si ($p > 0,05$).

Fator	Nível	IE (%)
Espécie	*O. pyramidale*	$15,26_{(3,94)}$a
	Pinus	$7,94_{(4,02)}$b
EPS (%)	0	$9,98_{(5,84)}$b
	7,5	$12,15_{(5,75)}$a
	10	$10,73_{(4,33)}$ab

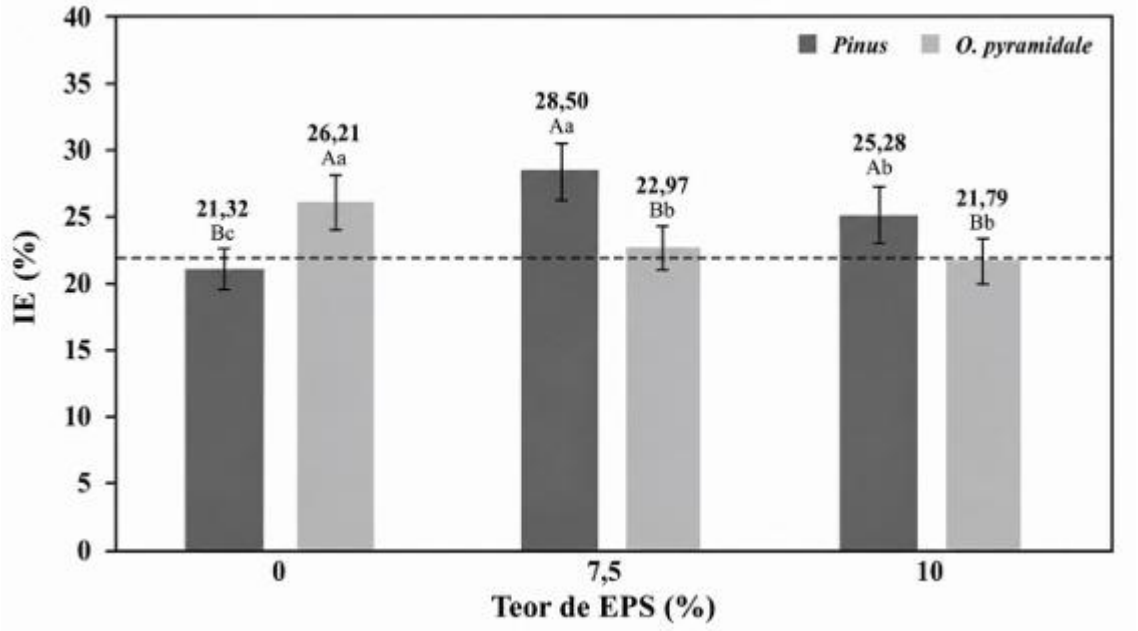
Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Semelhante ao comportamento para absorção de água, no inchamento os painéis produzidos com madeira de Balsa apresentaram maior inchamento médio em espessura após 2 horas de imersão do que aqueles produzidos com Pinus. Essa diferença evidencia mais uma vez que as características anatômicas da espécie influência diretamente a relação com a água.

Para o fator EPS, foi observado que a concentração de 7,5% resultou nos maiores valores médios de inchamento, diferindo do tratamento sem EPS, enquanto a concentração de 10% apresentou comportamento intermediário, indicando que o aumento da concentração de EPS não promoveu redução linear do inchamento nas primeiras horas de imersão.

Para o inchamento após 24 horas, foi observada interação significativa entre espécie e concentração de EPS ($p < 0,0001$), indicando que a resposta à adição de EPS depende da espécie utilizada (Figura 2).

Figura 2 – Desdobramento da interação Espécie x EPS para Inchamento em espessura (IE) em 24 h. Médias seguidas pela mesma letra maiúscula, para um mesmo teor de EPS, e pela mesma letra minúscula, para uma mesma espécie, não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$).



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Na madeira de *Pinus*, o aumento da concentração de EPS promoveu elevação do inchamento em espessura em relação ao tratamento controle, sendo o maior valor observado para a concentração de 7,5%, seguida de 10%, enquanto o menor inchamento foi registrado na ausência do polímero. Assim, para essa espécie, a incorporação de EPS não contribuiu para melhorar a estabilidade dimensional após 24 horas de imersão.

Em contrapartida, os painéis produzidos com *O. pyramidale* apresentaram comportamento oposto. O tratamento sem EPS apresentou o maior inchamento em espessura, enquanto as concentrações de 7,5% e 10% reduziram significativamente essa propriedade, formando um mesmo grupo estatístico. Esse comportamento corrobora os resultados obtidos

por Corrêa *et al*. (2025), que verificaram redução do inchamento em espessura em painéis MDP produzidos com *O. pyramidale* contendo EPS. Resultados semelhantes também foram relatados por Bekhta *et al*. (2022), que observaram melhora da estabilidade dimensional em painéis leves contendo EPS, atribuindo esse efeito ao caráter hidrofóbico do polímero.

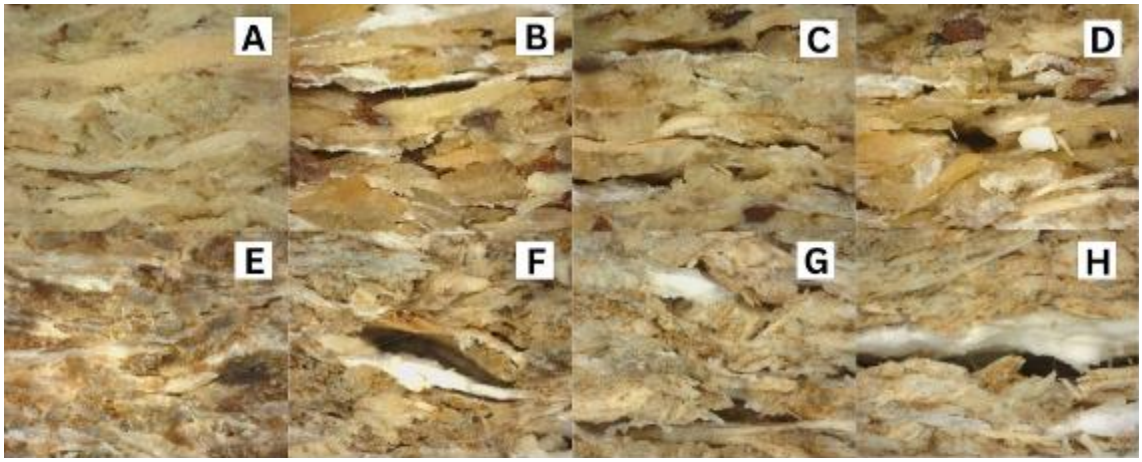
Ao comparar as espécies dentro de cada concentração, foi observado que, na ausência de EPS, os painéis produzidos com *O. pyramidale* apresentaram maior inchamento em espessura que aqueles produzidos com *Pinus*. Entretanto, na concentração de 7,5%, ocorreu inversão desse comportamento, com os painéis de *Pinus* apresentando valores significativamente superiores. Na concentração de 10%, por sua vez, não foram observadas diferenças significativas entre as espécies.

Além disso, considerando o requisito estabelecido pela ABNT NBR 14810-2 (2018) para painéis do tipo P2 (inchamento em espessura após 24 horas ≤ 22%), apenas os tratamentos Pinus sem EPS e *O. pyramidale* com 10% de EPS atenderam ao valor normativo. Embora o tratamento de *O. pyramidale* com 7,5% de EPS tenha apresentado média ligeiramente superior, este não diferiu estatisticamente do tratamento com 10%, indicando desempenho equivalente quanto à estabilidade dimensional.

Diante desse comportamento, foi realizada uma análise macroscópica da estrutura dos painéis após o ensaio de imersão, com o objetivo de compreender o comportamento observado para a absorção de água e o inchamento em espessura. Conforme ilustrado na Figura 3, a incorporação do EPS não promoveu o preenchimento homogêneo dos espaços entre as partículas de madeira. Em todos os tratamentos contendo o polímero, observam-se partículas de EPS preservadas, frequentemente associadas à presença de vazios e descontinuidades estruturais, indicando que o material não formou uma fase contínua no interior do painel.

Essas descontinuidades atuaram como vias preferenciais para a penetração e difusão da água durante a imersão, favorecendo o transporte capilar e, consequentemente, contribuindo para os elevados valores de absorção de água e inchamento em espessura. Assim, embora o EPS seja um material hidrofóbico, sua incorporação, nas condições empregadas neste estudo, não foi suficiente para eliminar a porosidade interna dos painéis, uma vez que permaneceram cavidades ao redor das partículas do polímero.

Figura 3: Imagem microscópica dos painéis pós ensaio de absorção de água e inchamento em espessura. A) Pinus sem adição de EPS; B) Pinus + 5% de EPS; C) Pinus + 7,5% de EPS; D) Pinus + 10% de EPS; E) Balsa sem adição de EPS; F) Balsa + 5% de EPS; G) Balsa + 7,5% de EPS; H) Balsa + 10% de EPS.



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

4. Conclusões

A incorporação de EPS reciclado mostrou potencial para melhorar a estabilidade hídrica de painéis MDP, porém sua eficiência foi dependente da espécie de madeira empregada. Os resultados evidenciam que a interação entre as características da matéria-prima lignocelulósica e o polímero exerce papel determinante no desempenho físico dos painéis, indicando que a seleção da espécie é um fator essencial para o desenvolvimento de compósitos híbridos com melhor estabilidade dimensional.

5. Agradecimentos

A Universidade do Estado de Santa Catarina – UDESC, pela concessão de bolsa e disponibilidade do espaço para o desenvolvimento do estudo.

6. Referências bibliográficas

Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2024). ABNT NBR 14810-2:2024: Painéis de partículas de média densidade – Parte 2: Requisitos e métodos de ensaio. ABNT.

Barbirato, G. H. A., Lopes Junior, W. E., Hellmeister, V., Pavesi, M., & Fiorelli, J. (2020). OSB panels with balsa wood waste and castor oil polyurethane resin. **Waste and Biomass Valorization**, 11, 743–751. https://doi.org/10.1007/s12649-018-0474-8

Bekhta, P., Kozak, R., Sedliačik, J., Gryc, V., Sebera, V., Bajzová, L., & Iždinský, J. (2022). Selected properties of veneered lightweight particleboards with expanded polystyrene. **Materials**, 15(18), 6474. https://doi.org/10.3390/ma15186474

CORRÊA, C. A.; TEIXEIRA, M. Z.; KOCH MATTOS, M. B. et al. Sustainable reuse of expanded polystyrene waste in Ochroma pyramidale particle boards. I**nternational Wood Products Journal**, Abingdon, v. 16, n. 3, p. 172-179, 2025. DOI: https://doi.org/10.1080/20426445.2025.2487354.

KELLY, M. W. Critical literature review of relationships between processing parameters and physical properties of particleboard. Madison: USDA Forest Service, Forest Products Laboratory, 1977. (General Technical Report FPL-10).

LUO, S.; GAO, L.; GUO, W. Effect of expanded polystyrene content and press temperature on low-density wood particleboard. **Maderas. Ciencia y Tecnología**, Concepción, v. 22, n. 4, p. 549-558, 2020. DOI: https://doi.org/10.4067/S0718-221X2020005000412.

MALONEY, T. M. Modern particleboard and dry-process fiberboard manufacturing. 2. ed. San Francisco: Miller Freeman, 1993.

Rofdi, M. I., Mohamed Tamat, N. S., Nuryawan, A., Sakagami, H., & Hermawan, A. (2024). Studies on particleboard production using expanded polystyrene (EPS) waste as a binder for construction applications. **Construction and Building Materials**, 449, 138279. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.138279

Boruszewski, P., Borysiuk, P., Jankowska, A., & Pazik, J. (2022). Low-density particleboards modified with expanded and unexpanded fillers—Characteristics and properties. **Materials, 15**(13), 4430. https://doi.org/10.3390/ma15134430.

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Propriedades físico-mecânicas de painéis compensados de Pinus com diferentes revestimentos após intemperismo acelerado

Tarcisio Francisco de Camargo[1]; Sandiane Carla Krefta[1]; Camila Alves Corrêa[1]; Maickele Aparecida Muniz[1]; Marine Alves Antonello[1]; Nicolas Costa Pucci[1]; Thâmara dos Santos Osaki[1]; Alexsandro Bayesrtorff da Cunha[1]

[1] Universidade do Estado de Santa Catarina – UDESC

Resumo: Este estudo avaliou o efeito do intemperismo acelerado sobre as propriedades físicas e mecânicas de painéis compensados de *Pinus* spp. com diferentes revestimentos superficiais. Foram utilizados cinco tipos de superfície: sem revestimento, óleo vegetal, resina melamínica, filme melamínico e tego filme. Os corpos de prova foram submetidos a 0, 10, 30 e 50 ciclos conforme o ciclo 7 da ASTM G154, envolvendo radiação UV, precipitação e condensação. Determinaram-se densidade, teor de umidade e módulo de ruptura paralelo e perpendicular. A densidade média não apresentou diferenças estatísticas entre revestimentos ou ciclos, embora a comparação dos mesmos corpos de prova antes e após a exposição tenha indicado reduções específicas, mais intensas para painéis com tego filme e resina melamínica. O teor de umidade diminuiu aos 10 ciclos e aumentou parcialmente nos ciclos seguintes, mantendo-se sempre abaixo do limite recomendado. O módulo de ruptura permaneceu acima dos valores mínimos exigidos, com variações pontuais entre revestimentos, mas sem prejuízo mecânico. Os resultados mostram que os revestimentos influenciam o comportamento dos painéis frente ao intemperismo, sem comprometer sua integridade estrutural.

Palavras-chave: Intemperismo; Propriedades; Revestimentos

Physical-Mechanical Properties of Pinus Plywood Panels with Different Surface Coatings after Accelerated Weathering

Abstract: This study evaluated the effect of accelerated weathering on the physical and mechanical properties of Pinus spp. plywood panels with different surface coatings. Five surface types were used: uncoated, vegetable oil, melamine resin, melamine film, and tego film. The specimens were subjected to 0, 10, 30, and 50 cycles according to cycle 7 of ASTM G154, involving UV radiation, water spray, and condensation. Density, moisture content, and parallel and perpendicular modulus of rupture were determined. Average density showed no statistical differences among coatings or cycles, although comparison of the same specimens before and after exposure indicated specific reductions, more pronounced for panels with tego film and melamine resin. Moisture content decreased at 10 cycles and partially increased in subsequent cycles, remaining below the recommended limit. The modulus of rupture remained above the minimum required values, with punctual variations among coatings but without mechanical impairment. The results show that the coatings influence the behavior of the panels under weathering, without compromising their structural integrity**.**

Keywords: Weathering; Properties; Coatings

1. Introdução

O setor de base florestal abrange atividades primárias, como silvicultura, manejo e exploração de florestas nativas e plantadas, além de atividades secundárias, entre elas a produção de celulose e papel, carvão, energia, processamento mecânico e fabricação de painéis (Fonseca et al., 2011). O segmento de painéis pode ser classificado em três categorias, conforme o tipo de matéria-prima utilizada, que pode ser derivada de lâminas, partículas ou fibras (Fischer e Zylbersztajn, 2012).

Os painéis compensados laminados são fabricados a partir de lâminas finas de madeira, coladas em número ímpar de camadas. Essas lâminas são posicionadas de forma cruzada entre si, o que confere maior estabilidade dimensional, rigidez e resistência mecânica ao produto (Lima, 2015). A produção mundial de compensados teve início em 1913. No Brasil, a fabricação começou por volta de 1940, na região Sul, utilizando principalmente *Araucaria angustifoli*a. Com o avanço da exploração não controlada das florestas nativas, a produção de lâminas passou a depender de florestas plantadas, sobretudo de espécies como *Pinus taeda* L. e *Pinus elliottii* Engel. (Palma et al., 2017).

Para avaliar materiais submetidos à radiação solar e chuva, pode-se empregar a norma ASTM G154 (2006), especialmente o ciclo sete, indicado para produtos de madeira natural ou revestidos. A principal vantagem desse método é a rapidez, já que ele simula de forma acelerada os efeitos ambientais, permitindo observar o comportamento dos materiais ao longo do tempo de maneira eficiente (Yildizet al., 2013). De acordo os mesmos autores, nesse ciclo, o material é submetido em câmara de intemperismo acelerado a oito horas de lâmpada UVA–340, com irradiação de 1,35 $W \cdot m^{-2} \cdot nm$ e temperatura de 60 (±3) °C; seguido por quinze minutos de spray de água sem luz, em temperatura ambiente; e três horas e quarenta e cinco minutos de condensação a 50 (±3) °C. A quantidade de ciclos aplicados varia conforme o tipo de produto, sua finalidade e as características da pesquisa.

A avaliação dos materiais após os ciclos pode ser feita por análises colorimétricas, quando o objetivo é examinar a superfície quanto ao aspecto estético, ou por ensaios de resistência e rigidez, que permitem identificar efeitos da degradação física causada por temperatura e umidade. Além disso, conhecer propriedades físicas como densidade e teor de umidade é fundamental, já que influenciam diretamente outras características do material (Dias et al., 2005).

Diversos estudos baseados na ASTM G154 (2006) e no uso da câmara de intemperismo acelerado já foram desenvolvidos. Um exemplo é o trabalho de Pace et al. (2018), que investigou o efeito do intemperismo no acabamento superficial e na coloração da madeira de

Corymbia citriodora e *Khaya ivorensis*. Os autores utilizaram a câmara para simular condições reais de exposição e, posteriormente, realizaram análises colorimétricas com espectrofotômetro, concluindo que o intemperismo provocou alterações nas madeiras avaliadas.

Diante desse contexto, torna-se essencial compreender como materiais à base de madeira se comportam quando submetidos a condições ambientais adversas simuladas em laboratório, especialmente no que diz respeito às alterações físicas e mecânicas que podem comprometer seu desempenho e aplicação final. Assim, este estudo tem como determinar as propriedades físicas e mecânicas de painéis compensados, com diferentes tipos de revestimento superficial, após exposição a condições ambientais adversas em câmara de intemperismo acelerado.

2. Material e métodos

Foram utilizados 20 painéis compensados de *Pinus* spp. (2440 × 1220 × 18 mm), sendo 16 sem revestimento e 4 com tego filme de fábrica. Após o seccionamento em peças de 500 × 500 mm, obtiveram-se 80 unidades, distribuídas em cinco grupos de superfície: Natural, Óleo vegetal, Resina melamínica, Filme melamínico e Tego filme.

A aplicação dos revestimentos ocorreu da seguinte forma: o óleo vegetal foi distribuído manualmente até 200 g/m² e deixado secar ao ar por 24 h; a resina melamínica foi preparada com 85% resina, 10% farinha de trigo, 5% cloreto de amônio e corante, aplicada até 15 g/m² e curada em prensa a 120 °C e 4 kgf/cm² por 5 min; o filme melamínico foi posicionado sobre a superfície e consolidado em prensa a 125 °C e 12 kgf/cm² por 7 min.

2.1 Exposição em câmara de intemperismo acelerado

Para avaliar a influência da exposição a condições ambientais adversas sobre as propriedades físico-mecânicas, os painéis foram submetidos a três condições de envelhecimento acelerado em câmara de intemperismo, conforme o ciclo 7 da ASTM G154 (2006): 10, 30 e 50 ciclos compostos por 8 h de radiação UV a 60 ± 3 °C, 0,25 h de precipitação à temperatura ambiente e 3,45 h de condensação a 50 ± 3 °C. Incluiu-se também uma condição testemunha, na qual os painéis foram climatizados a 20 °C e 65% UR até massa constante. No total, foram avaliados 20 tratamentos, cada um com 10 repetições.

Para cada tipo de revestimento, foram confeccionados 40 corpos de prova (150 × 75 × 18 mm), sendo 20 paralelos e 20 perpendiculares às fibras. Em cada ciclo de exposição, selecionaram-se 10 corpos de prova por revestimento (5 paralelos e 5 perpendiculares),

totalizando 40 unidades por ciclo. Desses, 30 foram submetidos à câmara de intemperismo acelerado, enquanto os 10 restantes, referentes à condição testemunha, foram mantidos em câmara climática a 20 ± 3 °C e 65 ± 2% UR até massa constante.

2.2 Ensaios físicos e mecânicos

Cada corpo de prova teve suas dimensões (comprimento, largura e espessura) medidas com paquímetro e micrômetro, e sua massa determinada em balança analítica, permitindo o cálculo da densidade conforme a NBR 9485 (ABNT, 2011). Ao término de cada ciclo de exposição (0, 10, 30 e 50), os corpos de prova foram novamente medidos e pesados para atualização da densidade. Em seguida, foi determinado o módulo de ruptura (MOR) segundo a NBR 9533 (ABNT, 2012).

2.3 Análise estatística

O delineamento adotado foi o multifatorial, com cinco revestimentos e quatro níveis de exposição. As propriedades físicas e mecânica foram inicialmente avaliadas quanto à presença de outliers (box-plot), normalidade (Shapiro-Wilk ou Kolmogorov-Smirnov) e homogeneidade das variâncias (Levene) para verificar a adequação da estatística paramétrica. Atendidos os pressupostos, aplicou-se ANOVA e, quando necessário, o teste de Tukey a 95% de confiança, utilizando Microsoft Excel® e SISVAR.

3. Resultados e discussão

A Tabela 1 mostra que os valores médios de densidade permaneceram bem próximos entre os revestimentos e ao longo dos diferentes ciclos de exposição. Essa equivalência indica que o intemperismo aplicado não provocou alterações relevantes na massa ou nas dimensões dos painéis, resultando na ausência de diferenças estatísticas entre os tratamentos. Essa estabilidade na densidade é importante, pois pode afetar diretamente o comportamento mecânico dos painéis.

É possível verificar que houve uma tendência de redução da densidade até 10 ciclos e um leve aumento nos ciclos seguintes, porém sem diferença estatística significativa entre os tratamentos (Tabela 1). Entretanto, é importante destacar que as avaliações de 0, 10, 30 e 50 ciclos não foram realizadas nos mesmos corpos de prova, o que limita a interpretação direta dessa variação.

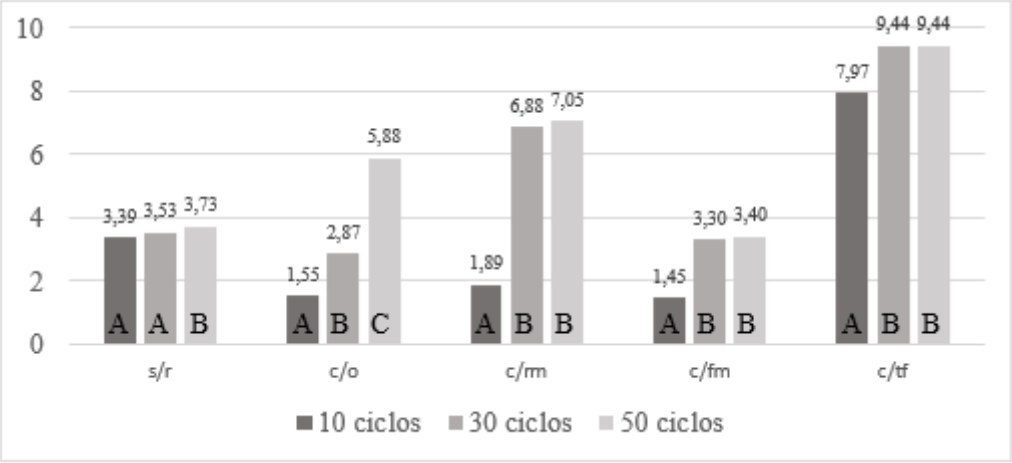
Tabela 1 – Valores médios de densidade dos painéis ao longo dos ciclos (kg.m^{-3})

Trat.	0 (ciclo)	10 (ciclos)	30 (ciclos)	50 (ciclos)
S/r	$^{(T1)}$ 571 Aa$_{(2,74)}$	$^{(T1)}$ 558 Aa$_{(3,26)}$	$^{(T1)}$ 568 Ba$_{(3,66)}$	$^{(T1)}$ 570 Aa$_{(4,01)}$
R/o	$^{(T2)}$ 594 Aa$_{(4,37)}$	$^{(T2)}$ 583 Aa$_{(2,75)}$	$^{(T2)}$ 585 Aa$_{(3,56)}$	$^{(T2)}$ 589 Aa$_{(4,16)}$
R/rm	$^{(T3)}$ 580 Aa$_{(6,00)}$	$^{(T3)}$ 568 Aa$_{(3,02)}$	$^{(T3)}$ 582 Aa$_{(4,65)}$	$^{(T3)}$ 584 Aa$_{(2,75)}$
R/fm	$^{(T4)}$ 596 Aa$_{(3,26)}$	$^{(T4)}$ 568 Aa$_{(2,53)}$	$^{(T4)}$ 590 Aa$_{(4,31)}$	$^{(T4)}$ 591 Aa$_{(5,75)}$
R/tf	$^{(T5)}$ 576 Aa$_{(3,60)}$	$^{(T5)}$ 561 Aa$_{(4,03)}$	$^{(T5)}$ 565 Ba$_{(5,28)}$	$^{(T5)}$ 572 Aa$_{(3,75)}$
x̄	583	568	577	581

Legenda: Trat. e T: tratamento; s/r: sem revestimento; r/o: revestimento com óleo; r/rm: revestimento com resina melamínica; r/fm: revestimento com filme melamínico; r/tf: revestimento com tego filme; valores subscritos e entre parênteses: coeficiente de variação (%); médias seguidas de mesma letra maiúscula na coluna não diferem estatisticamente entre si para revestimento dentro de um mesmo ciclo (intervalo de tempo); médias seguidas de mesma letra minúscula na linha não diferem entre si para intervalo de tempo, dentro de um mesmo revestimento; ambos pelo Teste de Tukey (<0,05).

A Figura 2 evidencia que a redução percentual da densidade ao longo dos ciclos não ocorreu de forma uniforme entre os revestimentos.

Figura 2 - Variação percentual média de densidade dos painéis após os ciclos.



Legenda: S/r: sem revestimento; c/o: revestimento com óleo; c/rm: revestimento com resina melamínica, c/fm: revestimento com filme melamínico; c/tf: revestimento com *tego filme*. Médias com letra maiúscula dentro de um mesmo revestimento não diferem estatisticamente entre sim pelo Teste de Tukey (<0,05).

Os painéis com tego filme apresentaram as maiores quedas, com reduções de 7,97% entre 0 e 10 ciclos e 9,44% entre 10 e 30 ciclos, mantendo esse patamar aos 50 ciclos. Os painéis com resina melamínica mostraram redução expressiva aos 30 ciclos (6,88%), enquanto aqueles revestidos com óleo vegetal apresentaram maior queda apenas aos 50 ciclos (5,88%). Esses resultados indicam que cada revestimento respondeu de maneira distinta ao intemperismo, refletindo diferenças na interação entre o material aplicado e as condições de exposição.

A redução observada nos valores de densidade ao longo dos ciclos pode estar relacionada ao longo período de radiação aplicado em cada etapa do intemperismo, o que tende a diminuir o teor de umidade dos painéis e, consequentemente, sua massa. Além da perda de água, estudos como o de Gonçalez et al (2010) mostram que a exposição contínua ao intemperismo promove degradação acentuada de componentes como lignina e carbonilas, enquanto a celulose permanece praticamente estável. Esses processos combinados ajudam a explicar a diminuição gradual da densidade registrada ao longo dos ciclos.

Além da perda de umidade e das alterações químicas mencionadas, os painéis revestidos também podem sofrer degradação fotoquímica causada pela radiação ultravioleta. Esse processo compromete a superfície do material e acelera a degradação de extrativos próximos à camada externa, o que contribui para a redução da densidade (Chang et al., 1982; Ayadi et al., 2003; Gonçalez et al., 2010). No presente estudo, esse efeito foi mais evidente nos painéis revestidos com tego filme aos 10 ciclos, seguido pelos painéis com resina melamínica aos 30 ciclos, indicando maior sensibilidade desses revestimentos à ação fotoquímica.

A Tabela 2 mostra que não houve diferença significativa no teor de umidade entre os revestimentos, independentemente do número de ciclos aplicados. Dentro de cada revestimento, observa-se uma redução média de cerca de 40% após 10 ciclos, resultado da exposição contínua à radiação, precipitação e condensação. Nos ciclos seguintes (30 e 50), o teor de umidade voltou a aumentar, com incremento médio de aproximadamente 25%, indicando uma recuperação parcial da umidade ao longo do intemperismo.

Independentemente do tipo de revestimento e do tempo de exposição na câmara de intemperismo, todos os painéis permaneceram dentro do limite máximo de teor de umidade estabelecido pelo catálogo técnico do PNQM/ABIMCI (2009), que é de 18%. Isso demonstra que, mesmo após os diferentes ciclos de radiação, precipitação e condensação, nenhum tratamento ultrapassou o valor recomendado, garantindo conformidade com o parâmetro industrial.

Tabela 2 – Valores médios de teor de umidade dos painéis (%).

	0 (ciclo)	**10 (ciclos)**	**30 (ciclos)**	**50 (ciclos)**
S/r	$^{(T1)}$10,26 $Aa_{(3,14)}$	$^{(T1)}$6,53 $Ac_{(11,49)}$	$^{(T1)}$7,57 $Ab_{(5,07)}$	$^{(T1)}$7,66 $Ab_{(6,11)}$
R/o	$^{(T2)}$ 10,23 $Aa_{(2,44)}$	$^{(T2)}$ 6,04 $Ac_{(9,86)}$	$^{(T2)}$ 7,98 $Ab_{(8,68)}$	$^{(T2)}$ 7,88 $Ab_{(4,88)}$
R/rm	$^{(T3)}$ 10,59 $Aa_{(1,61)}$	$^{(T3)}$ 6,32 $Ac_{(6,17)}$	$^{(T3)}$ 7,81 $Ab_{(7,70)}$	$^{(T3)}$ 7,73 $Ab_{(5,69)}$
R/fm	$^{(T4)}$ 10,13 $Aa_{(2,76)}$	$^{(T4)}$ 5,78 $Ac_{(13,04)}$	$^{(T4)}$ 7,74 $Ab_{(5,28)}$	$^{(T4)}$ 7,56 $Ab_{(6,05)}$
R/tf	$^{(T5)}$ 10,04 $Aa_{(3,72)}$	$^{(T5)}$ 6,00 $Ac_{(8,13)}$	$^{(T5)}$ 7,34 $Ab_{(6,87)}$	$^{(T5)}$ 7,45 $Ab_{(5,23)}$
Média	10,25	6,13	7,68	7,66

Legenda: Trat. e T: tratamento; s/r: sem revestimento; r/o: revestimento com óleo; r/rm: revestimento com resina melamínica; r/fm: revestimento com filme melamínico; r/tf: revestimento com *tego filme*; valores subscritos e entre parênteses: coeficiente de variação (%); médias seguidas de mesma letra maiúscula na coluna não diferem estatisticamente entre si para revestimento dentro de um mesmo ciclo (intervalo de tempo); médias seguidas de mesma letra minúscula na linha não diferem entre si para intervalo de tempo, dentro de um mesmo revestimento; ambos pelo Teste de Tukey (<0,05).

A Tabela 3 mostra que, dentro de cada ciclo de exposição, os valores de MOR paralelo não diferiram estatisticamente entre os revestimentos. Contudo, ao analisar cada revestimento ao longo dos ciclos, observa-se comportamentos distintos. Os painéis sem revestimento, com óleo e com filme melamínico mantiveram estabilidade no MOR, sem influência do número de ciclos. Já os painéis com filme melamínico apresentaram incremento do MOR aos 30 ciclos, que permaneceu até os 50 ciclos. Para os painéis revestidos com tego filme, houve aumento do MOR aos 10 ciclos, seguido de redução nos ciclos posteriores. Esses resultados evidenciam que a resposta ao intemperismo depende do tipo de revestimento aplicado.

Já na Tabela 4 que, até 10 ciclos de exposição, os valores médios de MOR perpendicular não diferiram estatisticamente entre os revestimentos. Contudo, aos 30 ciclos, os painéis sem revestimento e aqueles com resina melamínica apresentaram redução na rigidez, comportamento que não se repetiu aos 50 ciclos, quando os valores voltaram a níveis semelhantes aos iniciais. Ao analisar cada revestimento ao longo dos ciclos, observa-se que o tempo de exposição não afetou significativamente o MOR perpendicular, com exceção dos painéis sem revestimento, que apresentaram oscilações: aumento até 10 ciclos, queda aos 30 ciclos e novo aumento aos 50 ciclos, sem estabelecer um padrão consistente de comportamento.

Ao comparar os valores de MOR apresentados nas Tabelas 3 (paralelo) e 4 (perpendicular) com os limites mínimos estabelecidos pela ABIMCI (2002) 27,3 MPa para o sentido paralelo e 18,0 MPa para a perpendicular, verifica-se que a maior parte dos resultados ficou bem acima desses parâmetros.

Tabela 3 – Valores médios de módulo de ruptura no sentido paralelo (MPa)

Trat.	**Número de ciclos**			
	0	**10**	**30**	**50**
S/r	$^{(T1)}$43,98 Aa$_{(26,86)}$ (571; 10,26)	$^{(T1)}$50,06 Aa$_{(23,08)}$ (558; 6,53)	$^{(T1)}$44,39Aa$_{(20,04)}$ (568; 7,57)	$^{(T1)}$45,08 Aa$_{(16,23)}$ (570; 7,66)
R/o	$^{(T2)}$ 51,01Aa$_{(12,32)}$ (594; 10,23)	$^{(T2)}$ 40,54 Aa$_{(18,33)}$ (583; 6,04)	$^{(T2)}$ 40,45Aa$_{(26,86)}$ (585; 7,98)	$^{(T2)}$ 44,77 Aa$_{(22,85)}$ (589; 7,88)
R/rm	$^{(T3)}$39,24Ab$_{(16,73)}$ (580; 10,59)	$^{(T3)}$ 39,09 Ab$_{(25,82)}$ (568; 6,32)	$^{(T3)}$ 55,96Aa$_{(26,86)}$ (582; 7,81)	$^{(T3)}$44,57Aab$_{(19,39)}$ (584; 7,73)

R/fm	(T4) 47,64Aa$_{(15,66)}$ (596; 10,13)	(T4) 45,46 Aa$_{(25,64)}$ (568; 5,78)	(T4) 49,24Aa$_{(26,86)}$ (590; 7,74)	(T4) 47,20 Aa$_{(23,51)}$ (591; 7,56)
R/tf	(T5) 36,68Ab$_{(9,95)}$ (576; 10,04)	(T5) 50,09 Aa$_{(18,23)}$ (561; 6,00)	(T5) 40,56Ab$_{(26,86)}$ (565; 7,34)	(T5) 38,42 Ab$_{(24,40)}$ (572; 7,45)
Média	43,71	45,05	46,12	44,00

Legenda: Trat. e T: tratamento; s/r: sem revestimento; r/o: revestimento com óleo; r/rm: revestimento com resina melamínica; r/fm: revestimento com filme melamínico; r/tf: revestimento com *tego filme*; valores subscritos e entre parênteses: coeficiente de variação (%); valores entre parênteses: densidade (kg.m^{-3}) e teor de umidade (%); médias seguidas de mesma letra maiúscula na coluna não diferem estatisticamente entre si para revestimento dentro de um mesmo ciclo (intervalo de tempo); médias seguidas de mesma letra minúscula na linha não diferem entre si para intervalo de tempo, dentro de um mesmo revestimento; ambos pelo Teste de Tukey (<0,05).

Os painéis testemunha (0 ciclos) apresentaram valores médios de MOR, tanto paralelo quanto perpendicular, inferiores aos reportados por Almeida et al. (2013) para compensados de *Pinus sp.* de 18 mm e 13 lâminas. Contudo, esses valores foram superiores aos apresentados no catálogo da ABIMCI (2002), e aos resultados de Cunha et al. (2017) e Cunha et al. (2010), tanto para painéis comerciais quanto laboratoriais. Isso indica que, mesmo antes da exposição ao intemperismo, os painéis do presente estudo já apresentavam desempenho mecânico competitivo em relação à maior parte das referências disponíveis.

Tabela 4 – Valores médios de módulo de ruptura no sentido perpendicular (MPa).

Trat.	**Número de ciclos**			
	0	**10**	**30**	**50**
S/r	(T1)45,18 Ab$_{(11,10)}$ (571; 10,26)	(T1)51,89Aab$_{(20,55)}$ (558; 6,53)	(T1)43,47 Bb$_{(15,63)}$ (568; 7,57)	(T1)55,28 Aa$_{(15,69)}$ (570; 7,66)
R/o	(T2) 44,84 Aa$_{(11,24)}$ (594; 10,23)	(T2) 52,89 Aa$_{(23,52)}$ (583; 6,04)	(T2) 48,40 ABa$_{(8,44)}$ (585; 7,98)	(T2) 47,79Aa$_{(18,71)}$ (589; 7,88)
R/rm	(T3) 50,60 Aa$_{(14,33)}$ (580; 10,59)	(T3) 39,64Aa$_{(17,69)}$ (568; 6,32)	(T3) 43,36 Ba$_{(10,54)}$ (582; 7,81)	(T3) 46,63Aa$_{(19,07)}$ (584; 7,73)
R/fm	(T4) 51,37 Aa$_{(13,30)}$ (596; 10,13)	(T4) 52,39 Aa$_{(24,77)}$ (568; 5,78)	(T4) 57,58 Aa$_{(10,92)}$ (590; 7,74)	(T4) 55,30Aa$_{(14,53)}$ (591; 7,56)
R/tf	(T5) 47,35 Aa$_{(12,15)}$ (576; 10,04)	(T5) 41,98 Aa$_{(20,71)}$ (561; 6,00)	(T5) 47,09 Ba$_{(24,68)}$ (565; 7,34)	(T5) 43,08Aa$_{(15,62)}$ (572; 7,45)
Média	47,87	47,76	48,00	51,62

Legenda: Trat. e T: tratamento; s/r: sem revestimento; r/o: revestimento com óleo; r/rm: revestimento com resina melamínica; r/fm: revestimento com filme melamínico; r/tf: revestimento com *tego filme*; valores subscritos e entre parênteses: coeficiente de variação (%); valores entre parênteses: densidade (kg.m^{-3}) e teor de umidade (%); médias seguidas de mesma letra maiúscula na coluna não diferem estatisticamente entre si para revestimento dentro de um mesmo ciclo (intervalo de tempo); médias seguidas de mesma letra minúscula na linha não diferem entre si para intervalo de tempo, dentro de um mesmo revestimento; ambos pelo Teste de Tukey (<0,05).

4. Conclusões

Os valores médios de densidade entre os corpos de prova utilizados para os ensaios mecânicos não diferiram estatisticamente, tanto entre revestimentos quanto ao longo do tempo de exposição (ciclos). No entanto, quando se analisam os mesmos corpos de prova antes e após a aplicação dos ciclos, observa-se redução expressiva da densidade, mais intensa já aos 10 ciclos para os painéis com tego filme, aos 30 ciclos para os painéis com resina melamínica e aos 50 ciclos para aqueles com óleo e demais revestimentos.

O módulo de ruptura, tanto paralelo quanto perpendicular, manteve desempenho estável entre os revestimentos dentro de cada ciclo, com variações específicas ao longo do tempo, mas sem prejuízo mecânico. Mesmo com oscilações pontuais em alguns revestimentos, todos os valores permaneceram acima dos limites mínimos da ABIMCI (2002), indicando que o intemperismo não comprometeu a resistência à flexão dos painéis.

5. Agradecimentos

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal da Universidade do Estado de Santa Catarina – UDESC; à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - CAPES e à Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação de Santa Catarina – FAPESC.

6. Referências bibliográficas

Almeida, T. H., Almeida, D. H., Ferro, F. S., Varanda, L. D., Campos, C. I., Christoforo, A. L., & Lahr, F. A. R. (2013). Avaliação da qualidade na produção industrial de compensados por meio de testes de flexão e de cisalhamento. Madeira: Arquitetura e Engenharia, 12(31), 45–50.

Ayadi, N., Lejeune, F., Charrier, F., Charrier, B., & Merlin, A. (2003). Color stability of heat-treated wood during artificial weathering. Holz als Roh- und Werkstoff, 61(3), 221–226. https://doi.org/10.1007/s00107-003-0389-2

Associação Brasileira da Indústria da Madeira Processada Mecanicamente. (2002). Catálogo técnico de compensados de pinus (20 p.). ABIMCI.

Chang, S.-T., Hon, D. N. S., & Feist, W. C. (1982). Photodegradation and photoprotection of wood surfaces. Wood and Fiber Science, 14(2), 104–107.

Cunha, A. B., Stüpp, Â. M., Antunes, R., & Brand, M. A. (2017). Produção de painéis compensados com resina fenólica e melamínica sem formaldeído. Floresta, 46(4), 553–560. http://dx.doi.org/10.5380/rf.v46i4.41628

Cunha, A. B., & Matos, J. L. M. (2010). Rigidez e resistência de vigas estruturais de madeira laminada colada e com perfil I compostas por diferentes adesivos. Ciência Florestal, 20, 345–356. https://doi.org/10.5902/198050981857

Dias, F. M. (2005). *Aplicação da resina poliuretana à base de mamona na fabricação de painéis de madeira compensada e aglomerada* (Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo, Ciência e Engenharia dos Materiais). 178 f.

Fonseca, C. B., Costa, G. F., & Dias, F. M. (2011). Reforço com fibras de vidro em painéis compensados: uma alternativa ecológica. Em *SEGET – Simpósio de Excelência em Gestão e Tecnologia, Anais* (Vol. 8, 16 pp.).

Fischer, A., & Zylbersztajn, D. (2012). O fomento florestal como alternativa de suprimento de matéria-prima na indústria brasileira de celulose. REAd – Revista Eletrônica de Administração, 18(2), 494–520.

G Gonçalez, J. C., et al. (2010). Efeito da radiação ultravioleta na cor da madeira de freijó (*Cordia goeldiana* Huber) após receber produtos de acabamentos. Ciência Florestal, 20(4), 657–664. https://doi.org/10.5902/198050982424

Lima, J. C. M., Vieira, R. Y. M., & Oliveira, M. R. (2015). Estudo da viabilidade do uso do sistema de fôrmas deslizantes em comparação com o sistema fôrmas convencionais. *Vetor – Revista de Ciências Exatas e Engenharias, 25*(1), 95–110.

Palma, H. A. L., Madruga, M. V., & Ballarin, A. W. (2017). Painéis compensados mistos de guapuruvu (*Schizolobium parahyba* (Vell.) SF Blake) e *Pinus taeda*. Em *Anais do II Congresso Latinoamericano de Estructuras de Madera* (8 pp.).
Yildiz, S., Tomak, E. D., Yildiz, U. C., & Ustaomer, D. (2013). Effect of artificial weathering on the properties of heat-treated wood. *Polymer Degradation and Stability, 98*(8), 1419–1427. https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2013.05.004

Pace, J. H. C., Carvalho, A. M., Nascimento, A. M., Latorraca, J. V. F., & Júnior, A. F. D. (2018). A ação do intemperismo interfere no acabamento superficial e na coloração da madeira de espécies florestais. *Revista de Ciências Agrárias – Amazonian Journal of Agricultural and Environmental Sciences, 61*, artigo 2442. http://dx.doi.org/10.22491/rca.2018.2442

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Prospecção de Fungos Associados à Madeira em uma Área de Cerrado de Monte Carmelo, MG

Jennifer Dayane da Silva Freitas[1]; Cleomar Pereira Lima[1]; Mike Sam James Ferreira[1]; Vanderson Fernandes de Oliveira[1]; André Luiz Firmino[1]; Laura Siqueira Guinle[1]; Regina Maria Gomes[1]

[1] Universidade Federal de Uberlândia, Monte Carmelo, Minas Gerais

Resumo: O Cerrado é um bioma com elevada biodiversidade, porém a maioria dos organismos ainda não são realmente conhecidos. Assim sendo, o presente trabalho teve como objetivo a prospecção de fungos associados à madeira em uma área de Cerrado no Parque da Matinha, em Monte Carmelo, MG. Para tanto foi necessário coletar, isolar e preservar fungos presentes em material lenhoso, contribuindo para o conhecimento da diversidade fúngica da região. Foram realizadas três campanhas de coleta entre fevereiro e março de 2026, seguidas do isolamento em meio de cultura, obtenção de culturas puras e preservação dos isolados em água destilada e glicerina. Ao todo, foram coletados 56 fungos, dos quais 20 foram isolados com sucesso, enquanto parte das amostras apresentou contaminação por *Trichoderma* sp., dificultando a obtenção de culturas puras. Os resultados demonstram a riqueza da comunidade fúngica associada à madeira no Cerrado e reforçam a importância da preservação desses isolados para futuras pesquisas e possíveis aplicações biotecnológicas.

Palavras-chave: Biodegradação; Biotecnologia; Isolamento fúngico.

Survey of Wood-Associated Fungi in a Cerrado Area of Monte Carmelo, MG

Abstract:.The Cerrado is a biome with high biodiversity, yet most of its organisms remain largely unknown. Therefore, this study aimed to survey wood-associated fungi in a Cerrado area within “Parque da Matinha” in Monte Carmelo, Minas Gerais. To achieve this, fungi present on woody material were collected, isolated, and preserved, thereby contributing to the understanding of the region's fungal diversity. Three collection campaigns were conducted between February and March 2026, followed by isolation in culture media, the establishment of pure cultures, and the preservation of isolates in distilled water and glycerin. A total of 56 fungal specimens were collected; 20 were successfully isolated, while some samples showed contamination by *Trichoderma* sp., which hindered the recovery of pure cultures. The results demonstrate the richness of the wood-associated fungal community in the Cerrado and underscore the importance of preserving these isolates for future research and potential biotechnological applications.

Keywords: Biodegradation; Biotechnology; Fungal isolation.

1. Introdução

O Cerrado é o segundo maior bioma brasileiro, cobrindo cerca de 23% do território do país. Majoritariamente situado na parte central do Brasil, esse bioma possui características

típicas de savanas e uma enorme variedade de ambientes. Essa diversidade de condições é propicia a presença de diferentes grupos de organismos que se adaptam a condições ecológicas distintas, o que explica a grande biodiversidade presente no bioma (Ribeiro; Walter, 2008).

Os fungos constituem um dos principais grupos de organismos presentes no Cerrado e desempenham funções fundamentais nos processos ecológicos, atuando como decompositores, simbiontes ou parasitas. Como decompositores, utilizam a matéria orgânica, incluindo a madeira, como fonte de carbono e contribuem para a ciclagem de nutrientes nos ecossistemas terrestres (Raven; Evert; Eichhorn, 2001). Esse processo ocorre, principalmente, pela ação de fungos capazes de degradar os constituintes lignocelulósicos dos tecidos vegetais, mediante a produção de enzimas extracelulares que promovem a quebra de compostos orgânicos complexos, favorecendo sua mineralização e a consequente disponibilização de nutrientes no ambiente (Soares, 1998).

Os fungos não apenas desempenham funções nos ecossistemas, mas também têm sido objeto de estudo devido ao seu potencial para aplicações em diversas áreas. Muitas espécies produzem enzimas e metabólitos que podem ser aproveitados em processos industriais, agrícolas e ambientais, o que tem levado à busca por novas cepas em habitats naturais (Abreu; Rovida; Pamphile, 2015). Pesquisas dentro do Cerrado revelaram fungos que conseguem gerar enzimas celulolíticas, mostrando que existem microrganismos com potencial para a biotecnologia. Esses estudos destacam a relevância de coletar e preservar cepas de ambientes naturais para pesquisas futuras (Silva *et al*., 2019).

Apesar do aumento de estudos sobre fungos no Cerrado nos últimos anos, muitos detalhes sobre a diversidade fúngica nesse bioma ainda são desconhecidos. Por exemplo, fungos relacionados à decomposição de materiais lenhosos são pouco documentados em levantamentos em várias áreas, o que torna difícil uma compreensão mais abrangente da sua distribuição (Leonardo-Silva; Xavier-Santos, 2023). Além disso, pesquisas com espécies lenhosas do Cerrado mostram que a comunidade fúngica associada a essas plantas ainda pode revelar novos registros e informações sobre a diversidade de fungos no bioma (Reis *et al*., 2023).

Diante desse contexto, a prospecção por fungos associados a materiais lenhosos pode ajudar a expandir o entendimento sobre a diversidade micológica na região e contribuir para a criação de coleções biológicas que podem servir como base para pesquisas futuras. Assim, o objetivo deste trabalho foi coletar, isolar, selecionar e conservar fungos que estão associados à resíduos arbóreos em decomposição retirados de uma área do Cerrado no Parque da Matinha, localizado na cidade de Monte Carmelo, Minas Gerais.

2. Material e métodos

O levantamento de fungos foi realizado no Parque da Matinha, localizado no município de Monte Carmelo-MG, em área de Cerrado. As coletas concentraram-se em material lenhoso constituído por troncos e galhos de árvores em pé e de indivíduos em diferentes estágios de decomposição, contendo estruturas fúngicas visíveis.

A fim de abranger a diversidade da comunidade fúngica presente no parque, foram realizadas três coletas em datas distintas. A coleta inicial foi conduzida em 10 de fevereiro de 2026 ao longo da trilha principal do parque. Em 03 de março de 2026, o mesmo trajeto foi percorrido em sentido inverso. Na última atividade de campo, realizada em 31 de março de 2026, foram incluídas a trilha principal e suas ramificações, ampliando a área amostrada e permitindo alcançar locais mais afastados e com menor fluxo de visitantes, o que contribuiu para uma amostragem mais abrangente da área,

O isolamento foi conduzido no Laboratório de Microbiologia e Fitopatologia do campus de Monte Carmelo da Universidade Federal de Uberlândia (LAMIF UFU), com transferência direta do material para placas petri contendo meio Batata-Dextrose-Ágar (BDA), sob condições assépticas. Durante a inoculação, parte do material foi submetida à flambagem superficial, com o objetivo de reduzir a contaminação externa. As placas foram incubadas em câmara BOD a 25 °C.

O desenvolvimento das colônias foi monitorado em intervalos de dois dias, observando a velocidade de crescimento, morfologia das colônias e ocorrência de contaminações. Após sete dias de incubação, fragmentos do micélio em crescimento ativo foram transferidos para novas placas contendo BDA, procedimento realizado com o objetivo de promover a separação de colônias e a obtenção de culturas puras.

Após a obtenção das culturas puras, os isolados foram preservados por dois métodos complementares. Parte das culturas foram armazenadas em tubos contendo água destilada esterilizada, mantidos em temperatura ambiente para conservação de curto e médio prazo. Paralelamente, amostras dos isolados foram armazenadas em solução de glicerina e acondicionadas em freezer a -80 °C, visando a preservação de longo prazo e a manutenção da viabilidade dos fungos para futuras avaliações.

3. Resultados e discussão

A Figura 1 apresenta a localização das três trilhas realizadas, bem como os pontos de coleta de cada fungo amostrado.

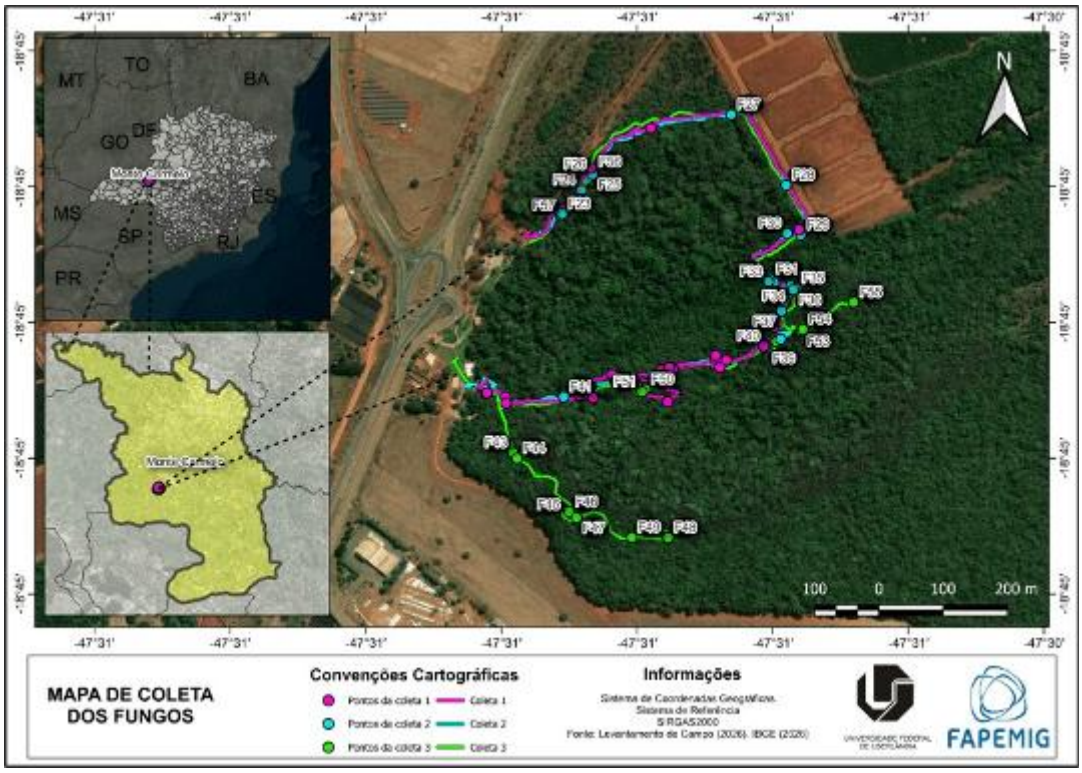


Figura 1 – Localização dos fungos registrados nas trilhas amostradas

Ao se realizar o presente trabalho foram encontradas 56 amostras de fungos distintos relacionado a madeira ao longo de três campanhas de coleta (Figura 1), correspondendo a uma média de aproximadamente 19 por campanha. Esse resultado foi semelhante ao observado por Xavier et al. (2025), que registraram 19 amostras em uma única campanha realizada no Parque da Matinha, indicando um padrão semelhante de ocorrência desses microrganismos na área. Na terceira campanha, a ampliação do trajeto através das ramificações da trilha permitiu registrar amostras que não haviam sido encontradas anteriormente, mostrando que o aumento do esforço amostral contribui para um levantamento mais completo da diversidade fúngica local.

As Figuras 2, 3 e 4 apresentam a distribuição e as imagens dos fungos encontrados, respectivamente nas coletas 1, 2 e 3.

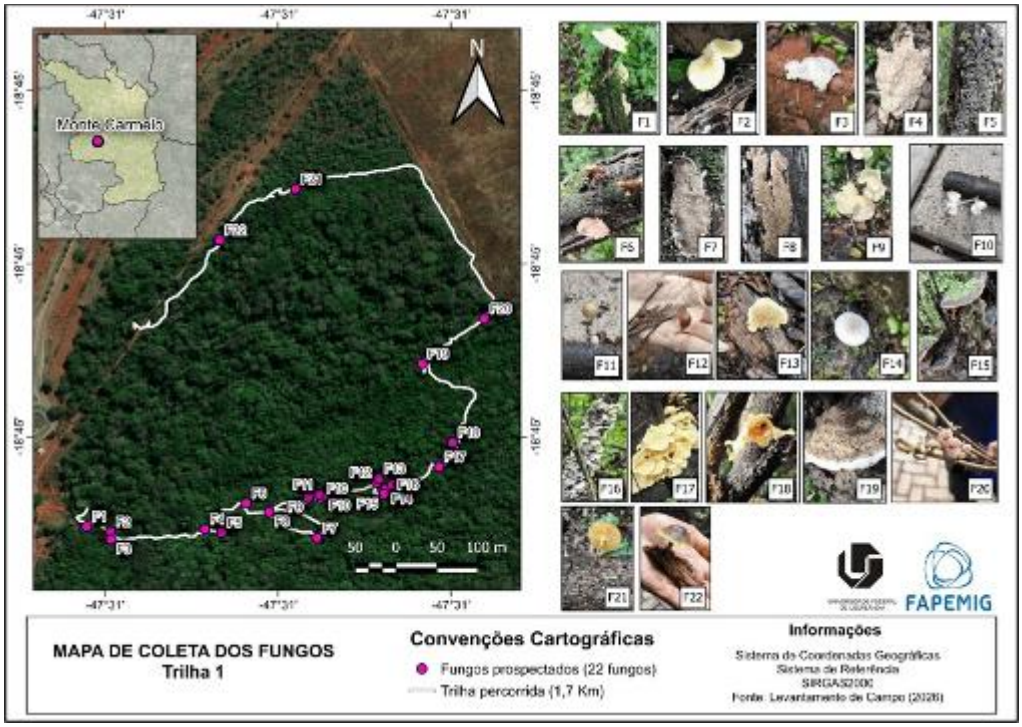


Figura2 – Distribuição dos fungos encontrados na primeira coleta

Durante a primeira coleta foram registrados 22 fungos ao longo da trilha principal. No período, a temperatura média foi de 23,25 °C e a umidade relativa média de 82,15%. A maior concentração de registros ocorreu na porção central da trilha.

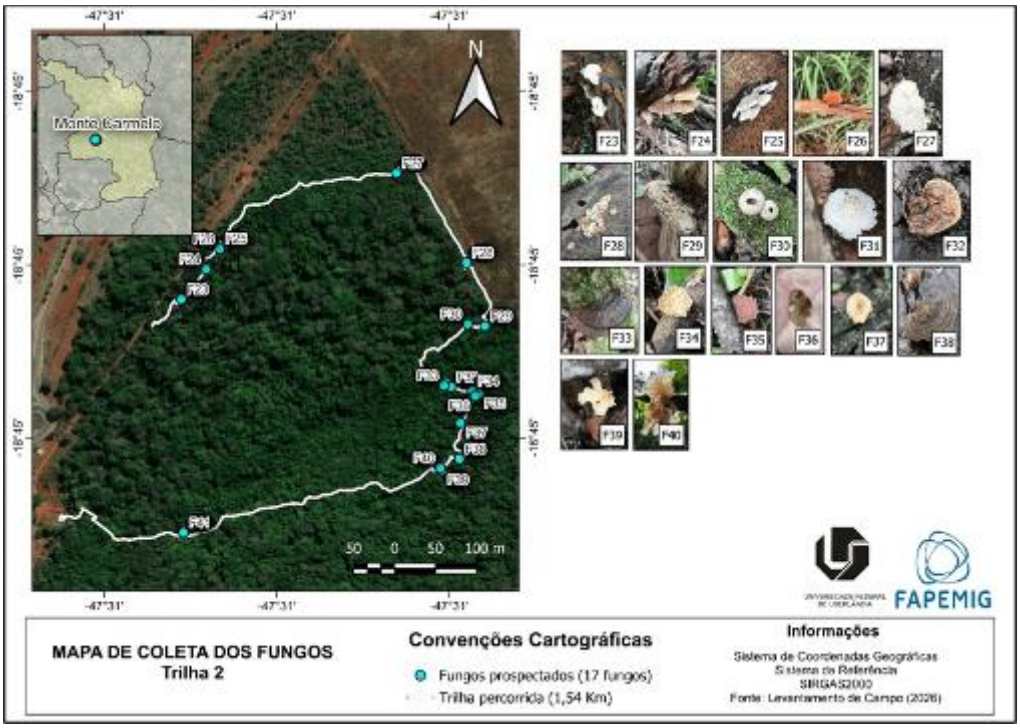


Figura 3 – Distribuição dos fungos encontrados na segunda coleta

Na segunda coleta foram encontrados 19 fungos distribuídos ao longo da trilha. A temperatura média do período foi de 21,97 °C e a umidade relativa média de 83,77%. A maior concentração foi encontrada na porção intermediária do percurso.

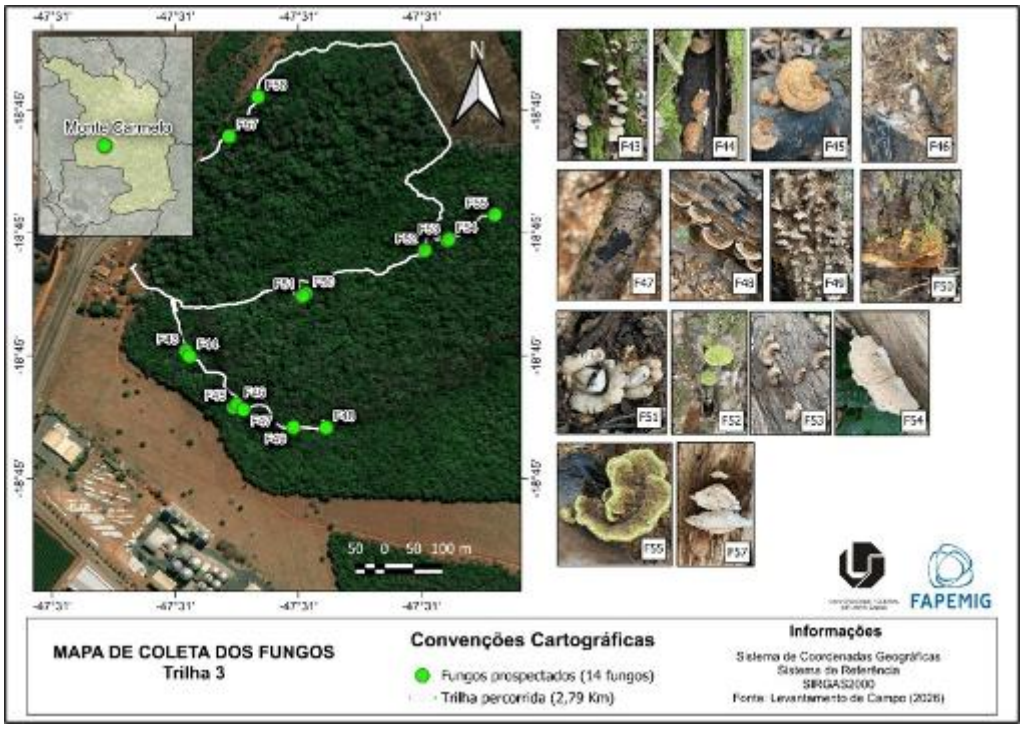


Figura 4 – Distribuição dos fungos encontrados na primeira coleta

A terceira coleta resultou no registro de 14 fungos ao longo da trilha principal e de suas ramificações. A temperatura média foi de 20,30 °C e a umidade relativa média de 83,76%. A maior concentração de fungos foi observada nas ramificações da trilha principal.

Embora a umidade relativa do ar tenha permanecido superior a 80% durante todas as campanhas, observou-se redução no número de amostras à medida que a temperatura média diminuiu. Lustenhouwer *et al*. (2020) demonstraram que a temperatura influencia diretamente na atividade dos fungos e a velocidade de degradação da madeira. O que indica que não dependem exclusivamente da disponibilidade de umidade, mas da interação entre diferentes fatores ambientais. Abrahão, Gugliotta e Bononi (2019), complementam que a riqueza de fungos relacionados a madeira está ligada à disponibilidade de substratos lenhosos, às características da vegetação e às condições ambientais, fatores que influenciam diretamente a

composição dessas comunidades em áreas de Cerrado. Em conjunto, esses fatores explicam a variação observada entre as campanhas e reforçam a importância das condições ambientais na dinâmica desses organismos.

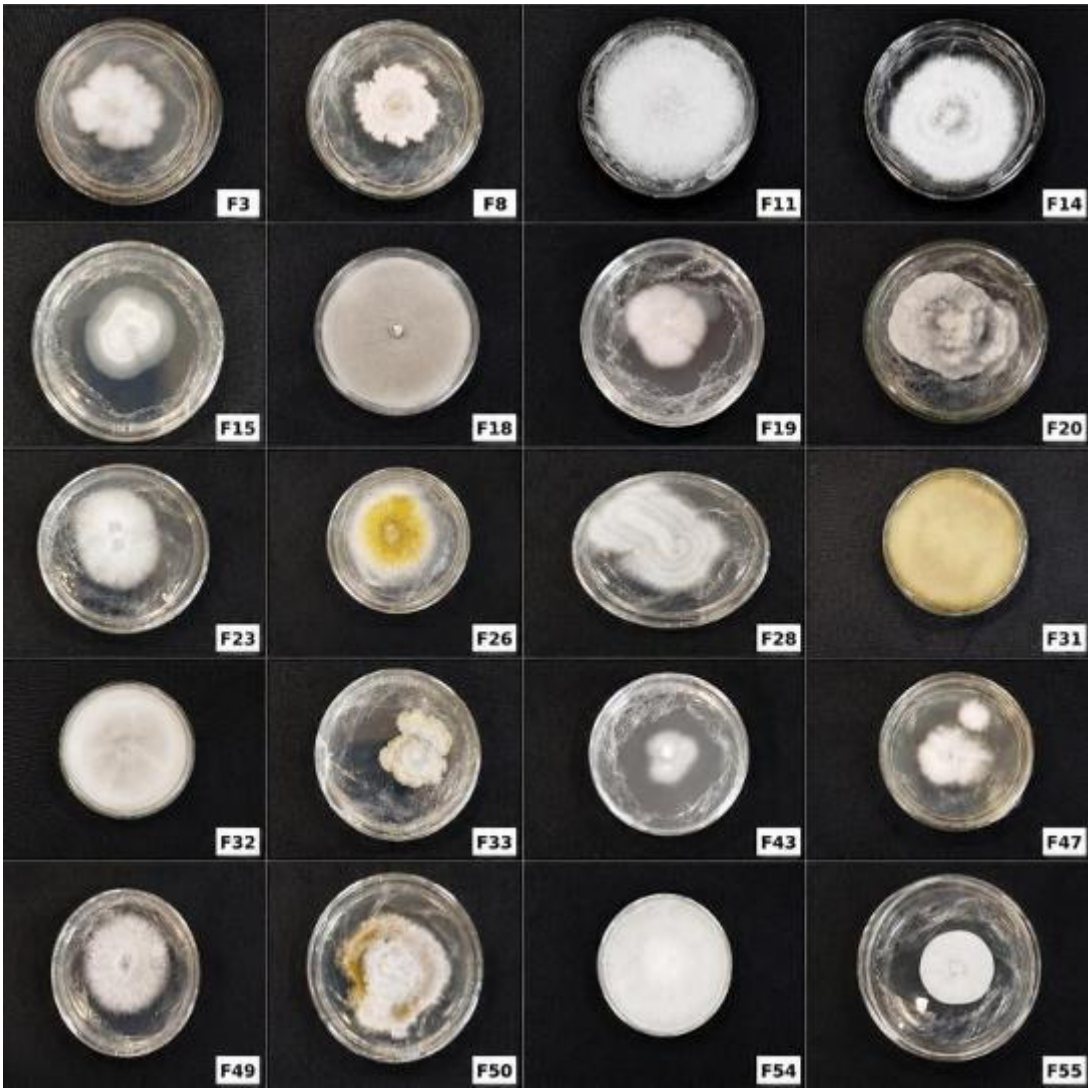


Figura 5 – Isolados fúngicos puros obtidos após o processo de isolamento e seleção dos fungos coletados

Das 56 amostras coletadas, apenas 20 resultaram na obtenção de culturas puras, conforme apresentado na Figura 5, correspondendo a uma taxa de isolamento de 35,7%. A principal dificuldade observada durante o isolamento foi a contaminação por *Trichoderma* sp. Błaszczyk *et al*. (2016) relatam que espécies desse gênero são frequentemente encontradas em madeira e apresentam elevada capacidade de colonização, favorecida pelo rápido crescimento micelial e pela produção de enzimas hidrolíticas. Essas características permitem que

Trichoderma sp. ocupe rapidamente os meios de cultura, dificultando o desenvolvimento de fungos com crescimento mais lento e reduzindo a eficiência do isolamento. Apesar dessa limitação, as culturas obtidas representam um material importante para estudos taxonômicos, ecológicos e para a prospecção de compostos de interesse biotecnológico. Além disso, contribuem para ampliar o conhecimento sobre os fungos lignolíticos do Cerrado, que segundo Leonardo-Silva; Xavier-Santos (2023) ainda permanecem pouco estudado nesse bioma.

As culturas puras obtidas encontram-se preservadas no LAMIF/UFU, e a caracterização e identificação taxonômica dos isolados serão realizadas em etapas subsequentes. Posteriormente, os isolados serão utilizados em ensaios de apodrecimento acelerado em laboratório, visando avaliar seu potencial de uso tecnológico.

4. Conclusões

As três campanhas de coleta realizadas entre fevereiro e março de 2026, com temperatura em diferentes médias e umidade relativa sempre acima de 80%, permitiram registrar 56 fungos associados a materiais lenhosos no Parque da Matinha. Porém, foi possível obter apenas 20 culturas puras, pois muitas amostras apresentaram contaminação por fungos do gênero *Trichoderma* sp. o que impediu a obtenção do isolado. Com o aumento do trajeto pelas ramificações da trilha principal, foi possível coletar amostras de forma bem abrangente na área estudada. Os fungos isolados ajudam a conhecer melhor a variedade de microrganismos do Cerrado e servem como material para pesquisas futuras, inclusive para verificar suas possíveis aplicações na biotecnologia.

5. Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) – Processo nºBIS-00412-25.

6. Referências bibliográficas

Abrahão, M. C., Gugliotta, A. M., & Bononi, V. L. R. (2019). Wood-decay fungi (Agaricomycetes, Basidiomycota) in three physiognomies in the Savannah region in Brazil. Hoehnea, 46(1), 1–15. https://doi.org/10.1590/2236-8906-69/2018

Abreu, J. A. S., Rovida, A. F. S., & Pamphile, J. A. (2015). Fungos de interesse: aplicações biotecnológicas. Uningá Review, 21(1), 55–59.

Błaszczyk, L., Siwulski, M., Sobieralski, K., Lisiecka, J., & Jędryczka, M. (2016). Trichoderma species occurring on wood with decay symptoms in mountain forests in Central Europe: Genetic and enzymatic characterization. Journal of Plant Protection Research, 56(4), 397–407. https://doi.org/10.1515/jppr-2016-0060

Leonardo-Silva, L., & Xavier-Santos, S. (2023). Corticioid and poroid fungi from Brazilian Cerrado: A history of research and a checklist of species. Anais da Academia Brasileira de Ciências, 95(Supl. 2), e20220165. https://doi.org/10.1590/0001-3765202320230627

Lustenhouwer, N., Maynard, D. S., Bradford, M. A., Lindner, D. L., Oberle, B., Zanne, A. E., & Crowther, T. W. (2020). A trait-based understanding of wood decomposition by fungi. Proceedings of the National Academy of Sciences, 117(21), 11551–11558. https://doi.org/10.1073/pnas.1909166117

Raven, P. H., Evert, R. F., & Eichhorn, S. E. (2001). Biologia vegetal (6. ed.). Guanabara Koogan.

Reis, J. B. A., Pappas Junior, G. J., Lorenzi, A. S., Pinho, D. B., Costa, A. M., Bustamante, M. M. da C., & Vale, H. M. M. (2023). How deep can the endophytic mycobiome go? A case study on six woody species from the Brazilian Cerrado. Journal of Fungi, 9(5), 508. https://doi.org/10.3390/jof9050508

Ribeiro, J. F & Walter, B. M. T. As Principais Fitofisionomias do Bioma Cerrado. In: Sano, S. M.; Almeida, S. P. de; Ribeiro, J. F. (Ed.). Cerrado: ecologia e flora v. 2. Brasília: EMBRAPA-CERRADOS, 2008. 876 p.

Silva, G. A., Mascarenhas, M. do S., Santos, E. G., Batistote, M., & Leite, R. S. R. (2019). Fungo do Cerrado com potencial para produção de enzima celulase. Revista da Universidade Vale do Rio Verde, 17(2). http://dx.doi.org/10.5892/ruvrd.v17i2.5067

Soares, C. H. L. (1998). Estudos mecanísticos da degradação de efluentes de indústrias de papel e celulose por fungos basidiomicetos degradadores de madeira (Tese de Doutorado em Química). Universidade Estadual de Campinas. https://doi.org/10.47749/T/UNICAMP.1998.176156

Xavier, L. A. R., Oliveira, L. A., Sevilha, R. C., Lopes, O. P., Firmino, A. L., & Gomes, R. M. (2025). Fungos degradadores de madeira do Parque da Matinha, Monte Carmelo–MG. In Anais do 12º Simpósio de Ciências Agrárias e Ambientais (SICAA 2025). https://doity.com.br/anais/sicaa2025/trabalho/468920

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Protótipos emergenciais em madeira para travessias de pessoas e de pequenas cargas: adaptação da ponte autoportante

Danilo dos Santos Alves[1]*; Renilson Luiz Teixeira[2]; Keliane de Jesus Reis[1]; Chris Stephanie Larco Chávez[1]; José Reinaldo Moreira da Silva[1]

[1] Departamento de Ciências Florestais – ESAL/UFLA
[2] IFES/campus Colatina e Departamento de Ciências Florestais – ESAL/UFLA

Resumo: Estruturas provisórias desempenham papel fundamental no restabelecimento da mobilidade em situações de emergência, especialmente em regiões afetadas por desastres naturais ou com acesso limitado. Este trabalho teve como objetivo desenvolver e avaliar protótipos estruturais inspirados na ponte autoportante de Leonardo da Vinci, utilizando galhos provenientes de poda de *Mangifera indica* L. e *Lecythis pisonis*. Os protótipos foram construídos em escala natural e submetidos à avaliação quanto à facilidade de montagem, estabilidade estrutural e capacidade de travessia. Os resultados demonstraram que a elevada tortuosidade e a variabilidade geométrica dos galhos comprometeram a estabilidade da estrutura, tornando necessário o uso de pinos metálicos e cordões como elementos auxiliares para garantir maior rigidez e segurança. Apesar dessas limitações, a configuração proposta possibilitou vencer vãos superiores ao comprimento das longarinas empregadas, evidenciando a eficiência do princípio estrutural. Conclui-se que o sistema apresenta potencial para aplicações emergenciais por utilizar materiais renováveis, de baixo custo, amplamente disponíveis e de rápida implantação em locais de difícil acesso.

Palavras-chave: Sistemas modulares; Estruturas de madeira; Estruturas temporárias

Emergency timber prototypes for pedestrian and light-load crossings: adaptation of self-supporting bridge

Abstract: Temporary structures play an important role in restoring mobility during emergency situations, particularly in areas affected by natural disasters or with limited accessibility. This study aimed to develop and evaluate structural prototypes inspired by Leonardo da Vinci's self-supporting bridge using pruning branches of *Mangifera indic*a L. and *Lecythis pisonis*. Full-scale prototypes were built and assessed regarding ease of assembly, structural stability, and crossing capacity. The results showed that the high curvature and geometric variability of the branches reduced the stability of the structure, requiring the use of metal pins and ropes as auxiliary elements to improve rigidity and safety. Despite these limitations, the proposed configuration successfully spanned distances greater than the length of the longitudinal members, demonstrating the effectiveness of the structural concept. It is concluded that the system has potential for emergency applications because it uses renewable, low-cost, and widely available materials, allowing rapid deployment in remote or difficult-to-access locations.

Keywords: Modular systems; Timber structures; Temporary structures.

1. Introdução

As travessias emergenciais são soluções estratégicas para manter ou restabelecer a mobilidade, permitindo recuperar rapidamente o acesso em áreas isoladas por enchentes, deslizamentos ou colapso de pontes (Yeh et al., 2015). Segundo Russell e Thrall (2013), as pontes portáteis e de rápida implantação são fundamentais para restaurar o tráfego às comunidades afetadas por desastres e para fornecer rotas de acesso em operações militares. Nestes contextos, destacam-se soluções provisórias e modulares, como as Pontes Lançadas por Veículos (AVLB), as pontes de apoio seco (DSB), as Medium Girder Bridge (MGB) e os sistemas modulares convencionais, como as pontes Bailey. Todos esses sistemas foram empregados como alternativas de rápida montagem e caráter temporário para transposição de obstáculos e recuperação do tráfego em situações críticas (Brasil, 1996; Dzialoszynski; Custódio; Kikunaga, 2016; Estevam, 2018; Pereira, 2015).

Apesar da diversidade de materiais e configurações existentes, identificam-se lacunas significativas nas estruturas emergenciais atuais. Os sistemas convencionais de aço apresentam massa elevada para transporte e montagem. Xu et al. (2025) destacaram que as pontes Bailey, embora modulares, dependem de componentes metálicos que aumentam o custo logístico. Alternativa inovadora para travessias emergenciais reside na adaptação de conceitos estruturais históricos, como a ponte autoportante de Leonardo da Vinci, mantida pelo próprio peso, sem necessidade de fixações (Bast; Ochsendorf; Xie, 2019).

AA engenharia de estruturas em madeira para travessias possui raízes históricas voltadas à simplicidade e à eficiência mecânica. Segundo Lamberti et al. (2024), Leonardo da Vinci projetou, por volta de 1482, uma ponte autoportante (Figura 1) composta por barras de seção circular, dispensando fixadores e juntas complexas. Seu princípio estrutural baseia-se na pressão exercida pelo próprio peso da ponte entre as barras, garantindo estabilidade e evitando o colapso. O projeto tinha finalidade militar, permitindo a rápida travessia de soldados sobre rios durante conflitos.

O sistema de tecelagem de vigas é observado nas pontes de arco de madeira da tradição chinesa. Chen, Yang e Shen (2022) descreveram que as pontes do tipo Min-Zhe consistem em sistemas de arcos poligonais conectados por juntas de entalhe e espiga. Esta técnica milenar permite vencer vãos superiores a 40 metros, com apenas troncos curtos de florestas locais. Ela se caracteriza por comportamento mecânico com a força de compressão dominante (Yang et al., 2019). Sua montagem sequencial, que dispensa equipamentos pesados de içamento, com viabilidade técnica que permanece relevante para a engenharia contemporânea. A utilização de técnicas tradicionais com materiais locais revitaliza as práticas de construção e com rápidas

respostas nos cenários de infraestrutura crítica (Hu et al., 2025 e Chen, Yang e Shen, 2022). A justificativa deste estudo reside em propostas sustentáveis e de baixo custo para travessias emergenciais. Assim, a experimentação com protótipos em escala natural é fundamental para validar a resistência de diferentes espécies e aprimorar trabalhos futuros que evoluam para a utilização real em obras de emergência, garantindo segurança e durabilidade.

O objetivo foi propor, construir e avaliar empiricamente protótipos estruturais, em escala natural, a partir de galhos de *Mangifera indica* (mangueira) e *Lecythis pisonis* (sapucaia), como adaptação à ponte autoportante de Leonardo Da Vinci.

2. Material e métodos

A proposta dos protótipos simplificados (Figura 2), foi inspirada na ponte autoportante de Leonardo Da Vinci e nos demais sistemas modulares citados por Russell e Thrall (2013).

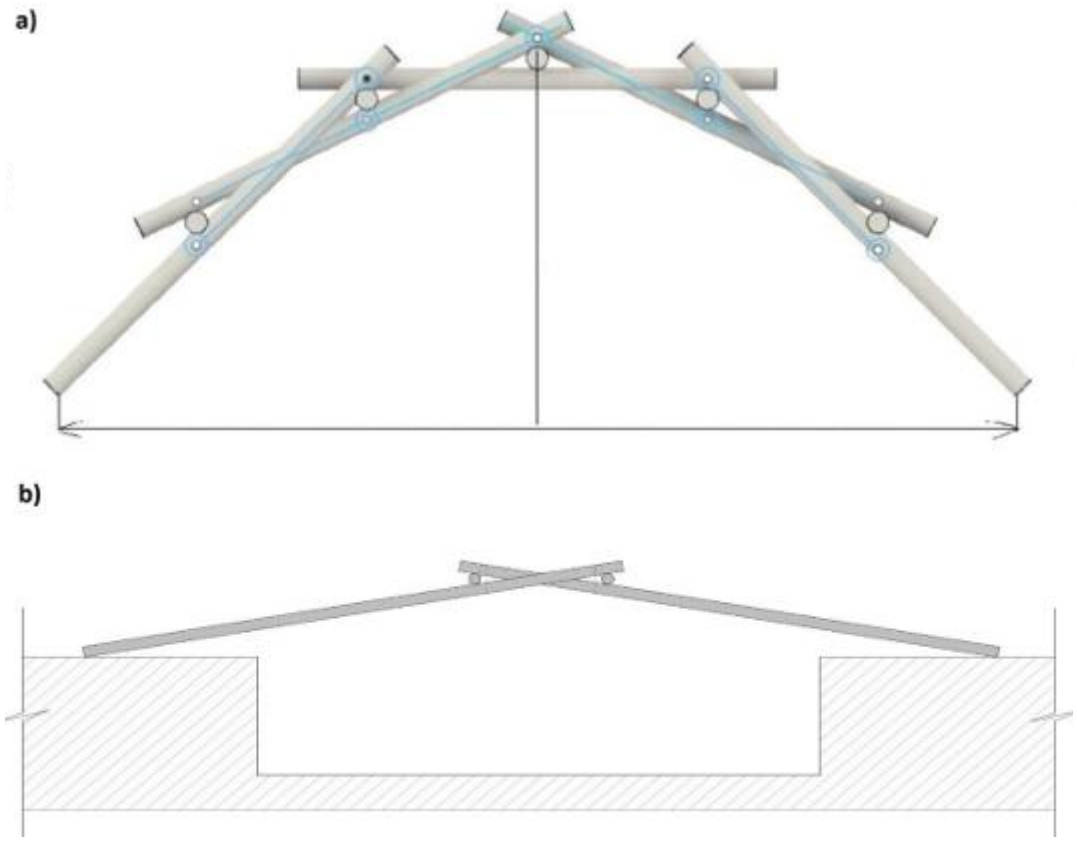


Figura 1. a) Ponte autoportante de Leonardo da Vinci e b) protótipo simplificado desenvolvido neste estudo.
Fonte: Adaptado de Torres Abad (2021) e autores (2026).

Eles foram construídos tendo como direcionador a primeira parte de sua criação, sendo composto por apenas seis peças estruturais, das quais, duas são transversais e quatro

longitudinais. Considerando a urgência de sua construção, os materiais utilizados foram norteados pela facilidade de obtenção na região próxima a sua construção. Além disto, propôs-se baixos investimentos e facilidade operacional durante sua montagem.

Os componentes estruturais, longarinas e transversinas, foram feitos a partir da poda de galhos de *Mangifera indica* L. (mangueira), com 1100 mm de comprimento e diâmetros de 30, 55 e 80 mm e *Lecythis pisonis* (sapucaia), com 600 mm de comprimento e diâmetros de 35, 60 e 80 mm (Figura 3). Os experimentos ocorreram na área externa do Departamento de Ciências Florestais da Universidade Federal de Lavras.



Figura 3. Foto da estrutura do sistema emergencial para tráfego de pessoas e pequenos veículos, da madeira dá a) *Mangifera indica* L. (mangueira) e b) *Lecythis pisonis* (sapucaia).
Fonte: Autores (2026)

Durante a confecção dos protótipos foram feitas diversas observações, que possibilitaram implementar sugestões que indicaria as características do material a ser coletado, que facilitaram a montagem das estruturas e até mesmo melhoria na sua performance, relativa à sua estabilidade e a sua resistência frente as cargas submetidas. Assim, os testes preliminares de estabilidade e de resistência foram realizados de forma prática e, ou empírica (Figura 5). Para tanto, diversas pessoas, de massas diferentes, foram convidadas a atravessarem pela estrutura e que foram realizadas observações frente as reações de flexão existentes nas longarinas e transversinas. Além disto, algumas pessoas ficaram paradas sobre a estrutura e realizaram movimentos verticais de cargas, sendo também avaliadas a estabilidade de toda estrutura e das peças isoladamente. Todo o processo foi filmado, permitindo que a avaliação pudesse ser cuidadosamente realizada a posteriori e repetidas vezes pelos diferentes discentes, docentes do grupo da Ciência e Tecnologia da Madeira da Universidade Federal de Lavras.



Figura 5. Ensaio empírico para verificação da estabilidade e resistência de um protótipo do sistema emergencial utilizando madeira: a) *Lecythis pisonis* (sapucaia) e b) *Mangifera indica* L. (mangueira).
Fonte: Autores (2026)

3. Resultados e discussão

3.1 Montagem e estabilização

Os galhos oriundos da poda da espécie *Mangifera indica* L. (mangueira) apresentaram facilidade no preparo das peças desejadas para a confecção das estruturas emergenciais, sendo necessário o uso apenas de um facão, bem afiado, para a remoção de suas ramificações para a obtenção de suas dimensões axiais. Contudo, observou-se grande variação entre os diâmetros dos galhos podados e, até mesmo, ao longo dos mesmos, tendo o valor máximo de 120 mm. A tortuosidade também apresentou maior heterogeneidade, havendo necessidade de cortes, que reduziram os comprimentos úteis para a confecção das longarinas (Figura 6). Além disto, mesmo após os cortes, algumas sinuosidades permaneceram, fato que ocasionou dificuldades na montagem das estruturas e principalmente em sua estabilidade durante a aplicação das cargas. Sendo observada então, a completa desmontagem da estrutura devido ao rolamento das peças.



Figura 6. Peças da mangueira para confecção da estrutura emergencial. a) Galhos coletados após a poda e cortes. b) Facão utilizado no preparo das peças. c) Longarinas com tortuosidade elevada. d) longarina com baixa tortuosidade.
Fonte: Autores (2026)

Para solucionar o problema da falta de instabilidade da estrutura, propôs-se a utilização de pinos na região de contato entre as longarinas (Figura 7). Para tanto, utilizou-se pinos metálicos (tipo pregos 20x30 JP). É importante salientar que esses pinos não possuem a função estrutural e apenas de estabilização das peças, evitando que uma peça role sobre a outra. Além disto, observou que os pinos promoveram maior facilidade de montagem da estrutura, podendo ser classificado como elemento fundamental para confecção de pontes pré-montadas, em que tanto o transporte das peças, como a montagem da estrutura torna-se mais fácil de serem realizados.



Figura 7. Uso de pinos metálicos nas junções das longarinas de sapucaia, para melhoria da instabilidade estrutural.
Fonte: Autores (2026)

Outro mecanismo que foi empregado para facilitar a montagem e conferir estabilidade da estrutura, foi a utilização de cordões nas transversinas (Figura 8). Esses cordões definem a

dimensão da plataforma horizontal de apoio, que é a base para a construção dos pisos para a travessia. Semelhantemente aos pinos metálicos, os cordões não possuem função estrutural. Eles apenas facilitam a montagem da estrutura, permitindo que apenas um operador possa montá-la, sem nenhuma dificuldade.



Figura 8. Uso de cordões nas transversinas para facilidade na montagem da estrutura emergencial.
Fonte: Autores (2026)

3.2 Relação de vão livre e ganho estrutural

A premissa adotada para o protótipo inspirado na ponte autoportante permite dimensionar o vão livre a ser transposto com base no comprimento das longarinas empregadas. O vão livre foi determinado por meio de medição direta da distância entre os pontos de apoio da estrutura, utilizando uma trena. No protótipo analisado, as longarinas apresentaram comprimento de 410 mm e foram capazes de vencer um vão livre de 530 mm. A partir desses valores, foi calculado um ganho de 29,3% em relação ao comprimento das peças utilizadas. Com base nessa relação, foram estimados os comprimentos necessários das longarinas para a transposição de diferentes vãos, conforme apresentado na Tabela 1.

Tabela 1. Valores estimados para o vão livre a ser vencido em função do comprimento das longarinas necessárias na confecção da estrutura emergencial

Comprimento das longarinas (m)	Vão livre a ser vencido (m)
0,50	0,65
1,00	1,29
3,00	3,88
5,00	6,46
10,00	12,93

4. Conclusão

O protótipo estrutural inspirado na ponte de Leonardo da Vinci demonstrou-se como alternativa viável, de baixo custo e fácil execução para restabelecer o acesso em situações emergenciais.

Apesar do modelo original dispensar fixações, a realidade de campo usando madeiras nativas e de poda rústica (galhos de sapucaia - *Lecythis pisonis* e galhos de mangueira - *Mangifera indica* L.) exigiu adaptações como o uso de cordões (tirantes) e pinos metálicos.

Observou ganho de 29,3% no comprimento do vão livre a ser vencido, a partir de uso de peças curtas, atestando a eficiência mecânica e a flexibilidade desta geometria frente a desafios logísticos e ambientais.

5. Agradecimentos

Os autores expressam seus agradecimentos à Universidade Federal de Lavras (UFLA), ao Centro de Estudos em Materiais para Construção (CEMAC) e ao Instituto Federal do Espírito Santo (IFES) pelo apoio institucional e pela infraestrutura disponibilizada para a realização desta pesquisa. Agradecem, ainda, aos professores orientadores pelas orientações e contribuições ao longo do trabalho, bem como à FAPEMIG e ao CNPq pelo incentivo à pesquisa e pelo suporte às atividades científicas e à participação no VII CBCTEM.

6. Referências bibliográficas

BAST, K.; OCHSENDORF, J.; XIE, M. Engineers put Leonardo da Vinci’s bridge design to the test. MIT News, 2019. Disponível em: https://news.mit.edu/2019/leonardo-da-vinci-bridge-test-1010. Acesso em: 20 jun. 2026.

BRASIL. Operações de transposição de cursos de água. Rio de Janeiro: Exército Brasileiro, 1996. Disponível em: <https://bdex.eb.mil.br/jspui/bitstream/123456789/309/1/C-31-60.pdf>. Acesso em: 20 jun. 2026

Chen, S., Yang, Y., & Shen, Z. (2022). Impact of New Construction Activities of Min-Zhe Wooden Arch Bridge in the Conservation of Its Traditional Building Craftsmanship. International Journal of Architectural Heritage. https://doi.org/10.1080/15583058.2021.2023694

DZIALOSZYNSKI, Bruno Szpigel; CUSTÓDIO, Matheus Tresso; KIKUNAGA, Patricia Emy; NAKANO, Ruben Hiroaki. Recuperação de vias interditadas com pontes provisórias modulares. 2016. 348 f. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo.

ENGENHO E ARTE. A ponte de emergência para a outra margem de Leonardo Da Vinci. Disponível em https://www.engenhoearte.info/post/a-ponte-deemerg%C3%AAncia-para-a-outra-margem-de-leonardo-da-vinci, 2020.

ESTEVAM, A. M. ESA/CP-CP: A capacitação de pessoal do Centro de Preparação de Oficiais da Reserva da ESA, na aplicação do Método LI, durante a instrução de comunicações. 2018. Disponível em: https://bdex.eb.mil.br/jspui/bitstream/123456789/3525/1/ESAO_CAP%20ESTEVAM.pdf. Acesso em: 20 jun. 2026.

Hu, Z., Fan, M., Yan, X., Xing, Y., Wang, W., & Li, N. (2025). Sustainable protection measurement of the historical Guangning Bridge in Shaoxing City. Heritage Science, 13(1). https://doi.org/10.1038/s40494-025-02211-x

Lamberti, L. A., Della Pace, R. D., Tavares, L. C., Perius, C. F., Beck, F., & Pauletti, D. (2024). Structural analysis and design of a self-supporting wooden bridge designed by Leonardo Da Vinci. Ciência e Natura, 46. https://doi.org/10.5902/2179460X86798

PEREIRA, Ricardo. Comportamento estrutural de pontes logísticas do tipo Mabey. 98 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, Lisboa, 2019. Disponível em: https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/downloadFile/563345090414140/Tese%20Mestrado%20Ricardo%20Pereira%2068543.pdf. Acesso em: 19 jun. 2026.

RUSSELL, Brian R.; THRALL, Andrew P. Portable and Rapidly Deployable Bridges: Historical Perspective and Recent Technology Developments. Journal of Bridge Engineering , v. 18, n. 10, p. 1074-1085, 2013. DOI: 10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.0000454.

XU, Guanyao; LI, Dan; LU, Jigang; MA, Gang. Technical development and applications of Bailey bridges. Steel Construction, v. 40, n. 4, p. 1-7, 2025. Disponível em: http://gjg.ic-mag.com/en/article/doi/10.13206/j.gjgS24011001. Acesso em: 19 jun. 2026.

Yang, Y., Nakamura, S., Chen, B., & Nishikawa, T. (2019). Mechanical behavior of Chinese woven timber arch bridges. Engineering Structures, 195, 340–357. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.05.068

YEH, Fang-Yao et al. A novel composite bridge for emergency disaster relief: concept and verification. Composite Structures, v. 127, p. 199-210, 2015. DOI: 10.1016/j.compstruct.2015.03.012.

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Qualidade da Ligação Adesiva em Painéis de Madeira Lamelada Colada Cruzada produzidos com Medula de Eucalipto

Juliana Bello Mussi Alencar[1]; Jorge Daniel de Melo Moura[2]

1 e 2 Programa Associado de Pós-graduação em Metodologia de Projeto de Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Londrina (UEL) Londrina, Brasil

Resumo: A qualidade da ligação adesiva é um dos principais fatores que influenciam o desempenho de painéis estruturais de Madeira Lamelada Colada Cruzada (MLCC), sendo fundamental para garantir sua integridade estrutural. Entretanto, ainda são escassas as pesquisas sobre a utilização da madeira da região da medula do eucalipto na fabricação desses painéis. Este trabalho teve como objetivo avaliar a qualidade da colagem de painéis MLCC produzidos com medula de eucalipto por meio de ensaios de resistência ao cisalhamento e análise dos modos de fratura. Foram produzidos 32 painéis MLCC de três camadas com emendas dentadas, utilizando adesivo poliuretano monocomponente com gramatura de 200 g/m². Após a fabricação, foram extraídos 64 corpos de prova para realização dos ensaios de cisalhamento, conforme a norma NBR 7190 (2022). A qualidade da colagem foi avaliada por meio da resistência ao cisalhamento e da classificação dos modos de fratura em falha na linha de cola, falha rasa e fratura profunda. A resistência média geral ao cisalhamento foi de 6,60 MPa, com valores entre 5,33 MPa e 8,19 MPa. Os resultados mostraram comportamento compatível entre os painéis que apresentaram ruptura por descolamento das lamelas com a falha na linha de cola dos corpos de prova dos ensaios de cisalhamento. Pode-se concluir que a madeira de medula de eucalipto apresenta potencial para aplicação em painéis MLCC e que a análise conjunta da resistência ao cisalhamento e dos modos de fratura constitui ferramenta eficiente para avaliar a qualidade da ligação adesiva.

Palavras-chave: madeira engenheirada; resistência ao cisalhamento; qualidade da colagem

Adhesive Bond Quality in Cross-Laminated Timber (CLT) Panels Manufactured with Eucalyptus Pith

Abstract: The quality of the adhesive bond is one of the primary factors affecting the structural performance of Cross-Laminated Timber (CLT) panels, as it plays a crucial role in ensuring their structural integrity. However, studies investigating the use of eucalyptus pithwood for the manufacture of CLT panels remain scarce. This study aimed to evaluate the bonding quality of CLT panels manufactured from eucalyptus pithwood by means of shear strength testing and fracture mode analysis. A total of 32 three-layer CLT panels incorporating finger-jointed lamellas were manufactured using a one-component polyurethane adhesive applied at a spread rate of 200 g/m². Following panel fabrication, 64 specimens were extracted and subjected to shear strength testing in accordance with the Brazilian standard NBR 7190 (2022). Bonding quality was assessed based on shear strength and fracture mode classification, including glue-line failure, shallow wood failure, and deep wood failure. The overall mean shear strength was 6.60 MPa, with values ranging from 5.33 to 8,19 MPa. The results demonstrated a consistent relationship between the panels that exhibited lamella delamination and the occurrence of glue-line failure in the corresponding shear test specimens. These findings indicate that eucalyptus pithwood is a promising raw material for the manufacture of CLT panels. Furthermore, the combined evaluation of shear strength and fracture modes proved to be an effective approach for assessing adhesive bond quality.

Keywords: mass timber; bond quality; shear strength.

Introdução

A Madeira Lamelada Colada Cruzada (MLCC) ou *Cross Laminated Timber* (CLT), destaca-se entre os principais produtos de madeira engenheirada utilizados na construção civil devido à elevada capacidade estrutural, estabilidade dimensional e potencial para reduzir as emissões de carbono em comparação aos sistemas construtivos convencionais.

No Brasil, o eucalipto apresenta elevada produtividade florestal, rápido ciclo de produção e ampla disponibilidade comercial. Entretanto, a utilização região da medula ainda representa desafio tecnológico, pois essa porção central do tronco é caracterizada por menor densidade, madeira juvenil, maior suscetibilidade a defeitos de crescimento e propriedades mecânicas inferiores às da madeira madura.

Em razão dessas características, a norma brasileira NBR 7190 (2022) classifica a presença de medula como defeito da madeira serrada destinada ao uso estrutural. No entanto, no estudo de ALENCAR e MOURA (2019) e ALENCAR (2024) verificaram que painéis MLCC produzidos com madeira da região medular do eucalipto apresentaram desempenho mecânico satisfatório, com valores de módulo de elasticidade superiores aos requisitos mínimos estabelecidos pela ANSI/APA PRG 320 (2019).

A qualidade da ligação adesiva é um dos principais fatores para o desempenho estrutural dos painéis MLCC e os ensaios de resistência ao cisalhamento na linha de cola constituem um dos principais métodos empregados para avaliar a qualidade da adesão em produtos estruturais de madeira. Além dos valores de resistência mecânica, a avaliação do modo de fratura fornece informações complementares sobre a eficiência da ligação adesiva. Em colagens de boa qualidade, espera-se que a ruptura ocorra predominantemente na madeira, enquanto elevadas incidências de falhas na linha de cola indicam deficiência na interface adesiva. Dessa forma, a análise conjunta da resistência ao cisalhamento e dos modos de ruptura permite uma avaliacmais abrangente do desempenho da colagem.

Diante desse cenário, o objetivo do presente trabalho é avaliar a qualidade da colagem de painéis MLCC produzidos com lamelas contendo medula de eucalipto por meio de ensaios de

resistência ao cisalhamento e da análise dos modos de fratura em corpos de prova extraídos dos painéis.

Material e métodos

Foram produzidos, de acordo com a NBR 7190 (2022), ao todo 32 painéis MLCC com medula de eucalipto com densidade média de 0,57g/cm^3 sendo compostos por 3 lamelas com emendas dentadas de 2cm, totalizando 6cm de espessura. Foi utilizado adesivo poliuretano monocomponente PU aplicado com 200g/m^2 de gramatura. Após os ensaios de flexão, foram retirados 64 corpos de prova, para os ensaios de cisalhamento com dimensões de 5x5cm e testados na máquina universal de ensaios EMIC com célula de carga de 30 kN, conforme descrição do anexo 7 da NBR 7190 (2022).

Além da resistência ao cisalhamento, foi realizada a avaliação qualitativa do modo de ruptura dos corpos de prova, procedimento amplamente empregado para análise da eficiência da ligação adesiva em produtos estruturais de madeira. A classificação das rupturas foi realizada segundo a metodologia proposta por LOBÃO E GOMES (2006), utilizando película transparente quadriculada para determinação da porcentagem de arrancamento de madeira na superfície rompida.

As rupturas foram classificadas em três categorias: Fratura Profunda (FP): caracterizada pelo arrancamento significativo de fibras e porções de madeira, indicando elevada eficiência da ligação adesiva; Fratura Rasa (FR): caracterizada pela presença parcial de fibras aderidas à superfície de ruptura; Falha na Linha de Cola (FC): caracterizada pela separação entre as lamelas com ausência ou reduzida presença de fibras de madeira aderidas, indicando ruptura por descolamento, observados na figura 1.

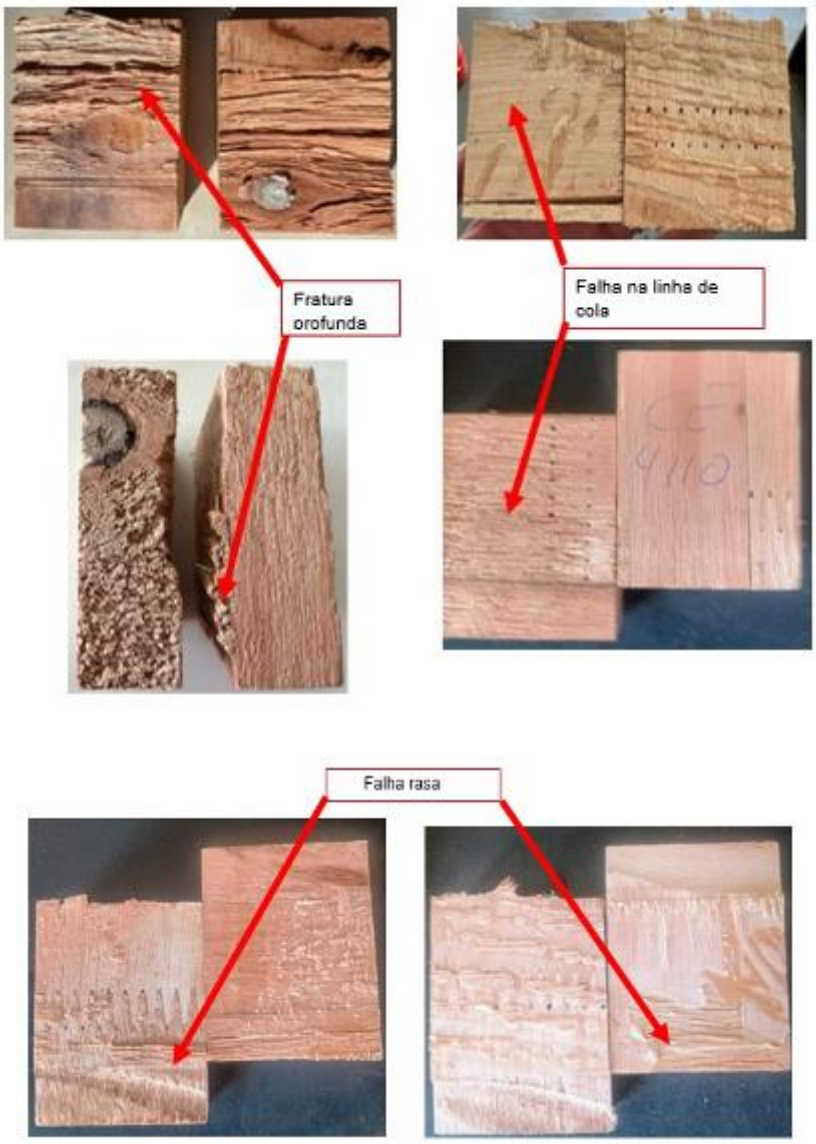


Figura 1- Identificação dos tipos de ruptura dos corpos de prova dos ensaios de cisalhamento.

A qualidade da colagem foi avaliada conjuntamente por meio da resistência mecânica e da distribuição percentual dos modos de fratura, considerando que maiores incidências de ruptura na madeira indicam melhor desempenho da ligação adesiva, enquanto maiores porcentagens de falha na linha de cola refletem deficiência da interface adesiva.

2. Resultados e Discussões

Os resultados dos ensaios de resistência ao cisalhamento para os corpos de prova retirados dos painéis MLCC produzidos com medula de eucalipto estão na figura 2.

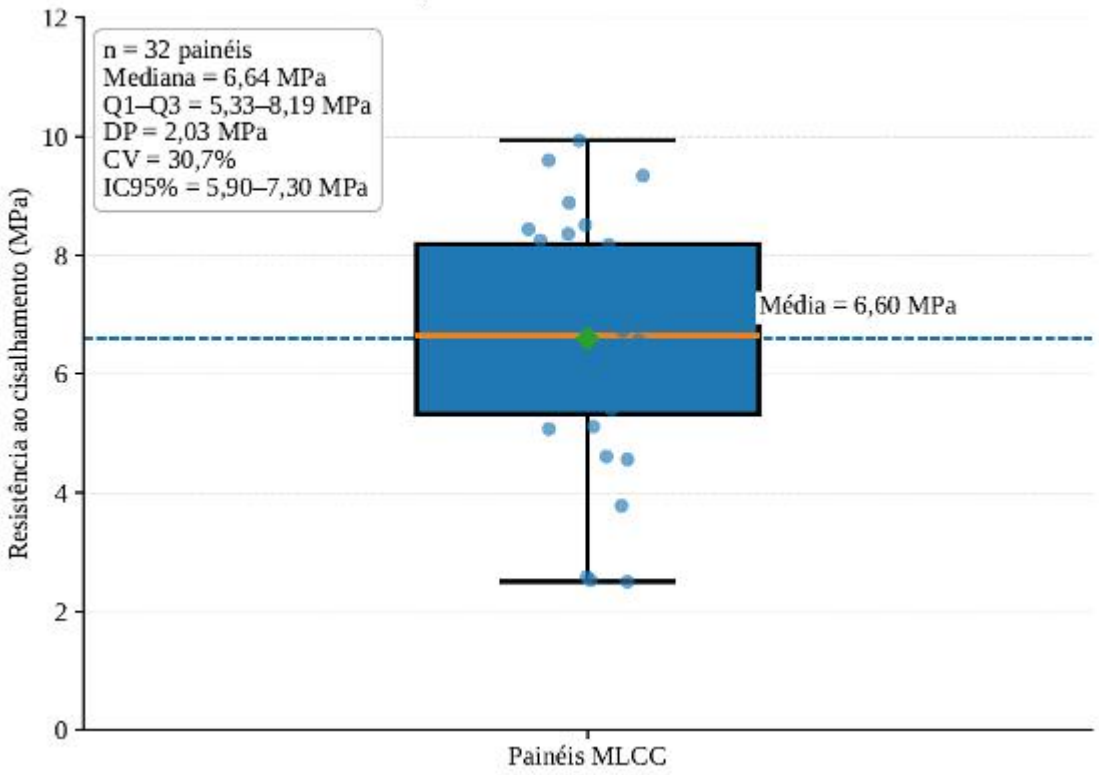


Figura 2- Gráfico de distribuição da Resistência Média ao Cisalhamento.

A resistência média ao cisalhamento obtida foi de 6,62 MPa, valor compatível com resultados reportados para elementos estruturais produzidos com madeira de eucalipto colada com adesivos poliuretanos. Estudos conduzidos por SEGUNDINHO *et al.* (2018), BIANCHE *et al.* (2017), FARIA *et al.* (2020) e SILVA *et al.* (2023) reportaram resistências ao cisalhamento variando aproximadamente entre 7,6 MPa e 12,7 MPa, utilizando madeiras de densidades semelhantes às empregadas neste estudo.

Embora a resistência média obtida tenha sido inferior aos maiores valores encontrados na literatura, deve-se considerar que os painéis foram produzidos predominantemente com madeira proveniente da região da medula do eucalipto, classificada pela NBR 7190 (2022) como de menor qualidade estrutural. Dessa forma, os resultados demonstram que essa matéria-prima apresenta potencial para aplicação em painéis MLCC, desde que sejam adotados critérios adequados de fabricação e controle da ligação adesiva.

A análise dos modos de fratura revelou médias de 62,86% de falha na linha de cola (FC), 27,78% de fratura rasa (FR) e 9,52% de fratura profunda (FP). A distribuição dos modos de fratura evidenciou a coexistência de ruptura na interface adesiva e no substrato lenhoso, indicando que o comportamento da ligação adesiva foi influenciado tanto pela variabilidade natural da madeira proveniente da região medular quanto pelas condições de fabricação dos painéis. Embora a falha na linha de cola tenha sido predominante, a ocorrência de fraturas na madeira demonstra que a ligação adesiva foi capaz de promover a transferência de esforços entre as lamelas em parcela significativa das amostras.

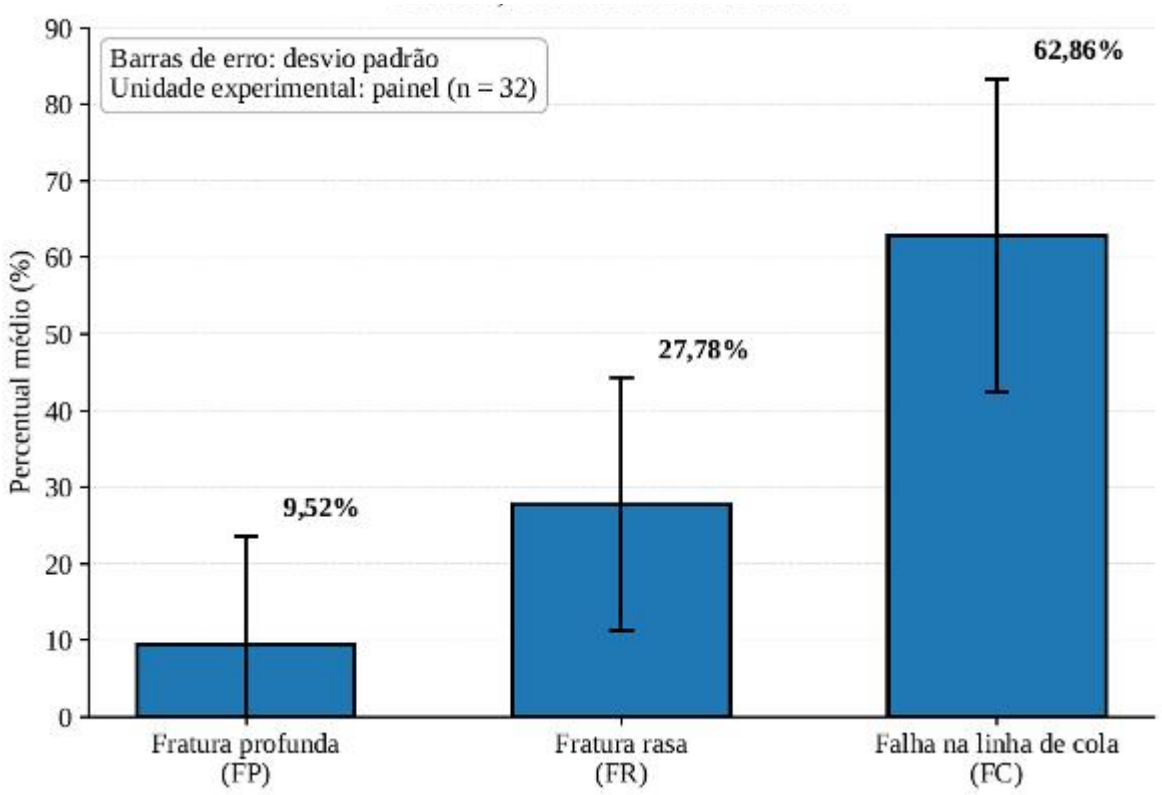


Figura 3- Gráfico de Distribuição média dos modos de fratura.

Resultados semelhantes foram observados por CHERRY *et al.* (2023), que verificaram predominância de ruptura na madeira em elementos contendo medula quando a ligação adesiva apresentou desempenho satisfatório. Da mesma forma, SILVA *et al*. (2023) reportaram que a ruptura ocorreu predominantemente na madeira em elementos de madeira laminada colada produzidos com adesivo poliuretano, indicando elevada eficiência da colagem.

A comparação qualitativa entre os ensaios de cisalhamento e o comportamento observado durante a avaliação mecânica dos painéis indicou que as amostras que apresentaram

descolamento entre camadas também tenderam a apresentar maior participação de falhas na linha de cola. Essa concordância sugere que a análise dos modos de fratura pode constituir uma ferramenta auxiliar na avaliação da qualidade da ligação adesiva e na compreensão dos mecanismos de ruptura dos painéis. Entretanto, uma investigação mais aprofundada dessa relação requer análises específicas, que serão objeto de estudos futuros.

Os ensaios de cisalhamento mostraram-se adequados para caracterizar a qualidade da ligação adesiva entre as lamelas, fornecendo informações complementares por meio da análise dos modos de fratura. Os resultados obtidos evidenciam o potencial de utilização da madeira proveniente da região medular do eucalipto na fabricação de painéis MLCC e reforçam a importância do controle das etapas de colagem para a obtenção de ligações adesivas mais homogêneas.

Conclusões

Os ensaios de resistência ao cisalhamento e a análise dos modos de fratura mostraram-se ferramentas complementares para a avaliação da qualidade da colagem de painéis de Madeira Lamelada Colada Cruzada (MLCC) produzidos com madeira de medula de eucalipto.

Os ensaios de cisalhamento mostraram-se adequados para avaliar a qualidade da ligação adesiva dos painéis MLCC produzidos com madeira proveniente da região medular do eucalipto. A resistência média ao cisalhamento foi de 6,62 MPa, valor compatível com o comportamento esperado para esse tipo de material, considerando as características da matéria-prima utilizada. A análise dos modos de fratura evidenciou a ocorrência de falhas tanto na linha de cola quanto no substrato lenhoso, demonstrando que o comportamento da ligação adesiva foi influenciado pela variabilidade natural da madeira e pelas condições de fabricação dos painéis.

A avaliação conjunta da resistência ao cisalhamento e dos modos de fratura permitiu caracterizar de forma consistente a qualidade da colagem, demonstrando que esses parâmetros constituem ferramentas importantes para o controle de qualidade na produção de painéis MLCC. Os resultados obtidos indicam que a madeira da região medular do eucalipto apresenta potencial para aplicação na fabricação desses painéis, no entanto, estudos complementares, envolvendo a correlação entre diferentes propriedades mecânicas e o comportamento estrutural

dos painéis, poderão contribuir para ampliar o conhecimento sobre o desempenho desse material em aplicações estruturais.

Referências bibliográficas

Alencar, J. B. M (2024). Análise do Comportamento de Painéis MLCC compostos por Lamelas de Medula de Eucalipto com Emendas Dentadas. (Tese Doutorado) Universidade Estadual de Londrina, Londrina.

Alencar, J. B. M.; Moura, J. D. M. Mechanical Behavior of Cross Laminated Timber Panels Made of Low-Added-Value Timber. Forest Products Journal Vol. 69, No. 3/4. 2019. Disponível em: https://fpj.kglmeridian.com/meridian/fpj/published/rest/pdf-watermark/v1/journals/fpro/69/3/article-p177.pdf/watermark-pdf/ . Acesso em: 10 out. 2024.

Bianche, J.J., Teixeira, A.P.M., Ladeira, J.P.S. Cisalhamento na linha de cola de Eucalyptus sp. colado com diferentes adesivos e diferentes gramaturas, Floresta e Ambiente, v. 24, pp. 00077114. doi: http://dx.doi.org/10.1590/2179-8087.077114. 2017 Acesso em: 9 set. 2024.

Cherry, R.; Manalo, A.; Karunasena, W.; Stringer, G. Maximizing the Use of Out-of-Grade Hybrid Pine in Engineered Wood Products: Bond Performance, the Effect of Resin Streaking, Knots, and Pith. Setembro 2023. Forest. Disponível em: https://doi.org/10.3390/f14091916 . Acesso em: 05 mai. 2024.

Faria, D. L.; Mendes, L. M.; Guimarães Júnior, J. B. Estudo do comportamento mecânico de madeira laminada colada de *Hevea brasiliensis* produzida com adesivo poliuretano. 2020. Scientia Forestalis, 48(126), e3231. Disponível em: https://doi.org/10.18671/scifor.v48n126.11 Acesso em: 10 out. 2024.

Lobão, M. S.; Gomes, A. Qualidade da Adesão de Madeira de Eucalipto em corpos-de-prova colados em dois diferentes Planos de Densidades, 2006, Cerne, Lavras, v. 12, n.2, P. 194-200, abr./jun. 2006. Disponível em: http://repositorio.ufla.br/jspui/handle/1/14012 Acesso em: 07 jul. 2024.

Segundinho, P.; Silva, A. C., Gonçalves, G. F.; Regazzi, A. J.; Caracterização da madeira laminada colada de Eucalyptus sp. produzida com adesivos resorcinol-fenol-formaldeído e poliuretano. Revista Ciência da Madeira (Brazilian Journal of Wood Science)

DOI: 10.12953/2177-6830/rcm. v9n2p123-133. 2018. Disponível em: https://www.cabidigitallibrary.org/doi/pdf/10.5555/20193109487 Acesso em: 07 jul. 2024.

Silva, M. L. J.S., Lobo, M. V. F., Cunha, R. D. A., César, S. C., Viabilidade do uso de madeira clonal de Eucalyptus urophylla de rápido crescimento para produção de madeira lamelada colada (MLC) com adesivo poliuretano à base de mamona Revista Matéria v28 n2. Disponível em: https://doi.org/10.1590/1517-7076-RMAT-2023-0073. 2023 Acesso em: 11 out. 2024.

Associação Brasileira De Normas Técnicas, ABNT, NBR 7190 – Projeto de Estruturas de Madeira, Rio de Janeiro, (2022). https://abnt.org.br/

The Engineered Wood Association. Standard For Performance – Rated Cross-Laminated Timber, ANSI/APA PRG 320. Tacoma, Washington, USA. (2019). https://www.apawood.org/ansi-apa-prg-320

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Qualidade De Painéis Aglomerados Produzidos Com Partículas De Casca De Pequi E Látex Natural

Carlos Eduardo Lima Sousa[1]; Samara Figueira Câmara Noleto; Nicoli Teixeira [1]; Maria Eduarda Pinto dos Santos[1]; Karolayne Ferreira Saraiva[1]; Bruna Duque Guirardi[1]; Thatiele Pereira Eufrazio[1]; Raquel Marchesan[1]

[1]Universidade Federal do Tocantins (UFT), Curso de Engenharia Florestal, Laboratório de Tecnologia e Utilização de Produtos Florestais (LabTecFlor), Gurupi, Tocantins, Brasil.

Resumo: Este estudo teve como objetivo avaliar o efeito da adição da casca do fruto do pequi (*Caryocar brasiliense*) e do látex natural na qualidade de painéis aglomerados produzidos com partículas de *Eucalyptus* spp. Foram confeccionados painéis utilizando 600 g de partículas (50% madeira de *Eucalyptus* e 50% casca de pequi) e 300 g de adesivo acetato de polivinila (PVA). Os tratamentos consistiram em um painel controle, um painel com casca de pequi e um painel com casca de pequi reforçado com látex natural. Foram avaliadas as propriedades físicas, mecânicas e acústicas dos painéis, incluindo densidade aparente, absorção de água, inchamento em espessura, teor de umidade, resistência à tração e isolamento acústico. A adição de látex natural promoveu redução da absorção de água, aumento da densidade aparente e da resistência à tração, além de melhorar o desempenho acústico dos painéis. Os resultados demonstram que o látex natural apresenta elevado potencial como aditivo sustentável na produção de painéis aglomerados contendo casca do fruto de pequi.

Palavras-chave: *Caryocar brasiliense*; aditivo natural; reaproveitamento.

Effect Of Natural Latex On The Quality Of Particleboards Produced With Pequi Bark

Abstract: The objective of this study was to evaluate the effect of adding pequi (*Caryocar brasiliense*) fruit bark and natural latex on the quality of particleboard produced from *Eucalyptus* spp. particles. Panels were manufactured using 600 g of particles (50% *Eucalyptus* wood and 50% pequi bark) and 300 g of polyvinyl acetate (PVA) adhesive. The treatments consisted of a control panel, a panel with pequi bark, and a panel with pequi bark reinforced with natural latex. The physical, mechanical, and acoustic properties of the panels were evaluated, including bulk density, water absorption, thickness swelling, moisture content, tensile strength, and sound insulation. The addition of natural latex reduced water absorption, increased bulk density and tensile strength, and improved the acoustic performance of the panels. The results demonstrate that natural latex has high potential as a sustainable additive in the production of particleboard containing pequi fruit bark.

Keywords: *Caryocar brasiliense*; Natural latex; Residue reuse.

1. Introdução

O setor de painéis de madeira reconstituída tem apresentado crescimento significativo nos últimos anos, impulsionado pela expansão da indústria moveleira e da construção civil. No

Brasil, o aumento da produção e do consumo de painéis evidencia a importância desse segmento para a indústria de base florestal (IBÁ, 2025). Paralelamente, cresce a necessidade de desenvolver produtos ambientalmente sustentáveis, utilizando matérias-primas renováveis e promovendo o aproveitamento de resíduos agroflorestais, em consonância com os princípios da economia circular (IBÁ, 2025).

Entre as espécies florestais utilizadas na fabricação de painéis destaca-se o gênero Eucalyptus, devido ao rápido crescimento, elevada produtividade, ampla disponibilidade e características tecnológicas favoráveis para aplicações industriais (IBÁ, 2025). Entretanto, a utilização exclusiva dessa madeira pode resultar em limitações relacionadas à compactação e às propriedades físicas e mecânicas dos painéis, tornando necessária a incorporação de materiais que contribuam para melhorar seu desempenho (Iwakiri et al., 2012).

A casca do fruto do pequi (*Caryocar brasiliense*), abundante no bioma Cerrado, constitui um resíduo gerado durante o processamento do fruto que, na maioria das vezes, é descartado sem aproveitamento. Sua utilização na produção de painéis aglomerados representa uma alternativa sustentável, agregando valor a um subproduto regional e reduzindo impactos ambientais decorrentes do descarte inadequado (Mendes & Marchesan, 2022).

Além da utilização da casca do fruto do pequi, a incorporação de aditivos naturais tem sido estudada como alternativa para melhorar o desempenho dos adesivos sintéticos empregados na fabricação de painéis. O látex natural proveniente da seringueira (*Hevea brasiliensis*) apresenta características renováveis, baixa toxicidade e potencial para aumentar a resistência mecânica, reduzir a absorção de água e melhorar o desempenho acústico dos painéis (Vieira et al., 2023).

Estudos anteriores demonstraram que a incorporação da casca de pequi melhora a compactação dos painéis, porém pode aumentar a absorção de água e o inchamento devido à elevada quantidade de carboidratos presentes no material (Mendes & Marchesan, 2022). Dessa forma, o uso do látex natural surge como uma alternativa promissora para minimizar esses efeitos e aumentar a qualidade tecnológica dos painéis.

Assim, o presente trabalho teve como objetivo avaliar a influência da adição de látex natural nas propriedades físicas, mecânicas e acústicas de painéis aglomerados produzidos com partículas de *Eucalyptus* spp**.** e casca de pequi, visando desenvolver um material sustentável com potencial de aplicação na indústria de produtos madeireiros.

2. Material e métodos

2.1 Obtenção dos materiais

O estudo foi desenvolvido no Laboratório de Tecnologia e Utilização de Produtos Florestais I da Universidade Federal do Tocantins (UFT), Campus Gurupi. Foram utilizadas partículas de madeira de *Eucalyptus* spp. provenientes de florestas plantadas da região sul do Tocantins e partículas da casca do fruto do pequi (*Caryocar brasiliense*), coletadas na Feira do Pequeno Produtor do município de Gurupi-TO. Como adesivo, empregou-se cola comercial à base de acetato de polivinila (PVA), complementado com parafina líquida e látex natural (*Hevea brasiliensis*), utilizado como agente de reforço na produção dos painéis. Os materiais utilizados são apresentados na Figura 1.



Figura 20 – Materiais utilizados na produção dos painéis.

Inicialmente, a madeira de *Eucalyptus* spp. foi transformada em maravalhas, secas até atingirem o teor de umidade de equilíbrio e posteriormente moídas e classificadas em peneiras de 16 a 60 mesh. As partículas retidas na peneira de 16 mesh foram utilizadas na fabricação dos painéis.

As cascas do fruto do pequi passaram por processo de limpeza, remoção das sementes, secagem em estufa solar, moagem e classificação granulométrica, sendo igualmente utilizadas as partículas de 16 mesh.

2.2 Produção dos painéis

Antes da fabricação definitiva foram produzidos painéis preliminares para definição das proporções dos materiais. O experimento foi constituído por três tratamentos, com seis repetições cada, totalizando dezoito painéis.

O tratamento T1 foi composto por 500 g de partículas de *Eucalyptus* e 300 g de adesivo PVA. O tratamento T2 foi produzido com 300 g de partículas de *Eucalyptus*, 300 g de partículas de casca do fruto do pequi e 300 g de adesivo PVA. O tratamento T3 utilizou a mesma

composição do T2, acrescida de 1,5% de látex natural em relação à massa das partículas. A composição dos tratamentos é apresentada na tabela 1.

Tabela 1 – Delineamento experimental do estudo.

Qtd - Painéis	Madeira (g)	Pequi (g)	PVA (g)	Látex natural (g)	Parafina (g)
T1 - 6	500	X	300	x	10
T2 - 6	300	300	300	x	12
T3 - 6	300	300	300	25,19	12

Após a pesagem, os materiais foram homogeneizados manualmente até completa distribuição do adesivo sobre as partículas. Em seguida, o colchão de partículas foi acondicionado em molde de madeira com dimensões de 35 × 30 × 15 cm e submetido à pré-prensagem sob pressão de 6 kgf cm^{-2} durante 10 minutos. Posteriormente, os painéis permaneceram em prensagem por 24 horas sob a mesma pressão, sendo classificados como painéis de baixa densidade. As etapas de fabricação encontram-se ilustradas na Figura 2.



Figura 21 – Etapas de fabricação dos painéis aglomerados.

2.3 Ensaios físicos, mecânicos e acústicos

Após a estabilização dos painéis, foram confeccionados os corpos de prova para determinação das propriedades físicas e mecânicas, conforme os procedimentos estabelecidos pela ABNT NBR 14810-2 (2018). Foram avaliados o teor de umidade, a densidade aparente, a absorção de água, o inchamento em espessura e a resistência à tração perpendicular.

Para avaliação do isolamento acústico, foram confeccionadas caixas com dimensões de 15 × 10 × 7 cm utilizando os painéis produzidos. Um telefone celular emitindo ruído rosa foi

posicionado no interior de cada caixa, sendo o nível de pressão sonora medido por meio de um dosímetro de ruído modelo DOS-600, nas condições de caixa aberta e fechada.

Os dados obtidos foram submetidos ao teste de normalidade de Shapiro-Wilk e, posteriormente, à análise de variância (ANOVA). Quando observadas diferenças significativas, as médias foram comparadas pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. Também foram realizadas análises de correlação de Pearson e Análise de Componentes Principais (PCA), utilizando os programas Statgraphics, Sisvar, RBio e Past 4.13

3. Resultados e discussão

Os valores médios das propriedades físicas e mecânicas dos painéis produzidos nos diferentes tratamentos são apresentados na Tabela 2. A análise de variância indicou diferença significativa ($p \leq 0,05$) entre os tratamentos para absorção de água, inchamento em espessura, teor de umidade, densidade aparente e resistência à tração perpendicular, evidenciando a influência da adição da casca de pequi e do látex natural sobre a qualidade tecnológica dos painéis.

Tabela 2 – Propriedades físicas e mecânicas dos painéis produzidos com *Eucalyptus* spp**.**, casca de pequi e látex natural.

Tratamentos (Painéis)	**ABS (%)**	**INCH (%)**	**TU (%)**	**Da (g/cm³)**	**ʃT (MPa)**
T1	95,26 a (11,79)	36,51 b (10,03)	10,42 b (1,66)	0,35 b (2,38)	0,06 b (23,32)
T2	96,26 a (7,48)	47,58 a (5,12)	10,54 b (3,58)	0,70 a (4,92)	0,53 a (15,69)
T3	84,15 b (7,22)	46,98 a (7,02)	11,66 a (5,18)	0,71 a (2,94)	0,53 a (38,46)
Pr>Fc	*	*	*	*	*

Nota: Médias seguidas pela mesma letra minúscula na coluna não diferem estatisticamente (Teste de Tukey – P≥0,05). Os valores entre parêntesis correspondem ao coeficiente de variação (%). *Houve diferença significativa na ANOVA. ns não houve diferença significativa na ANOVA. Abs.: Absorção; Inch.: inchamento; TU: teor de umidade; Da: densidade aparente; ʃT: Resistência à tração.

Os painéis produzidos apenas com partículas de *Eucalyptus* apresentaram elevada absorção de água e baixa densidade aparente, características relacionadas à menor compactação

do colchão de partículas. A incorporação da casca de pequi promoveu aumento da densidade, porém também elevou os valores de absorção de água e inchamento em espessura, comportamento atribuído à elevada quantidade de carboidratos presentes na casca do fruto, favorecendo a retenção de umidade (Mendes & Marchesan, 2022).

A adição de látex natural reduziu a absorção de água em comparação ao tratamento contendo apenas casca de pequi. Entretanto, o inchamento em espessura e a densidade aparente não diferiram estatisticamente entre T2 e T3. Assim, nas condições avaliadas, o efeito do látex foi observado apenas na redução da absorção de água.

Em relação à resistência à tração perpendicular, os tratamentos contendo casca de pequi apresentaram desempenho significativamente superior ao painel produzido exclusivamente com *Eucalyptus*. Entretanto, T2 e T3 não diferiram estatisticamente, indicando que a adição de látex natural não contribuiu para esse parâmetro.

Os resultados obtidos para o isolamento acústico encontram-se apresentados na Tabela 3. Houve diferença significativa entre os tratamentos tanto para as condições de caixa aberta quanto de caixa fechada, demonstrando que a composição dos painéis influenciou diretamente seu comportamento acústico.

Os resultados obtidos para o isolamento acústico encontram-se apresentados na Tabela 3. Houve diferença significativa entre os tratamentos tanto para as condições de caixa aberta quanto de caixa fechada, demonstrando que a composição dos painéis influenciou diretamente seu comportamento acústico.

Tabela 3 – Desempenho acústico dos painéis nos diferentes tratamentos.

Isolamento acústico da caixa	*Eucalyptus*	*Eucalyptus* + Pequi	*Eucalyptus* + Pequi + Látex natural	Pr>Fc da interação
Aberta (dB)	78,05 cA (0,08)	81,51 bA (0,07)	85,37 aA (0,09)	*
Fechada (dB)	74,82 aB (0,10)	68,09 bB (0,17)	69,36 bB (0,19)	*

Nota: Médias seguidas pela mesma letra minúscula na linha e maiúscula na coluna não diferem estatisticamente (Teste de Tukey – P≥0,05). Os valores entre parêntesis correspondem ao coeficiente de variação (%). *Houve diferença significativa na ANOVA. dB: decibéis.

Na condição de caixa aberta, os painéis contendo látex natural apresentaram maior nível de pressão sonora, indicando maior reflexão sonora. Entretanto, na condição de caixa fechada, os tratamentos contendo casca de pequi apresentaram menores níveis de decibéis transmitidos, evidenciando maior capacidade de isolamento acústico em comparação ao tratamento constituído apenas por *Eucalyptus* spp. Esses resultados demonstram que o aumento da densidade favoreceu a redução da transmissão sonora através dos painéis, ampliando seu potencial de aplicação como material de isolamento acústico para ambientes internos.

A matriz de correlação entre as propriedades avaliadas na Figura 3, evidenciou forte correlação positiva entre densidade aparente e resistência à tração (r = 0,90), indicando que painéis mais densos apresentam maior resistência mecânica. Também foi observada correlação positiva entre densidade e inchamento, reflexo da maior compactação das partículas. Em contrapartida, verificou-se correlação negativa entre densidade aparente e transmissão sonora, demonstrando que o aumento da densidade favorece o isolamento acústico dos painéis. As correlações envolvendo a absorção de água apresentaram baixa intensidade, indicando menor influência desse parâmetro sobre as demais propriedades avaliadas.

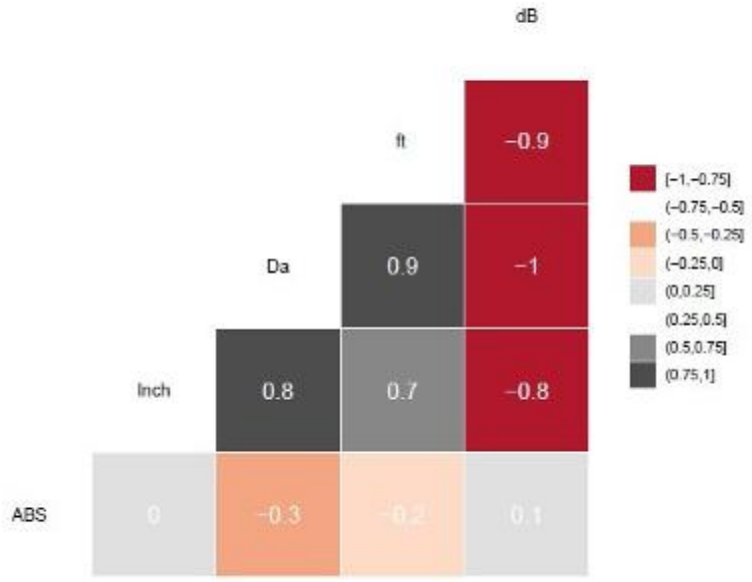


Figura 3 – Correlação entre as propriedades físicas, mecânicas e acústicas dos painéis.

A Análise de Componentes Principais (PCA), apresentada na Figura 4, permitiu identificar o agrupamento dos tratamentos de acordo com suas características tecnológicas. O

tratamento contendo *Eucalyptus*, casca de pequi e látex natural destacou-se pela associação com maiores valores de densidade aparente, resistência à tração e desempenho acústico, enquanto o tratamento composto apenas por *Eucalyptus* permaneceu associado aos maiores valores de absorção de água e menor isolamento acústico. Esses resultados reforçam o potencial do látex natural como aditivo para a produção de painéis aglomerados com maior qualidade tecnológica e maior potencial de aplicação comercial.

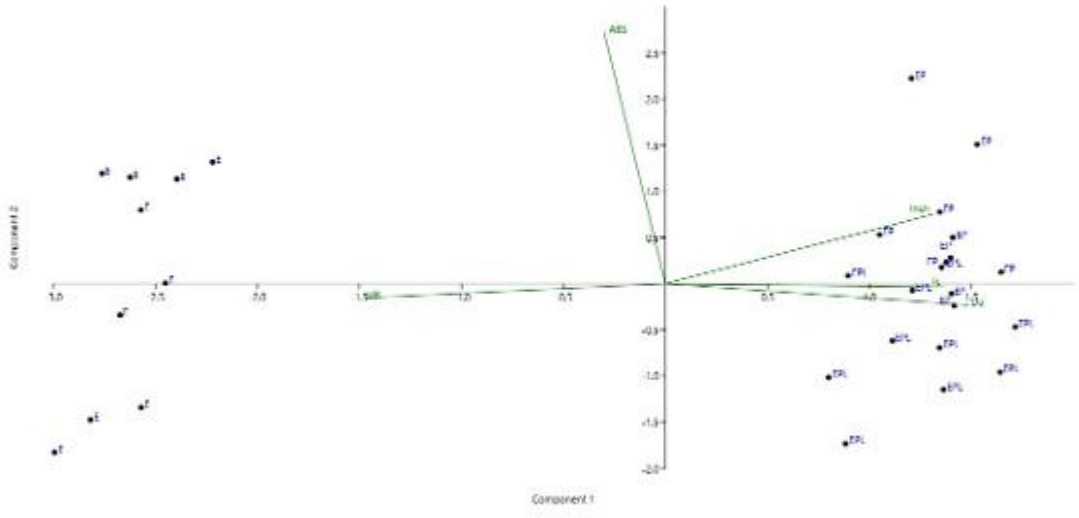


Figura 4 – Agrupamentos dos tipos de painéis que mais representam os parâmetros.

4. Conclusões

Os resultados demonstraram que a incorporação da casca de pequi influenciou as propriedades dos painéis aglomerados produzidos com partículas de *Eucalyptus* spp. A adição de látex natural reduziu a absorção de água, mas não alterou significativamente a densidade aparente, o inchamento em espessura, a resistência à tração perpendicular ou o desempenho acústico na condição de caixa fechada.

A incorporação da casca de pequi ocasionou aumento do inchamento em espessura. Embora o látex não tenha promovido redução estatisticamente significativa desse parâmetro, os painéis com sua adição mantiveram valores de inchamento semelhantes aos do tratamento sem látex, indicando a necessidade de avaliar outras proporções do aditivo.

Dessa forma, a casca de pequi apresenta potencial como matéria-prima alternativa para a produção de painéis aglomerados. Contudo, estudos complementares são necessários para

otimizar a proporção de látex, reduzir o inchamento em espessura e avaliar a viabilidade tecnológica desses painéis.

5. Agradecimentos

Agradecemos ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), à Universidade Federal do Tocantins (UFT) e ao Laboratório de Tecnologia e Utilização de Produtos Florestais I.

6. Referências bibliográficas

American Society for Testing and Materials. (1994). ASTM D1582-60: Standard test method for solids content of liquid adhesives. ASTM International.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2018). ABNT NBR 14810-2: Painéis de partículas de média densidade – Parte 2: Requisitos. ABNT.

Indústria Brasileira de Árvores. (2025). Relatório anual 2025. IBÁ. Disponível em: https://iba.org/wp-content/uploads/2025/10/IBA_relatorio_digital_POR.pdf .

Iwakiri, S., Vianez, B. F., Weber, C., Trianoski, R., & Almeida, V. C. (2012). Avaliação das propriedades de painéis aglomerados produzidos com resíduos de serrarias de nove espécies de madeiras tropicais da Amazônia. Acta Amazonica, 42(1), 59–64. https://doi.org/10.1590/S0044-59672012000100007 .

MENDES, Júlia Gabriela Do Nascimento; MARCHESAN, Raquel. ADIÇÃO DA CASCA DO FRUTO DO CARYOCAR BRASILIENSE (PEQUI) NA PRODUÇÃO DE PAINÉIS A BASE DE EUCALYPTUS SPP. E ADESIVO REFORÇADO COM TANINO. In: Seminário de Iniciação Científica da UFT. Anais. Palmas(TO) Universidade Federal do Tocantins – Campus de Arraias, Gurupi e Palmas, 2022. Disponível em: https://www.even3.com.br/anais/sicuft2022/554741-adicao-da-casca-do-fruto-do-caryocar-brasiliense-(pequi)-na-producao-de-paineis-a-base-de-eucalyptus-spp-e-adesi/ .

Vieira, G. H. C., Moraes, T. P. E., Saraiva, K. F., & Marchesan, R. (2024). *Lignina como agente de reforço em painéis produzidos com Eucalyptus spp. e casca de Caryocar brasiliense (pequi).* Desafios – Revista Interdisciplinar da Universidade Federal do Tocantins, 11(3). https://doi.org/10.20873/2024_v3_18 .

Wastowski, A. D. (2018). Química da madeira. Interciência.

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Rendimento volumétrico e produção de madeira serrada de três espécies nativas na Amazônia

Francisco Neto Passos da Silva [1]; William Santos Baima[2]; Luana Maia Azevedo[2]; Samylly Victoria Oliveira de Araújo[1]; Aristeu Teixeira da Silva Junior[3];Ariene Oliveira Barros[4]; Paulo Cesar Gomes Pereira[2], Denes de Souza Barros[2]

[1] Valore Projetos e Engenharia Ltda
[2] Universidade Federal Rural da Amazônia
[3] Departamento de Polícia Técnico Científica do Estado do Amazonas
[4] Engenheira Florestal

Resumo: O rendimento do desdobro de toras na serraria é um parâmetro importante para quantificar o volume de madeira produzida e prever o uso eficiente e sustentável da madeira pela indústria de processamento. Nesse sentido, o presente trabalho teve como objetivo avaliar o coeficiente de rendimento volumétrico (CRV) de madeira em tora para madeira serrada e produtos gerados de três espécies nativas em uma serraria localizada no município de Mazagão, Estado do Amapá. Foram estudadas as espécies *Dinizia excelsa* Ducke, *Dipteryx odorata* (Aubl.) Willd. e *Manilkara elata* (Allemão ex Miq.) Monach. O CRV e a classificação dos produtos gerados teve como instrumento legal norteador a Resolução CONAMA nº 474/2016. Para determinação do volume das toras e do oco utilizou-se a equação de Smalian. O volume das peças foi obtido pelo produto entre largura, espessura e comprimento. O maior CRV foi observado para *D. excelsa*, com 61,74%, enquanto *D. odorata* e *M. elata* apresentaram 44,38% e 44,31%, respectivamente. A média geral foi de 50,14%. Os principais produtos gerados foram caibro, prancha, sarrafo, tábua, viga e vigota. As três espécies estudadas apresentaram CRV superior ao previsto pela legislação vigente e diversificação nos seus produtos.

Palavras-chave*:* Madeira; Produtos Gerados; Desdobro.

Abstract: The lumber yield from log sawing is an important parameter for quantifying the volume of wood produced and predicting the efficient and sustainable use of timber by the wood processing industry. This study aimed to evaluate the volumetric yield coefficient (VYC) of logs converted into sawn timber and the products generated from three native species processed in a sawmill located in the municipality of Mazagão, Amapá State, Brazil. The species studied were *Dinizia excelsa* Ducke, *Dipteryx odorata* (Aubl.) Willd., and *Manilkara elata* (Allemão ex Miq.) Monach. The determination of the VYC and the classification of the products generated were based on Resolution No. 474/2016 of the Brazilian National Environmental Council (CONAMA). Log and hollow volumes were calculated using Smalian's equation, whereas the volume of sawn pieces was obtained by multiplying width, thickness, and length. The highest VYC was observed for *D. excelsa* (61.74%), while *D. odorata* and *M. elata* presented values of 44.38% and 44.31%, respectively. The overall mean VYC was 50.14%. The main products obtained were squared timber, planks, battens, boards, beams, and joists. All three species exhibited volumetric yield coefficients above the minimum values established by current Brazilian legislation and showed diversification in the products generated.

Keywords: Wood; Generated Products; Sawing.

1. Introdução

A Amazônica é reconhecida por sua alta variedade de espécies arbóreas com potencial para a produção de madeira, possuindo grande valor ecológico e econômico. Portanto, existe grande interesse em promover o manejo florestal como forma de conservação das florestas naturais e de produção sustentável de madeira na região (Ribeiro *et al*., 2016).

Grande parte das espécies conhecidas é comumente utilizada para a produção de produtos madeireiros e não madeireiros por meio de Planos de Manejo Florestal Sustentável, sendo importantes os estudos que visem descrever o potencial para uso sustentável das florestas nativas e subsidiar diretrizes para o uso racional dos recursos naturais (Brasil, 2006).

Para avaliar o desempenho da produção madeireira nas serrarias, parâmetros como o Coeficiente de Rendimento Volumétrico (CRV) e a eficiência são os mais recomendados (Prediger, 2019). O rendimento do desdobro de toras na serraria é um parâmetro importante para quantificar o volume de madeira que será produzido. Vale destacar que o melhor aproveitamento da matéria-prima e a melhoria do nível tecnológico podem reduzir a área florestal a ser explorada (Danielli *et al*., 2016).

A legislação vigente estabelece que o Coeficiente de Rendimento Volumétrico (CRV) é de 35% para transformações das matérias-primas tora e torete em madeira serrada (Brasil, 2016). No entanto, para que o empreendedor possa fazer uso mais eficiente da tora com base no CRV, a Resolução CONAMA nº 474/2016 (Brasil, 2016) prevê que o mesmo pode apresentar um estudo técnico de acordo com o Termo de Referência Padrão, considerando a maior parte das espécies utilizadas nos últimos 12 meses na empresa.

Nesse sentido, o presente trabalho teve como objetivo avaliar o coeficiente de rendimento volumétrico (CRV%) na conversão de madeira em tora para madeira serrada e classificar os produtos obtidos das espécies *Dinizia excelsa* Ducke, *Dipteryx odorata* (Aubl.) Willd.) e *Manilkara elata* (Allemão ex Miq.) Monach, processadas em uma indústria localizada no município de Mazagão, Estado do Amapá.

2. Materiais e métodos

O estudo foi realizado em uma empresa de desdobramento de madeira no município de Mazagão, localizada no sul do estado do Amapá, entre as coordenadas 0º 6’ 54’’ Sul e 51º 17’ 20’’ Oeste. O município possui área territorial de aproximadamente 13.294,778 km² e população estimada em 22.053 habitantes, com densidade demográfica de aproximadamente 1,30 hm/km² (IBGE, 2020).

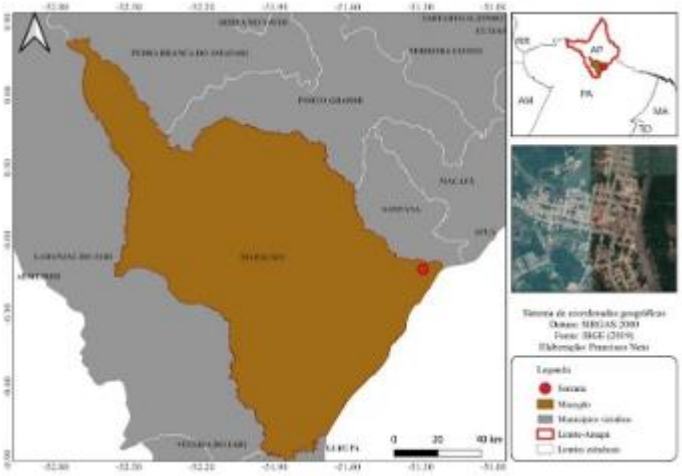


Figura 1 – Mapa de localização da serraria estudada no município de Mazagão-AP. **Fonte:** Autores (2022)

Para o estudo, foram selecionadas as três espécies mais comercializadas pela empresa: *Dinizia excelsa* Ducke (angelim-vermelho), *Dipteryx odorata* (Aubl.) Willd.) (cumaru) e *Manilkara elata* (Allemão ex Miq.) Monach.) (maçaranduba). Foram avaliadas, de forma aleatória, 14 toras/amostras por espécie.

A classificação da madeira serrada utilizada no presente estudo tomou como base a Resolução nº 474 do CONAMA/MMA/2016 (Brasil 2016). Essa classificação considera a espessura e a largura de cada peça produzida após o desdobro da tora, enquadrando os produtos em categorias como bloco, quadrado ou filé, pranchão, prancha, viga, vigota, caibro, tábua, sarrafo e ripa.

2.1 Cubagem rigorosa da madeira e desdobro das toras

A cubagem das toras foi realizada com o auxílio de uma trena graduada (cm), onde foram mensurados o comprimento e os diâmetros cruzados (D’ e D”; d’ e d”), , nas duas extremidades da tora, sem considerar a casca . Quando presente nas toras, adotando o mesmo procedimento para a cubagem das toras, foi realizada a cubagem de ocos, descontado no volume final da tora. (Figura 2). O volume das toras e do oco foi determinado empregando-se a equação de Smalian, Equação 1 (SOARES *et al.*, 2011).

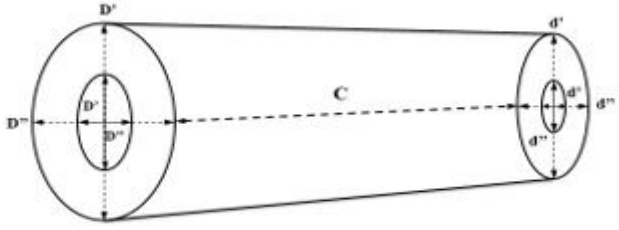


Figura 2. Metodologia para mensuração e cubagem das toras e cubagem do oco das toras.

Onde: D' e D": diâmetros cruzados das maiores extremidades, tora e oco; d' e d": diâmetros das menores extremidades, tora e oco; C: comprimento da tora e/ou oco.

O volume geométrico das toras, bem como dos seus respectivos ocos, foi obtido por meio das Equações 1, 2 e 3.

$$V = \frac{(g_1 + g_2)}{2} . C \qquad \text{Eq. (1)}$$

$$g_1 = \frac{\pi . (\bar{D}/100)^2}{4} \qquad \text{Eq. (2)}$$

$$g_2 = \frac{\pi . (\bar{d}/100)^2}{4} \qquad \text{Eq. (3)}$$

Onde: V - volume geométrico toras e ou oco(m^3); $\overline{D}$– Média dos diâmetros da extremidade maior da tora ou oco (cm); $\bar{d}$- Média dos diâmetros da extremidade menor da tora ou oco (cm); C- comprimento da tora ou oco (m); g_1 - área transversal da extremidade maior da tora ou oco (m^2); g_2- área transversal da extremidade menor da tora ou oco (m^2).

O processo de desdobro das toras das espécies estudadas na serraria, consistiu, primeiramente, na seleção das toras no pátio e em seguida no desdobro das mesmas pela serra-fita simples, onde se definiu a espessura final das peças. As peças obtidas na serra fita seguiram diretamente para a serra principal circular de mesa, onde foram refiladas em peças com diferentes larguras. O processo foi finalizado com o destopo na serra circular elevada de bancada, onde se retira as imperfeições na peça de madeira, tais como: nós, rachaduras, ataques de brocas, e imperfeição. Nesse último passo as peças são dimensionadas nos comprimentos comerciais, dando origem ao produto para venda.

Durante o processo de desdobro das toras, os resíduos gerados como costaneiras, aparas, serragem e pó de serra, foram empilhados em locais específicos de cada empresa, para serem vendidos a outras indústrias, para diferentes destinações, principalmente para fonte de energia, prática comum na região.

2.3 Cubagem da madeira serrada.

O volume da peça foi obtido pelo produto da largura, espessura e comprimento medidos de cada peça, como mostra a Equação 4.

$$V_{peça} = L \, x \, E \, x \, C \qquad \text{Eq. (4)}$$

Onde: $V_{peça}$- Volume da peça (m^3); L - Largura da peça (m); E - Espessura da peça (m); C - Comprimento da peça (m).

O volume total de peças produzidas de madeira serrada foi obtido pelo somatório do volume individual de cada peça pertencente por tora (Equação 5).

$$V_{total} = \sum V_{peças} \quad \text{Eq. (5)}$$

Onde: Vtotal - volume total das peças produzidas; ΣVpeças – Somatório do volume das peças por tora (m^3).

2.3 Determinação do Coeficiente de Rendimento Volumétrico

O CRV% por espécie foi determinado pela razão entre o volume de madeira serrada e o volume madeira em tora. O coeficiente de rendimento volumétrico (CRV) do processo de conversão mecânica "Tora/Torete em Madeira Serrada**"** foi determinado pela Equação 6.

$$CRV = \frac{VMS}{VMT}.100 \quad \text{Eq. (6)}$$

Onde: *CRV* - coeficiente de rendimentos volumétrico (%); *VMS* – volume de madeira serrada (m^3); *VMT* – volume de madeira em tora (m^3).

Após a determinação dos valores dos CRVs médios por espécie para a indústria processadora de madeira, foram calculadas as estatísticas descritivas referentes à média, coeficiente de variação (CV) e intervalo de confiança (superior e inferior) como apresentado por Queiroz (1998) e Soares *et al*. (2011). Inicialmente foi testada a aderência dos dados à distribuição normal, utilizando-se o Teste Shapiro-Wilk à nível de 5% de significância. Obteve se a normalidade para todas as variáveis de resposta dos tratamentos avaliados. Em seguida, os resultados obtidos foram submetidos à Análise de Variância (ANOVA) e médias comparadas pelo teste Tukey a 5% de probabilidade, com auxílio do programa Statistical Package for Social Science (SPSS) versão 20.0.

3. Resultados e discussão

A espécie *Dinizia excelsa* apresentou o maior Coeficiente de Rendimento Volumétrico (CRV), com média de 61,74%, seguida por *Dipteryx odorata*, com 44,38%, e *Manilkara elata*, com 44,31%. O maior rendimento observado para D. excelsa indica um melhor aproveitamento volumétrico das toras durante o processo de desdobro nas condições avaliadas. Essa diferença

pode estar relacionada às características das toras utilizadas, como diâmetro, qualidade e presença de defeitos, além das características próprias da espécie e da forma como a matéria-prima foi aproveitada para a produção dos diferentes produtos.

O resumo da análise de variância do rendimento em madeira serrada das três espécies estudadas demonstrou que houve diferença significativa em pelo menos um dos tratamentos.

Tabela 1 – Análise de variância do coeficiente de rendimento volumétrico para três espécies florestais no município de Mazagão-Amapá.

Fonte de Variação	GL	SQ	QM	F
Espécies	2	2822,38	1411,19	16,97**
Resíduos	39	3242,96	83,15	
Total	41	6065,34		

Onde: FV: Fonte de variação; GL: Grau de liberdade; SQ: Soma dos quadrados; QM: Quadrados médios; F: Razão da variância. ** significativo ao nível de 1% de probabilidade (p<.01).

Houve diferença significativa entre os CRVs analisados para as diferentes espécies estudadas desdobro realizado com as espécies estudadas, sendo que o *D. excelsa* a que apresentou maior CRV, e diferiu estatisticamente das espécies *D. odorata* e *M. elata*. Sendo estas duas últimas espécies apresentaram médias estatisticamente iguais (Figura 3).

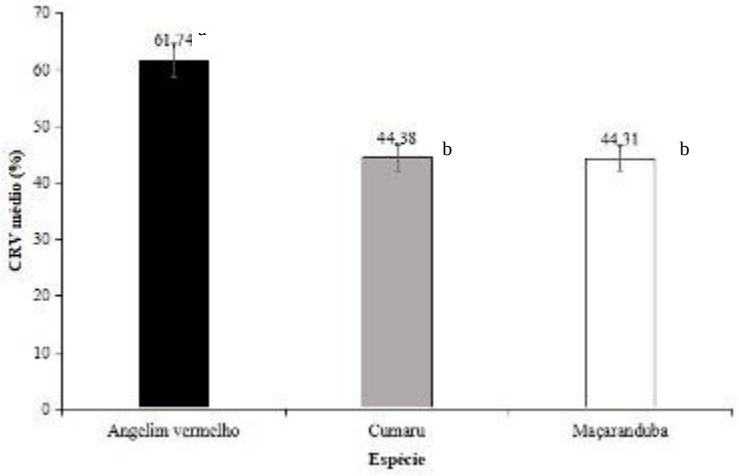


Figura 3 – CRV médio de madeira serrada de três espécies estudadas em uma serraria no município de Mazagão-Amapá. Médias seguidas da mesma letra não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ao nível descritivo, com significância de 5% (P<0,05).

Todas as três espécies apresentaram valor de CRV superior ao mínimo estipulado pela Instrução Normativa nº 474, de 06 de abril de 2016, do Ministério do Meio Ambiente (MMA), que estabeleceu o rendimento volumétrico em 35% (Brasil, 2016).

O estudo realizado Parente *et al.* (2024), no estado do Acre com 23 espécies e 1.200 toras de madeira, o CRV (57,32%) foi superior ao determinado pela Resolução Conama 474/2016 para a conversão de madeira em tora em madeira serrada, assim como as médias de rendimento individualizadas para todas as espécies.

Em estudo realizado por Romero *et al.* (2021), avaliando o coeficiente de rendimento de espécies comerciais no estado do Acre, foram observados valores superiores de CRV para a espécie Cumaru (*D. odorata*), com 65,6%. No presente estudo, o Cumaru apresentou CRV menor do que o estudo citado (44,38%).

Estudo realizado por Cavalcante e Silva (2017), analisando o CRV para a espécie *M. elata* em três serrarias no município de Paragominas e São Miguel do Guamá no estado do Pará, encontrou média de 59,45 % para a espécie, portanto, rendimento superior ao encontrado no presente trabalho. Em um estudo realizado por Danielli *et al.,* (2016), utilizando-se a espécie *Manilkara spp*., foi encontrado um CRV médio de 30,1%. Para os autores o baixo rendimento é consequência da alta geração de resíduos durante o desdobro das toras na serraria estudada.

Para a espécie *D. excelsa,* o estudo realizado por Tonini e Ferreira (2004) mostraram um rendimento de 66%, valor superior à média obtida pela mesma espécie avaliada neste estudo, que foi de 61,74%.

As diferenças encontradas no coeficiente de rendimento volumétrico provavelmente podem ser relacionadas à qualidade da matéria-prima, à espécie florestal, ao diâmetro das toras e à demanda dos clientes pelos diversos tipos de produtos gerados na serraria por cada espécie (Cavalcante e Silva, 2017; Nogueira e Evangelista, 2020; Parente *et al*., 2024).

Verificou-se na serraria estudada que o critério para a produção de produtos de madeira serrada, dependia diretamente do pedido feito pelos compradores da matéria prima. Os principais produtos gerados com o processamento das toras das espécies estudadas demonstraram diversificação, sendo identificados caibro, prancha, sarrafo, tábua, viga e vigota.

As espécies com maior variação desses produtos foram o *D. excelsa* e *D. odorata*, que apresentaram maior diversificação de produtos gerados, com 5 tipos de produtos. A espécie *M. elata*, apresentou 4 tipos de produtos gerados (Figura 4).

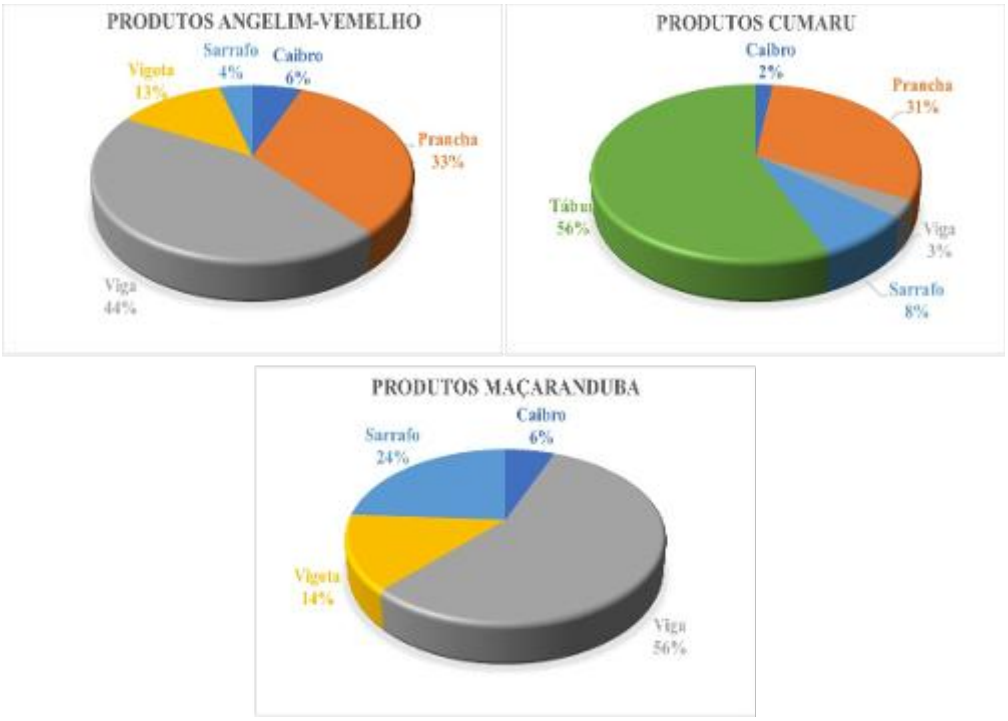


Figura 4 – Produtos resultantes do desdobramento das toras de três espécies florestais estudadas em uma serraria em Mazagão-Amapá.

Por outro lado, Melo *et al*. (2016) relatam que um alto valor de CRV obtido por uma espécie pode ser justificado pelo tipo de produto comercializado. Dessa forma, a tora gera menos produtos e, consequentemente, menor perda por serragem. Isso contrapõe o relatado por Cavalcante e Silva (2017), que concluíram que empresas que possuem maior diversificação nos produtos gerados podem otimizar o aproveitamento de uma peça de madeira, aumentando o rendimento, que se assim não fosse, seria descartado como resíduo.

Os estudos indicam que o rendimento das serrarias é influenciado por diversos aspectos, como: qualidade e diâmetro da tora, técnicas de desdobramento e operação dos equipamentos (Murara Junior, 2005), ausência de classificação das toras e definição de cortes, gerando baixo aproveitamento e excesso de resíduos (Garcia, 2013), qualidade, ausência de podridões (oco), além de fatores externos (conicidade, curvatura, achatamento) e internos (tensões de crescimento, rachaduras, excentricidade da medula) influenciam diretamente (Silva, 2010), bem como métodos de desdobro (Ferreira *et al*., 2004; Garcia, 2013; Marcellini, 2006).

4. Conclusões

Os resultados obtidos demonstraram que as três espécies avaliadas apresentaram bom aproveitamento da matéria-prima, com valores de Coeficiente de Rendimento Volumétrico (CRV) superiores aos 35% estabelecidos pela legislação vigente.

A média geral de rendimento foi de 50,14%. Sendo a espécie *Dinizia excelsa* a que apresentou o maior rendimento (61,74%) e superioridade estatística sobre *Dipteryx odorata* (44,38%) e *Manilkara elata* (44,31%)

O desdobro das toras possibilitou a obtenção de diferentes produtos de madeira serrada como caibros, pranchas, sarrafos, tábuas, vigas e vigotas. *D. excelsa* e *D. odorata* apresentaram maior diversificação dos produtos, enquanto *M. elata* apresentou menor variedade.

Esses resultados demonstram que o aproveitamento das toras não depende apenas da espécie e do seu aproveitamento em madeira serrada, e também da diversificação dos produtos obtidos durante o processamento.

5. Referências bibliográficas

Brasil. (2006). *Plano nacional de silvicultura com espécies nativas e sistemas agroflorestais – PENSAF*.

Brasil. (2016).Conselho Nacional do Meio Ambiente. (2016). *Resolução nº 474, de 6 de abril de 2016*. Diário Oficial da União.

Danielli, F. E., Gimenez, B. O., Oliveira, C. K. A., Santos, J., & Higuchi, N. (2016). Modelagem do rendimento no desdobro de toras de *Manilkara* spp. (Sapotaceae) em serraria na nova fronteira madeireira do estado de Roraima, Brasil. *Scientia Forestalis*, *44*(111), 641–651.

Ferreira, S.; Lima, J. T., Rosado, S. C. Silva.; Trugilho, P. F. 2 J. T.; (2004). Influência de métodos de desdobro tangenciais no rendimento e na qualidade da madeira de clones de Eucalyptus spp. Revista Cerne, Lavras, v. 10, n. 1, p. 10-21

Garcia, F. M. (2013). Rendimento operacional de uma serraria com a espécie cambará (Qualea albiflora Warm.) na região amazônica. 2013. 83 f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Botucatu, SP.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. (2020). *Cidades: Estimativa da população residente*.

Melo, R. M.; Rocha, M. J.; Rodolfo Junior, F.; Stangerlin. D. N. (2016). Análise da influência do diâmetro no rendimento em madeira serrada de cambará. Pesquisa Florestal Brasileira, v. 36, n. 88, p. 393- 398.

Murara Junior, M. I. (2005) Desdobro de toras de pinus utilizando diagramas de corte para diferentes classes diamétricas. 2005. 66 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba.

Nogueira, M. G., & Evangelista, W. V. (2020). Caracterização do perfil das serrarias do município de Juína. Em *Caracterização do perfil das serrarias do município de Juína* (1ª ed., pp. 73–99).

Parente, P. R. F., Amaro, M. A., Llima, Q. S., Lobão, M. S., Carvalho, C. A. (2024). Coeficiente de rendimento volumétrico para espécies madeireiras obtido em serrarias do Acre. Scientia Naturalis, v. 6, n. 2, p. 779-800, 2024.

Prediger, C. R. (2019). *Rendimento no desdobro de toras de Andira parviflora Ducke em serraria na Amazônia Central* (Dissertação de mestrado). Universidade Federal do Amazonas.

Queiroz, W. T. (1998). *Técnicas de amostragem em inventário florestal nos trópicos*. FICAP.

Ribeiro, E. S., et al. (2016). Espécies florestais comercializadas pelo estado de Mato Grosso. *Biodiversidade, 15*(2).

Romero, F. M. B., Jacovine, L. A. G., Morais Junior, V. T. M. de, Ferreira Neto, J. A., Ribeiro, S. C., & Fearnside, P. M. (2021). Coeficiente de rendimento volumétrico e de carbono de espécies florestais comerciais no Estado do Acre. Em R. J. de Oliveira (Ed.), *Silvicultura e manejo florestal: Técnicas de utilização e conservação da natureza* (Vol. 1, pp. 85–98). Editora Científica Digital.

Silva, J. G. M. (2010). Desempenho e amostragem do trabalho de uma serraria no município de Alegre, Espírito Santo. 2010. 62 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Industrial Madeireiro) – Universidade Federal do Espírito Santo, Jerônimo Monteiro.

Soares, C. P. B., Paula Neto, F. de, & Souza, A. L. (2011). Volumetria. Em *Dendrometria e inventário florestal* (2ª ed., cap. 4). Viçosa.

Tonini, H.; Ferreira, L. M. M. (2004) Rendimento em madeira serrada de cupiuba (*Goupia glabra*), caferana (*Erisma uncinatum*) e angelim-pedra (*Dinizia excelsa*). Comunicado Técnico 07, Boa Vista: Embrapa, nov. 2004.

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Resistência à Térmita em Elemento Estrutural Perpendicular

Nahanni Ramalah Caetano Paes[1]; Cleytom Machado Prata Filho[2]; Rafael Gonçalves Espósito Oliveira[3]; Juarez Benigno Paes[1]; Pedro Henrique Greggio Gava [1]; Fabricio Gomes Gonçalves[1]

[1] Universidade Federal do Espírito Santo (Ufes)
[2] Fields Engenharia
[3] Secretaria de Estado da Educação do Estado do Espírito Santo (Sedu)

Resumo: A pesquisa avaliou a resistência de quatro diferentes tipos de elementos estruturais colados de madeira de pinus e eucalipto ao ataque de térmitas de solo (*Nasutitermes corniger*), importante agente de degradação em regiões tropicais. O experimento laboratorial durou 120 dias, utilizando diferentes configurações estruturais, como vigas tipo "I", elementos maciços e madeira lamelada colada. A resistência foi determinada com base na perda de massa e dos danos causados, com base em avaliadores distintos e independentes (avaliação visual). Os resultados indicaram que o elemento composto por alma em OSL colada com adesivo fenol-formaldeído e mesa de eucalipto, apresentou o melhor desempenho, evidenciando que a combinação de eucalipto com adesivo fenol-formaldeído proporciona maior resistência ao ataque de térmitas em comparação aos demais tratamentos testados. Em contraste, estruturas com pinus apresentaram maior vulnerabilidade. Conclui-se que o uso dessa combinação é uma alternativa promissora para aplicações estruturais, proporcionando maior vida útil e desempenho na construção civil e na indústria madeireira.

Palavras-chave: Indústria madeireira; Tecnologia de produtos florestais; Agentes xilófagos.

Termite Resistance in Perpendicular Structural Element

Abstract: The study evaluated the resistance of four different types of glued structural elements made of pine and eucalyptus wood to attack by subterranean termites (*Nasutitermes corniger*), a major degradation agent in tropical regions. The laboratory experiment lasted 120 days and included different structural configurations, such as I-beams, solid elements, and glued laminated timber. Resistance was determined based on mass loss and the extent of damage, assessed by independent evaluators through visual analysis. The results indicated that the element composed of an OSL web bonded with phenol-formaldehyde adhesive and eucalyptus flanges showed the best performance, demonstrating that the combination of eucalyptus and phenol-formaldehyde adhesive provides greater resistance to termite attack compared to the other treatments tested. In contrast, structures made with pine showed higher vulnerability. It is concluded that this combination is a promising alternative for structural applications, offering greater service life and improved performance in construction and the timber industry.

Keywords: Timber industry; Forest products technology; Xylophagous agents.

1. Introdução

A madeira é amplamente utilizada devido às suas propriedades físicas, mecânicas e benefícios ambientais, destacando-se o potencial das madeiras de reflorestamento para o desenvolvimento de elementos estruturais mais eficientes, apesar das limitações de uso na construção civil brasileira relacionadas ao desconhecimento de sua resistência a organismos xilófagos (Päivinen et al., 2012; Pedreschi et al., 2005; Segundinho et al., 2021; Zenid, 2011). Nesse contexto, esta pesquisa avaliou, em laboratório, a resistência de elementos estruturais colados de pinus e eucalipto ao ataque de *Nasutitermes corniger*, principal agente de degradação da madeira em regiões tropicais (Afzal et al., 2019; Constantino & Acioli, 2005; Hadi et al., 2016). Os resultados indicaram melhor desempenho biológico dos tratamentos com madeira de eucalipto associada ao adesivo fenol-formaldeído, evidenciando efeito sinérgico entre o adesivo e as propriedades naturais do eucalipto (Almeida & Ferreira, 2021; Iwakiri et al., 2009). Assim, o uso desse adesivo, amplamente empregado pela indústria por seu desempenho e baixo custo, configura-se como estratégia eficaz para aumentar a durabilidade de materiais estruturais e subsidiar estudos sobre resistência biológica e composição da madeira (Dunky, 1998; Gonçalves et al., 2020; Katsukake, 2009).

Os painéis de madeira reconstituída, como MDF e MDP, possuem grande relevância na indústria da construção e do mobiliário devido às suas propriedades mecânicas, versatilidade e caráter sustentável, com o Brasil ocupando posição de destaque na produção mundial, especialmente a partir de florestas plantadas (IBÁ, 2025; Päivinen et al., 2012). Nesse contexto, o *Oriented Strand Lumber* (OSL) destaca-se como material estrutural para vigas e colunas, sendo amplamente empregado em sistemas pré-fabricados e modulares. Em relação a outros painéis, como OSB e LVL, o OSL apresenta aplicações específicas voltadas ao desempenho estrutural, combinando eficiência mecânica e sustentabilidade, cuja durabilidade depende da adequada escolha das espécies e de tratamentos contra organismos xilófagos (Cai & Ross, 2010; Chirasatitsin et al., 2005; Mendes Ferraz et al., 2009).

Mesmo com uma posição de destaque na produção global de painéis de madeira, o Brasil permanece inferior à países como a China, evidenciando a necessidade de ampliar a competitividade do setor (IBÁ, 2025). A concentração produtiva no Sul e os desafios logísticos reforçam a importância de investimentos em tecnologia, inovação e práticas sustentáveis para melhorar a qualidade e a durabilidade dos painéis e ampliar o acesso a mercados internacionais (Liucente, 2011; A. I. E. Oliveira, 2010; Päivinen et al., 2012). Nesse contexto, a deterioração por agentes xilófagos, especialmente térmitas subterrâneas, representa um entrave relevante,

tornando indispensável a adoção de estratégias preventivas para aumentar a durabilidade dos materiais e fortalecer a competitividade da indústria brasileira no cenário global (Afzal et al., 2019; Constantino & Acioli, 2005; IBÁ, 2025).

Painéis tipo OSL são amplamente utilizados como material estrutural na construção de prédios (componentes estruturais, como vigas, colunas e outros; substituindo ou complementando a madeira maciça e outros materiais de construção e ainda como reforço estrutural - reforçar estruturas existentes, proporcionando uma alternativa leve e resistente aos materiais convencionais (Cai & Ross, 2010; Chirasatitsin et al., 2005; Mendes Ferraz et al., 2009; Smith et al., 2003).

O *Oriented Strand Lumber* representa uma inovação significativa no campo dos materiais de construção, combinando sustentabilidade ambiental com desempenho estrutural avançado. Seu uso crescente na construção civil destaca a importância de desenvolver e adotar materiais que atendam às exigências técnicas e ambientais contemporâneas e com estudos, vigas em formato tipo ‘I’ de madeira têm sido cada vez mais consideradas devido às suas vantagens sustentáveis. A madeira apresenta certa leveza em comparação com outros materiais construtivos com facilidade no transporte, manuseio e instalação no local de construção (Smith et al., 2003) e quando na construção em elementos tipo viga “I” a forma construtiva pode indicar novos potenciais de uso.

2. Material e métodos

A etapa experimental foi conduzida no Laboratório de Biodeterioração e Proteção da Madeira e no Laboratório Multiusuário de Painéis, vinculados ao Departamento de Ciências Florestais e da Madeira da Universidade Federal do Espírito Santo. Os tratamentos, previamente submetidos a ensaios mecânicos em pesquisa de doutorado, tiveram amostras sem defeitos obtidas das extremidades dos corpos de prova de flexão estática para a realização dos ensaios com térmitas subterrâneas. As características dos tratamentos e as dimensões dos corpos de prova estão apresentadas na Tabela 1.

O ensaio de preferência alimentar com *Nasutitermes corniger* foi conduzido conforme metodologias consolidadas (Gonçalves et al., 2020; Lopes et al., 2017; Paes et al., 2007), utilizando seis corpos de prova por tratamento, dispostos em delineamento em blocos casualizados e teste de médias (F; Scott-Knott < 0,05), em caixa de fibrocimento (500 litros) com areia lavada, sendo a resistência dos materiais avaliada ao final segundo a norma AWPA E1-23 (AWPA, 2023).

Tabela 1 – Elementos estruturais ensaiados no teste de degradação pelas térmitas *Nasutitermes corniger*

Tratamento	Descrição	Dimensão do corpo de prova (mm) (altura × espessura × profundidade)
1	Viga tipo ‘I’ com mesa de Eucalipto	75 × 25 × 60 mm^3
2	Elemento cheio* com mesa de Eucalipto	80 × 25 × 60 mm^3
3	Madeira lamelada colada - Pinus	80 × 25 × 60 mm^3
4	Madeira lamelada colada - Eucalipto	80 × 25 × 60 mm^3
5	Viga tipo ‘I’ com mesa de Pinus	75 × 25 × 60 mm^3
6	Elemento cheio com mesa de Pinus	80 × 25 × 60 mm^3

* Elemento cheio: alma da viga preparada com partículas de pinus do tipo OSL (*Oriented Strand Lumber*) coladas com adesivo fenol formaldeído, utilizada também na alma da viga tipo ‘I’.

O ensaio de preferência alimentar com *Nasutitermes corniger* foi conduzido conforme metodologias consolidadas (Gonçalves et al., 2020; Lopes et al., 2017; Paes et al., 2007), utilizando seis corpos de prova por tratamento, dispostos em delineamento em blocos casualizados e teste de médias (F; Scott-Knott < 0,05), em caixa de fibrocimento (500 litros) com areia lavada, sendo a resistência dos materiais avaliada ao final segundo a norma AWPA E1-23 (AWPA, 2023).

A colônia, coletada no Horto Florestal da Universidade, foi mantida sob monitoramento diário no Laboratório de Biodeterioração e Proteção da Madeira, com a umidade da areia controlada por adições periódicas de água destilada, garantindo a viabilidade das térmitas ao longo do ensaio (Figura 1). Após 120 dias (em função dos corpos de prova serem maior do que a normalmente utilizada pelos autores citados acima, o tempo final do ensaio foi estendido), o experimento foi desfeito e os corpos de prova foram limpos e secos em estufa a 60 ± 2 °C até atingirem massa constante, permitindo a avaliação da perda de massa.

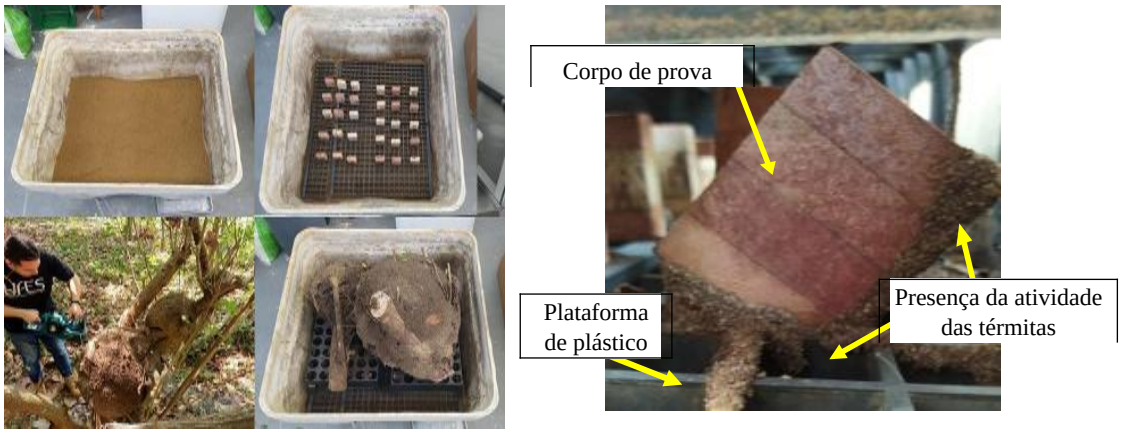


Figura 1 – Composição de montagem do ensaio e ação das térmitas nos corpos de prova.
Fonte: Os autores

3. Resultados e Discussão

Após a secagem, as massas dos corpos de prova antes e após a exposição às térmitas foram registradas para o cálculo da perda de massa, expressa em porcentagem e transformada pela equação arcsen [raiz quadrada (valor em porcentagem/100)] que gerou a tabela comparativa entre os corpos de prova após exposição às térmitas de solo (Tabela 2), foi realizada uma avaliação pelo método *Visual Damage Threshold* (VDT) (Tabela 3), com atribuição de notas por cinco avaliadores independentes, cujas médias por tratamento permitiram a comparação do ataque das térmitas aos diferentes elementos.

Tabela 2 – Perda de massa média e desgaste (nota) dos tratamentos avaliados

Tratamento*	Repetição	Massa inicial (g)	Massa final (g)	Perda de massa (g)	Perda de massa (%)
T1	1	62,001	61,726	0,275	0,448
	2	57,558	57,412	0,146	0,253
	3	59,920	52,547	7,373	12,305
	4	60,415	60,056	0,359	0,594
	5	59,876	48,613	11,264	18,812
T2	1	103,256	102,547	0,709	0,687
	2	102,056	101,161	0,896	0,878
	3	96,079	93,961	2,117	2,204
	4	99,542	99,082	0,460	0,463
	5	101,078	100,137	0,942	0,932
T3	1	66,952	64,552	2,400	3,585
	2	67,414	50,63	16,780	24,891
	3	62,382	57,163	5,218	8,365
	4	63,234	52,301	10,933	17,289

	5	63,742	58,331	5,411	8,488
T4	1	95,419	75,251	20,169	21,137
	2	95,101	77,116	17,985	18,911
	3	94,549	92,783	1,766	1,868
	4	94,444	90,184	4,260	4,511
	5	93,846	91,417	2,429	2,588
T5	1	49,518	40,536	8,982	18,139
	2	44,006	34,118	9,888	22,469
	3	44,407	35,382	9,026	20,326
	4	45,739	39,113	6,625	14,485
	5	49,015	42,795	6,220	12,691
T6	1	74,573	74,167	0,406	0,545
	2	81,603	74,367	7,236	8,868
	3	79,684	69,413	10,271	12,89
	4	79,915	69,158	10,757	13,461
	5	77,832	66,668	11,164	14,344

* T1: Viga tipo ‘I’ com mesa de Eucalipto; T2: Elemento cheio com mesa de Eucalipto; T3: Madeira lamelada colada – Pinus; T4: Madeira lamelada colada – Eucalipto; T5: Viga tipo ‘I’ com mesa de Pinus; T6: Elemento cheio com mesa de Pinus.

Tabela 3 – Tabela de avaliação pelo método do "Visual Damage Threshold" (VDT)

Tratamento	**Repetições**					**Média**
	1	**2**	**3**	**4**	**5**	
T1 - Viga tipo ‘I’ com mesa de Eucalipto	9,4	9,2	7,0	9,6	5,2	8,1
T2 - Elemento cheio com mesa de Eucalipto	9,8	9,8	8,4	9,8	8,4	9,2
T3 - Madeira lamelada colada – Pinus	8,0	3,4	4,0	4,0	5,2	4,9
T4 - Madeira lamelada colada – Eucalipto	3,6	3,8	8,6	9,0	9,2	6,8
T5 - Viga tipo ‘I’ com mesa de Pinus	5,0	3,0	2,6	3,0	4,2	3,6
T6 - Elemento cheio com mesa de Pinus	9,8	8,2	5,4	5,4	5,8	6,9

A Tabela 4 representa os resultados das médias da perda de massa para os tratamentos testados.

Tabela 4 – Tabela idealizada com base no método da perda de massa entre os tratamentos

Tratamento*	**Descrição**	**Perda de massa média (g)**	**Resultado do teste**	**CV (%)**
T1	Viga tipo ‘I’ com mesa de Eucalipto	3,882 (5,15)	a	81,31
T2	Elemento cheio com mesa de Eucalipto	1,026 (0,64)	b	
T3	Madeira lamelada colada – Pinus	8,148 (5,73)	a	
T4	Madeira lamelada colada –Eucalipto	9,322 (8,99)	a	
T5	Viga tipo ‘I’ com mesa de Pinus	8,150 (1,62)	a	
T6	Elemento cheio com mesa de Pinus	7,968 (4,50)	a	

* T1: Viga tipo ‘I’ com mesa de Eucalipto; T2: Elemento cheio com mesa de Eucalipto; T3: Madeira lamelada colada – Pinus; T4: Madeira lamelada colada – Eucalipto; T5: Viga tipo ‘I’ com mesa de Pinus; T6: Elemento cheio

com mesa de Pinus. Letras iguais na coluna não diferem entre si (Scott-Knott, p > 0,05). Entre parêntese é o desvio padrão. CV: Coeficiente de Variação

O mesmo teste foi repetido com a variável da nota realizada por meio de uma avaliação pelo método do "Visual Damage Threshold" (VDT) (Tabela 5).

Tabela 5 – Tabela idealizada pelo método do "Visual Damage Threshold" (VDT)

Tratamento	Descrição	Nota média atribuída
T1	Viga tipo 'I' com mesa de Eucalipto	8,08 (1,92) b
T2	Elemento cheio com mesa de Eucalipto	9,24 (0,77) b
T3	Madeira lamelada colada – Pinus	4,92 (1,84) a
T4	Madeira lamelada colada –Eucalipto	6,84 (2,88) b
T5	Viga tipo 'I' com mesa de Pinus	3,56 (1,00) a
T6	Elemento cheio com mesa de Pinus	6,92 (1,99) b

* Letras minúsculas iguais na vertical informa não significância (Scott-Knott, p < 0,05). Entre parêntese é o desvio padrão.

Os resultados indicam que maior resistência ao ataque de térmitas está associada à menor perda de massa e melhor avaliação visual dos corpos de prova, embora a elevada variabilidade dos dados explique a ausência de diferenças estatisticamente significativas na ANOVA (p > 0,05). A madeira de eucalipto associada ao adesivo fenol-formaldeído apresentou desempenho superior ao pinus, com destaque para o Tratamento 2, que apresentou menor perda de massa e maior rejeição pelas térmitas, evidenciando efeito sinérgico entre o adesivo e as propriedades naturais do eucalipto. Os tratamentos com eucalipto superaram aqueles à base de pinus, cujo pior desempenho foi observado no Tratamento 6. Esses achados confirmam a eficiência do uso de eucalipto com adesivo fenol-formaldeído na engenharia civil, devido à sua durabilidade e baixo custo, e reforçam a relevância de estudos sobre resistência biológica e composição dos materiais (Dunky, 1998; Gonçalves et al., 2020; Katsukake, 2009). Apesar de ter usado o mesmo adesivo, a construção com Pinus apresentou menor resistência ao ataque das térmitas, refletindo em notas de avaliação mais baixas. Esse resultado destaca a maior vulnerabilidade do Pinus à alimentação das térmitas, resultando em maior perda de massa e avaliações visuais menos favoráveis.

Além disso, os resultados oferecem uma base sólida para futuras pesquisas sobre como os compostos químicos, as propriedades estruturais e a resistência biológica interagem em materiais de construção. Pesquisas futuras podem explorar como diferentes concentrações de adesivo, diferentes espécies de eucalipto e condições ambientais variadas afetam a resistência

ao ataque de térmitas (Gonçalves et al., 2020). Considerar diferentes tipos de térmitas também pode oferecer uma visão mais completa da eficácia dos materiais.

4. Conclusão

Os elementos sólidos com mesa de eucalipto e com presença de fenol formaldeído apresentaram-se mais resistentes à ação das térmitas *Nasutitermes corniger*. Esse aumento de resistência se deve, em grande parte, à presença de fenol-formaldeído, que atua como barreira química, tornando o material menos atrativo e menos suscetível à degradação por insetos xilófagos.

A análise da resistência dos materiais baseou-se em dois parâmetros principais: a perda de massa e a avaliação visual dos danos, que emergem como indicadores críticos para a caracterização da durabilidade frente à ação de térmitas. A perda de massa reflete diretamente a degradação física, enquanto a avaliação visual permite uma análise mais qualitativa dos danos superficiais e estruturais. A correlação entre esses fatores evidencia a eficácia dos elementos tratados, revelando que a combinação de mesa de eucalipto e fenol-formaldeído confere ao material uma resiliência considerável. A partir desses resultados, conclui-se que a formulação de painéis de madeira com mesa de eucalipto e fenol-formaldeído pode ser uma alternativa viável para aplicações em ambientes suscetíveis à infestação por térmitas, contribuindo para o desenvolvimento de materiais com maior durabilidade e custo-benefício na indústria de móveis e construção civil.

5. Agradecimentos

Ao Laboratório Multiusuário de Painéis e ao Laboratório de Biodeterioração e Proteção da Madeira da Universidade Federal do Espírito Santo pela disponibilidade do espaço.

6. Referências bibliográficas

Afzal, I., Shinwari, Z. K., Sikandar, S., & Shahzad, S. (2019). Plant beneficial endophytic bacteria: Mechanisms, diversity, host range and genetic determinants. *Microbiological Research*, *221*, 36–49. https://doi.org/10.1016/j.micres.2019.02.001

Almeida, T. S., & Ferreira, H. M. (2021). Comparação entre o desempenho do Eucalipto e do pinus frente a agentes xilófagos. *Pesquisa Florestal Brasileira*, *15*(4), 467–480.

AWPA. (2023). *American Wood Protection Association E1-23: Laboratory methods for evaluating the termite resistance of wood-based materials: Choice and no-choice tests* (p. 10).

Cai, Z., & Ross, R. J. (2010). Mechanical properties of wood-based composite materials. In *Wood handbook: Wood as an engineering material* (Centennial, pp. 12.1-12.12.).

Department of Agriculture, Forest Service, Forest Producys Laboratory.

Chirasatitsin, S., Prasertsan, S., Wisutmethangoon, W., & Kyokong, B. (2005). Mechanical properties of rubberwood oriented strand lumber (OSL): The effect of strand length. *Songklanakarin Journal of Science and Technology*, *27*(5), 1047–1055.

Constantino, R., & Acioli, A. N. S. (2005). Termite diversity in Brazil (Insecta: Isoptera). In F. M. S. Moreira, J. O. Siqueira, & L. Brussaard (Eds.), *Soil Biodiversity in Amazonian and other Brazilian Ecosystems* (pp. 117–128). Cromwell Press.

Dunky, M. (1998). Urea–formaldehyde (UF) adhesive resins for wood. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, *18*(2), 95–107. https://doi.org/10.1016/S0143-7496(97)00054-7

Gonçalves, F. G., Paes, J. B., Segundinho, P. G. A., Chaves, I. L. S., Brito, A. S., Silva, E. S. G., Oliveira, R. G. E., Lopez, Y. M., & Jesus, F. Q. (2020). Ensaios de resistência à biodeterioração por fungos e térmitas em painéis de partículas. In R. J. Oliveira (Ed.), *Engenharia Florestal: Desafios, Limites e Potencialidade* (pp. 362–379). Editora Científica Digital. https://doi.org/10.37885/200700745

Hadi, Y. S., Massiaya, M. Y., & Ariana, A. (2016). Subterranean termite resistance of polystyrene-treated wood from three tropical wood species. *Insects*, *7*(3), 37. https://doi.org/https://doi.org/10.3390/insects7030037

IBÁ. (2025). *Indústria Brasileira de Árvores. Relatório Anual*. https://iba.org/wp-content/uploads/2025/10/IBA_relatorio_digital_POR.pdf

Iwakiri, S., Matos, J. L. M., Lima, A. J. M., Ferreira, É. S., Batista, D. C., & Romão, S. A. Â. (2009). Produção de painéis compensados de pinus tropicais colados com resina fenol-formaldeído. *FLORESTA*, *39*(3), 669–673. https://doi.org/10.5380/rf.v39i3.15365

Katsukake, A. (2009). *Uma revisão sobre a resina ureia-formaldeído (RUF) empregada na produção de painéis de madeira reconstituída*. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Química) - Universidade Estadual Paulista, Bauru, SP.

Liucente, A. R. (2011). *Dinâmica da inovação tecnológica no Brasil: estudo do segmento de máquinas e implementos agrícolas*. (Doutorado em Engenharia de Produção) - Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, SP.

Lopes, D. J. V., Paes, J. B., Jankowsky, I. P., Vidaurre, G. B., & Segundinho, P. G. A. (2017). Resistência biológica da madeira de eucalipto tratada com CCA-C a cupins subterrâneos em laboratório. *Scientia Forestalis*, *45*(115), 467–479. https://doi.org/10.18671/scifor.v45n115.05

Mendes Ferraz, J., Del Menezzi, Cláudio Henrique Soares; Teixeira, D. E., Arakaki Okino, E. Y., Souza, F., & Bravim, A. G. (2009). Propriedades de painéis de partículas laminadas paralelas utilizadas como alternativa à madeira maciça. *Cerne*, *15*(1), 67–74.

Oliveira, A. I. E. (2010). *Inovações tecnológicas como fator de competitividade para empresas de construção civil em Manaus*. (Mestrado em Engenharia de Produção) - Universidade Federal do Amazonas, Manaus, AM.

Paes, J. B., Melo, R. R., Lima, C. R., & Oliveira, E. (2007). Resistência natural de sete madeiras ao cupim subterrâneo (Nasutiternes corniger Motsch.) em ensaio de preferência alimentar. *Revista Brasileira de Ciências Agrárias - Brazilian Journal of Agricultural Sciences*, *2*(1), 57–62. https://doi.org/10.5039/agraria.v2i1a1885

Päivinen, R., Lindner, M., Rosén, K., & Lexer, M. J. (2012). A concept for assessing sustainability impacts of forestry-wood chains. *European Journal of Forest Research*, *131*(1), 7–19. https://doi.org/10.1007/s10342-010-0446-4

Pedreschi, R., Gomes, F. C., & Mendes, L. M. (2005). Avaliação do desempenho da madeira na habitação utilizando abordagens de sistemas. *Cerne*, *11*(3), 283–293.

Segundinho, P. G. A., Oliveira, Rafael Gonçalves Espósito Gonçalves, F. G., Lopes, N. F., Alves, R. C., & Azevedo, M. S. (2021). Avaliação da madeira do híbrido de *Eucalyptus*

grandis × *Eucalyptus urophylla* para utilização em madeira lamelada colada. *Matéria*, *26*(3), e13030. https://doi.org/10.1590/s1517-707620210003.13030

Smith, I., Landis, E., & Gong, M. (2003). *Fracture and Fatigue in Wood*. John Wiley & Sons Ltda.

Zenid, J. G. (2011). *Madeira na construção civil*. Instituto de Pesquisas Tecnológicas.

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Resistência ao fogo e alterações colorimétricas da madeira de teca submetida a diferentes modificações químicas

Amalia Toledo Ferreira[1]; Maria Eduarda Gollo Marques[1]; Luan Alexsander Oliveira[1]; Liliane Catarina Pereira[1]; Eraldo Antonio Bonfatti Júnior[1,2]

[1] Universidade Estadual Paulista, Botucatu, SP
[2] Universidade Estadual do Centro-Oeste, Irati, PR

Resumo: A modificação química da madeira representa uma alternativa promissora para aumentar sua segurança em aplicações sujeitas à ação do fogo, podendo ainda provocar alterações perceptíveis em suas características colorimétricas. Este estudo avaliou o efeito da acetilação e dos tratamentos com Osmoguard®, ácido bórico e ácido fosfórico sobre a cor e o comportamento ao fogo da madeira de *Tectona grandis*. Foram determinados os parâmetros colorimétricos do sistema CIELAB (L*, a*, b*, C* e h°), bem como as diferenças de cor ΔE_{76} e ΔE_{2000}. O desempenho ao fogo foi avaliado por meio do tempo de ignição, tempo de chama, tempo de brasa e perda de massa após combustão. Os dados foram submetidos à análise de variância e as médias comparadas pelo teste de Tukey (α = 0,05). O tratamento com Osmoguard® promoveu o maior escurecimento da madeira, reduzindo significativamente a luminosidade e produzindo os maiores valores de ΔE. Além disso, apresentou o melhor desempenho frente ao fogo, aumentando o tempo de ignição, reduzindo o tempo de chama, eliminando a fase de brasa e diminuindo a perda de massa em relação à testemunha. O tratamento com ácido fosfórico também reduziu significativamente a perda de massa e o tempo de chama, enquanto a acetilação promoveu alterações intermediárias. O ácido bórico apresentou desempenho inferior aos demais tratamentos químicos avaliados. Os resultados demonstram que determinados tratamentos químicos podem melhorar simultaneamente a resistência ao fogo e modificar a aparência da madeira, evidenciando o potencial da colorimetria como ferramenta complementar na avaliação de madeiras modificadas.

Palavras-chave: Retardantes de chama; CIELAB; *Tectona grandis*.

Fire resistance and colorimetric changes of teak wood subjected to different chemical modifications

Abstract: Chemical modification of wood represents a promising alternative for enhancing safety in fire-prone applications, while also potentially causing noticeable changes in colorimetric characteristics. This study evaluated the effect of acetylation and treatments with Osmoguard®, boric acid, and phosphoric acid on the color and fire behavior of *Tectona grandis* wood. Colorimetric parameters from the CIELAB system (L*, a*, b*, C*, and h°) were determined, as well as color differences (ΔE_{76} and ΔE_{2000}). Fire performance was assessed based on ignition time, flame time, glowing time, and mass loss after combustion. Data were subjected to analysis of variance, and means were compared using Tukey's test (α = 0.05). Treatment with Osmoguard® caused the greatest darkening of the wood, significantly reducing lightness and yielding the highest ΔE values. Furthermore, it demonstrated the best fire performance, increasing ignition time, reducing flame time, eliminating the glowing phase, and decreasing mass loss compared to the control. Phosphoric acid treatment also significantly reduced mass loss and flame time, whereas acetylation resulted in intermediate changes. Boric acid showed inferior performance compared to the other chemical treatments evaluated. The

results demonstrate that certain chemical treatments can simultaneously improve fire resistance and alter wood appearance, highlighting the potential of colorimetry as a complementary tool for evaluating modified wood.

Keywords: Flame retardants; CIELAB, *Tectona grandis*.

1. Introdução

A madeira é um dos principais materiais renováveis empregados na construção civil, na indústria moveleira e na fabricação de produtos de maior valor agregado devido à elevada relação resistência/peso, facilidade de processamento, baixa energia incorporada e capacidade de armazenamento de carbono (Ramage et al., 2017). Entretanto, sua natureza lignocelulósica confere elevada higroscopicidade, instabilidade dimensional, suscetibilidade à biodeterioração e inflamabilidade, limitando seu emprego em aplicações que exigem maior durabilidade e segurança (Hill, 2006; Sandberg et al., 2017). Nesse contexto, o desenvolvimento de tecnologias de modificação da madeira tem ampliado significativamente seu potencial de utilização, promovendo melhorias permanentes em suas propriedades sem comprometer suas vantagens ambientais (Sandberg et al., 2017).

A modificação química destaca-se entre essas tecnologias por promover reações entre agentes modificadores e grupos hidroxila presentes nos polímeros da parede celular, reduzindo a afinidade da madeira pela água e melhorando sua estabilidade dimensional, durabilidade e desempenho tecnológico (Rowell, 1983; Hill, 2006). Processos como a acetilação representam tecnologias consolidadas, enquanto tratamentos à base de compostos de fósforo e boro têm recebido crescente atenção devido à capacidade de favorecer a formação de carvão, reduzir a liberação de gases inflamáveis e retardar a propagação das chamas (Sandberg et al., 2017; Mendis et al., 2023; Lowden & Hull, 2013).

O comportamento da madeira frente ao fogo está diretamente relacionado à degradação térmica de seus constituintes químicos. Durante a combustão, a decomposição de hemiceluloses, celulose e lignina libera compostos voláteis inflamáveis que sustentam as chamas, de modo que tratamentos capazes de alterar essas reações podem aumentar o tempo de ignição, reduzir a propagação da chama e diminuir a perda de massa (White & Dietenberger, 2010; Lowden & Hull, 2013).

Além das alterações no comportamento térmico, modificações químicas frequentemente provocam mudanças na aparência da madeira. A colorimetria, baseada no sistema CIELAB,

constitui uma técnica rápida, objetiva e não destrutiva para quantificar essas alterações por meio dos parâmetros L*, a*, b*, C*, h°, ΔE_{76} e ΔE_{2000}. Essa ferramenta tem sido amplamente utilizada na identificação de espécies, avaliação de tratamentos térmicos, degradação por intemperismo, biodeterioração e processos de modificação química, apresentando elevada sensibilidade às alterações químicas da parede celular (Esteves et al., 2008; Cademartori et al., 2013; Bonfatti Júnior et al., 2018).

Embora alterações colorimétricas estejam frequentemente associadas a mudanças na composição química da madeira, sua relação com o desempenho durante a combustão ainda permanece pouco explorada. Revisões recentes destacam a necessidade de ampliar o uso da colorimetria na avaliação de processos de modificação química e preservação, indicando seu potencial como ferramenta auxiliar na caracterização tecnológica da madeira (Bonfatti Júnior et al., 2018). Paralelamente, estudos anteriores demonstraram que tratamentos à base de taninos, retardantes comerciais e formulações híbridas podem modificar simultaneamente a coloração da madeira e seu comportamento frente ao fogo, sugerindo que diferentes mecanismos de modificação química produzem respostas distintas em função do tratamento empregado (Bonfatti Júnior et al., 2024; Bonfatti Júnior et al., 2025).

Diante desse contexto, o presente trabalho teve como objetivo avaliar os efeitos da acetilação e dos tratamentos com Osmoguard®, ácido bórico e ácido fosfórico sobre as propriedades colorimétricas e o desempenho ao fogo da madeira de *Tectona grandis*, buscando verificar se as alterações colorimétricas podem atuar como indicadores das modificações químicas associadas ao aumento da resistência ao fogo.

2. Material e métodos

Foram utilizadas amostras de madeira de teca (*Tectona grandis* L.f.) provenientes de plantios comerciais localizados no município de Cuiabá, Mato Grosso, Brasil. Os corpos de prova foram confeccionados com dimensões de 25 × 25 × 50 mm (transversal × radial × longitudinal), secos em estufa até massa constante e mantidos em estado anidro durante todos os tratamentos e ensaios.

Os corpos de prova foram distribuídos em cinco tratamentos: testemunha (madeira sem tratamento), acetilação, Osmoguard®, ácido bórico e ácido fosfórico. Todos os tratamentos químicos foram realizados por impregnação sob vácuo (−90 kPa) durante 2 h, mantendo-se as amostras completamente imersas nas respectivas soluções. A acetilação foi conduzida utilizando solução composta por 90% (v/v) de anidrido acético e 10% (v/v) de ácido acético,

sem adição de água. Após a impregnação, as amostras permaneceram imersas na solução reacional e foram submetidas à reação em estufa a 100 °C durante 2 h. Posteriormente, os corpos de prova foram novamente secos até massa constante. O tratamento com Osmoguard® foi realizado utilizando o produto comercial em sua formulação original, sem diluição. Os tratamentos com ácido bórico e ácido fosfórico foram conduzidos utilizando soluções aquosas a 1%, preparadas, respectivamente, em concentração massa/volume (m/v) e volume/volume (v/v). O ganho percentual de massa (Weight Percentage Gain – WPG) das amostras acetiladas foi determinado a partir da diferença entre a massa anidra inicial e final das amostras (Hill, 2006; Sandberg et al., 2017).

A caracterização colorimétrica foi realizada por meio do processamento digital de imagens obtidas com um iPhone 12 (Apple Inc., Cupertino, CA, EUA). As fotografias foram adquiridas a aproximadamente 15 cm da superfície da madeira, sobre fundo branco e sob iluminação difusa, mantendo-se a câmera perpendicular às amostras. O processamento das imagens foi realizado no Python 3.10, utilizando as bibliotecas Pillow, NumPy e scikit-image, conforme metodologia adaptada de Bednarczuk et al. (2025). Inicialmente, realizou-se a segmentação da superfície da madeira para eliminação do fundo e de sombras adjacentes, seguida da seleção de uma região central de interesse (ROI). Os valores médios de RGB foram convertidos para o sistema CIELAB (iluminante D65), sendo determinados os parâmetros L*, a*, b*, C* e h°, além das diferenças totais de cor ΔE_{76} e ΔE_{2000}, calculadas em relação à média das amostras testemunha.

O comportamento frente ao fogo foi avaliado reproduzindo a metodologia proposta por Tondi et al. (2012). Os ensaios foram conduzidos em capela de exaustão com vazão constante de 6 m^3 min^{-1}. Os corpos de prova, em estado anidro, foram posicionados de modo que a face longitudinal tangencial permanecesse voltada para uma chama 100% oxidante, produzida por um bico de Bunsen, sendo expostos durante 120 s. Foram determinados o tempo de ignição (s), o tempo de chama (s), o tempo de brasa (s) e a perda de massa (%), calculada pela diferença entre a massa anidra inicial e final dos corpos de prova.

O experimento foi conduzido em delineamento inteiramente casualizado, com cinco tratamentos e cinco repetições para as variáveis de resistência ao fogo e quinze repetições para as avaliações colorimétricas e de variação de massa. Os pressupostos da análise de variância foram verificados pelos testes de Shapiro–Wilk (normalidade dos resíduos) e Levene (homogeneidade das variâncias). Quando necessário, os dados foram submetidos à transformação logarítmica $\log^{10}(x)$. As variáveis que atenderam aos pressupostos foram

submetidas à análise de variância (ANOVA), sendo as médias comparadas pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. A variável tempo de brasa foi apresentada apenas de forma descritiva, em razão da ausência de variabilidade em três tratamentos. Todas as análises foram realizadas no software R (R Core Team, 2025).

3. Resultados e discussão

Os parâmetros colorimétricos da madeira de *Tectona grandis* foram significativamente influenciados pelos tratamentos químicos (Tabela 1). Alterações foram observadas em todos os parâmetros do sistema CIELAB, mostrando que as diferentes estratégias de modificação promoveram mudanças distintas na aparência da madeira.

Tabela 1 – Propriedades colorimétricas da madeira de *Tectona grandis* submetida a diferentes modificações químicas

Tratamento	L*	a*	b*	C*	hº
Testemunha	52,60(17,7)a	0,64(320,3)b	32,08(6,0)ab	32,14(6,0)ab	88,99(4,1)a
Osmoguard®	10,58(38,2)c	1,68(110,7)b	8,02(35,9)c	8,28(38,0)c	79,99(11,4)ab
Ácido bórico	43,34(23,6)a	3,74(68,2)ab	34,36(5,1)a	34,63(5,7)a	83,96(4,7)ab
Ácido fosfórico	39,96(14,8)ab	5,70(15,6)a	35,54(9,8)a	36,00(9,9)a	80,91(1,1)ab
Acetilação	27,35(16,8)b	6,35(12,8)a	28,43(9,3)b	29,15(8,8)b	77,32(2,6)b

Os valores correspondem às médias, seguidas do coeficiente de variação (CV, %) entre parênteses. Médias seguidas pela mesma letra na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$). L* = luminosidade; a* = coordenada verde–vermelho; b* = coordenada azul–amarelo; C* = croma; h° = ângulo de matiz.

O tratamento com Osmoguard® promoveu o maior escurecimento da madeira, destacado pela redução significativa da luminosidade (L*), enquanto a acetilação apresentou efeito intermediário. Em contraste, os tratamentos com ácido bórico e ácido fosfórico preservaram valores de L* mais próximos aos da testemunha. A acetilação e o ácido fosfórico proporcionaram os maiores valores de a*, indicando tendência ao avermelhamento da madeira, enquanto o Osmoguard® reduziu significativamente os parâmetros b* e C*, resultando em menor saturação da cor. Alterações nos parâmetros colorimétricos refletem modificações químicas na parede celular e têm sido associadas à degradação de hemiceluloses, transformações da lignina e modificações de extrativos decorrentes dos tratamentos químicos (Cademartori et al., 2013; Bonfatti Júnior & Lengowski, 2018). Os índices de diferença total de cor (ΔE_{76} e ΔE_{2000}), apresentados na Figura 1, sintetizam essas alterações e permitem comparar a intensidade das modificações promovidas pelos diferentes tratamentos.

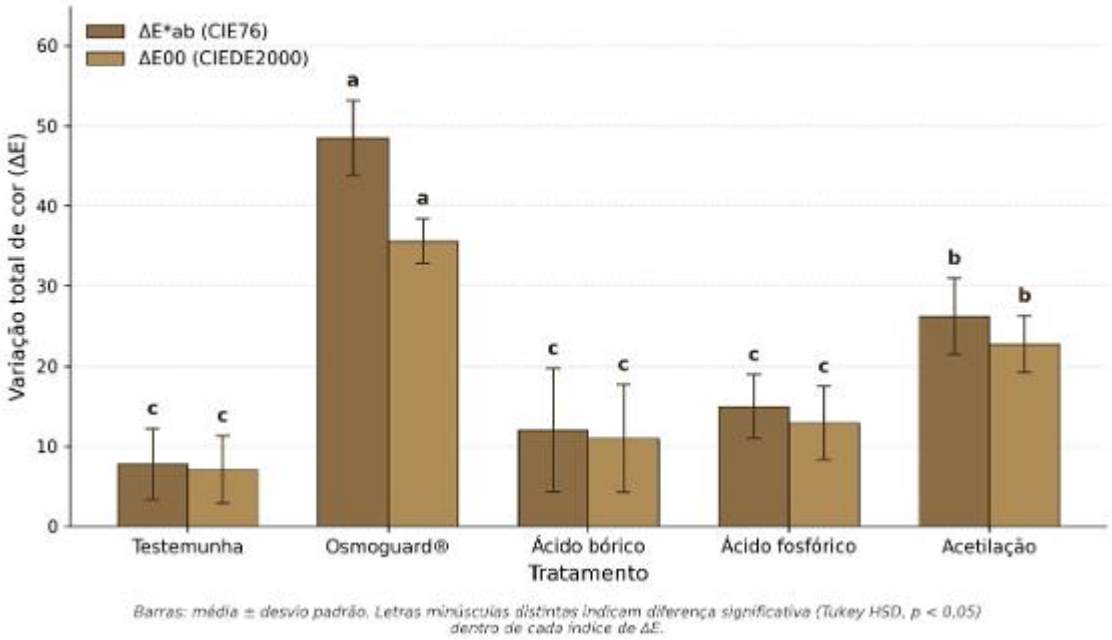


Figura 1 – Variação de cor da madeira em função dos tratamentos em relação à testemunha

Há três grupos estatisticamente distintos (Tukey, p<0,05), coerentes entre os índices CIE76 e CIEDE2000. O Osmoguard® apresentou a maior alteração cromática (ΔE2000=35,6), associada ao intenso escurecimento (L*=10,58), característico de preservantes com ação de mascaramento/impregnação de material corante (Bonfatti Júnior et al., 2024). A acetilação ocupou posição intermediária (ΔE2000=22,8), refletindo alterações superficiais decorrentes da modificação química da parede celular e da leve degradação térmica inerente ao processo. Já os tratamentos com ácido bórico e ácido fosfórico não diferiram estatisticamente da testemunha (ΔE2000=11,0 e 12,9, respectivamente), indicando preservação da aparência natural da madeira, o que reforça seu potencial como alternativas de baixo impacto estético frente a preservantes convencionais.

O ganho percentual de massa diferiu significativamente entre os tratamentos (Figura 1). A acetilação e o Osmoguard® apresentaram os maiores valores de WPG, indicando maior incorporação de reagentes à estrutura da madeira. Esse comportamento está associado, no caso da acetilação, à reação do anidrido acético com os grupos hidroxila da parede celular, resultando na formação de grupos acetila e consequente aumento da massa da madeira (Hill, 2006; Sandberg et al., 2017). Por outro lado, os baixos valores observados para os tratamentos com ácido bórico e ácido fosfórico refletem as baixas concentrações empregadas (1%), resultando em menor retenção de sólidos. A maior incorporação de reagentes observada para a acetilação e o Osmoguard® sugere modificações químicas mais intensas da parede celular, condição que

pode explicar tanto as alterações colorimétricas quanto o desempenho diferenciado desses tratamentos nos ensaios de inflamabilidade.

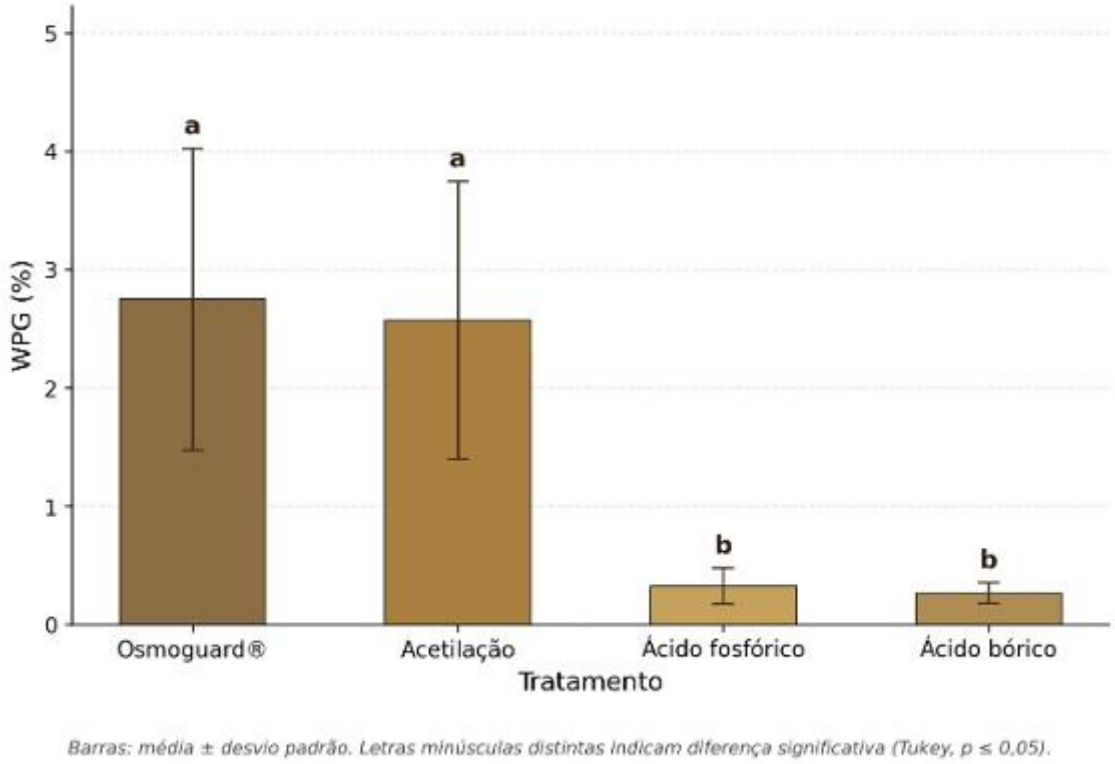


Figura 2 – Ganho percentual de massa (WPG) da madeira de *Tectona grandis* submetida a diferentes modificações químicas

Os resultados do ensaio de inflamabilidade da madeira de *Tectona grandis* submetida aos diferentes tratamentos químicos são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 – Desempenho da madeira de *Tectona grandis* submetida a diferentes modificações químicas no ensaio de inflamabilidade

Tratamento	Ignição (s)	Chama (s)	Brasa (s)	Perda de massa (%)
Testemunha	11,66(10,8)b	429,68(6,3)a	298,53(52,1)	57,72(6,6)a
Osmoguard®	17,03(21,6)a	266,49(31,0)c		38,83(8,2)c
Ácido bórico	5,25(25,4)c	430,53(8,7)a	131,88(24,0)	49,04(8,2)b
Ácido fosfórico	7,02(11,7)c	379,96(7,4)b	0,00 (0,0)	48,11(4,0)b
Acetilação	5,25(12,6)c	263,28(14,4)c	0,00 (0,0)	35,40(5,1)c

Os valores correspondem às médias, seguidas do coeficiente de variação (CV, %) entre parênteses. Médias seguidas pela mesma letra na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$).

O Osmoguard® apresentou o maior tempo de ignição, indicando maior resistência ao início da combustão sob exposição contínua à chama. Além disso, esse tratamento promoveu redução significativa do tempo de chama e da perda de massa, em linha com a elevada eficiência na proteção térmica da madeira. O ácido fosfórico também reduziu significativamente o tempo

de chama e a perda de massa, embora não tenha aumentado o tempo de ignição, sugerindo que sua atuação ocorre principalmente nas etapas posteriores da combustão. A acetilação apresentou efeito intermediário, reduzindo apenas a perda de massa, enquanto o ácido bórico reduziu simultaneamente o tempo de chama e a perda de massa. A ausência de combustão em brasa nos tratamentos com Osmoguard®, ácido bórico e ácido fosfórico reforça a capacidade desses tratamentos em interromper a combustão residual após a retirada da fonte de calor.

Compostos à base de boro são reconhecidos por favorecerem a formação de uma camada carbonizada protetora e reduzirem a liberação de gases combustíveis durante a degradação térmica da madeira, contribuindo para a diminuição da intensidade da combustão (Tondi et al., 2012). Da mesma forma, estudos recentes demonstram que a eficiência de tratamentos retardantes depende da quantidade de reagente efetivamente incorporada ao substrato, sendo a baixa retenção um dos principais fatores limitantes para o desempenho frente ao fogo (Bednarczuk et al., 2025). Esse comportamento corrobora os resultados obtidos neste estudo, no qual o Osmoguard®, além de apresentar um dos maiores ganhos percentuais de massa, também proporcionou o melhor desempenho no ensaio de inflamabilidade (Bonfatti Júnior et al., 2025). Logo, a maior incorporação de reagentes à estrutura da madeira provávelmente contribuiu para aumentar sua resistência à combustão, reduzindo a propagação das chamas e a degradação térmica do material.

4. Conclusões

Os tratamentos químicos promoveram alterações significativas nas propriedades colorimétricas e no comportamento frente ao fogo da madeira de Tectona grandis. O Osmoguard® destacou-se por proporcionar maior ganho de massa, maior tempo de ignição e menores valores de tempo de chama e perda de massa, enquanto o ácido fosfórico apresentou desempenho semelhante na redução da combustão, apesar da baixa incorporação de reagente. As modificações químicas também resultaram em alterações mensuráveis nos parâmetros colorimétricos, relacionando a resposta da cor com o tratamento empregado. Em conjunto, os resultados indicam que a análise colorimétrica constitui uma ferramenta promissora para o monitoramento de modificações químicas da madeira, podendo auxiliar na avaliação indireta de tratamentos voltados ao aumento da resistência ao fogo.

5. Agradecimentos

Os autores agradecem à Montana Química S.A. pela doação do produto Osmoguard®, utilizado na realização dos tratamentos químicos deste estudo.

6. Referências bibliográficas

Bonfatti Júnior, E. A., Barros, J. M. R., Silva, G. F., & Lengowski, E. C. (2024). A comparative analysis of tannin and commercial fire retardants in wood fire protection. Forests, 15(6), 951. https://doi.org/10.3390/f15060951

Bonfatti Júnior, E. A., & Lengowski, E. C. (2018). Colorimetria aplicada à ciência e tecnologia da madeira. Pesquisa Florestal Brasileira, 38, e201601394. https://doi.org/10.4336/2018.pfb.38e201601394

Bednarczuk, E., Hillig, É., Bonfatti Júnior, E. A., Ferro, F. S., & Miranda, G. M. (2025). Exploring non-pressure methods for plywood protection: Efficacy of tannin and copper chromium boron in fungal resistance and flame retardancy. Wood Material Science & Engineering. https://doi.org/10.1080/17480272.2025.2575934

Cademartori, P. H. G., Schneid, E., Gatto, D. A., Stangerlin, D. M., & Beltrame, R. (2013). Thermal modification of *Eucalyptus grandis* wood: Variation of colorimetric parameters. Maderas. Ciencia y Tecnología, 15(1), 57–64. https://doi.org/10.4067/S0718-221X2013005000005

Esteves, B., Domingos, I., & Pereira, H. (2008). Heat-induced colour changes of pine (*Pinus pinaster*) and eucalyptus (*Eucalyptus globulus*) wood. Wood Science and Technology, 42(5), 369–384. https://doi.org/10.1007/s00226-008-0182-6

Hill, C. A. S. (2006). Wood modification: Chemical, thermal and other processes. John Wiley & Sons.

Lowden, L. A., & Hull, T. R. (2013). Flammability behaviour of wood and a review of the methods for its reduction. Fire Science Reviews, 2(1), 4. https://doi.org/10.1186/2193-0414-2-4

Mendis, M. S., Ishani, P. A. U., & Halwatura, R. U. (2023). Impacts of chemical modification of wood on water absorption: A review. Journal of the Indian Academy of Wood Science, 20(1), 73–88. https://doi.org/10.1007/s13196-023-00309-y

R Core Team. (2025). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing. https://www.R-project.org/

Ramage, M. H., Burridge, H., Busse-Wicher, M., Fereday, G., Reynolds, T., Shah, D. U., Wu, G., Yu, L., Fleming, P., Densley-Tingley, D., Allwood, J., Dupree, P., Linden, P. F., &

Scherman, O. (2017). The wood from the trees: The use of timber in construction. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 68, 333–359. https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.09.107

Rowell, R. M. (1983). Chemical modification of wood. Forest Products Abstracts, 6(12), 363–382.

Sandberg, D., Kutnar, A., & Mantanis, G. (2017). Wood modification technologies: A review. iForest – Biogeosciences and Forestry, 10(6), 895–908. https://doi.org/10.3832/ifor2380-010

White, R. H., & Dietenberger, M. A. (2010). Wood products: Thermal degradation and fire. Em R. J. Ross (Ed.), Wood handbook: Wood as an engineering material (Chap. 18). USDA Forest Service, Forest Products Laboratory.

TONDI, G., WIELAND, S., WIMMER, T., THEVENON, M. F., PIZZI, A., & PETUTSCHNIGG, A. (2012). Tannin-boron preservatives for wood buildings: Mechanical and fire properties. European Journal of Wood and Wood Products, 70(5), 689–696. https://doi.org/10.1007/s00107-012-0614-3

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Resistência biológica e alterações colorimétricas da madeira de *Eucalyptus cloeziana* tratada com CCA

Caroline Palacio de Araujo[1]; Juarez Benigno Paes[1]; Emanuel Bizareli de Moraes[1]; Kamilly da Silva Pereira[1]; Damielle Leite Figueiredo[1]; Marcus Paulo Delunardo Montibeller de Castro[1]

[1] Universidade Federal do Espírito Santo – UFES.

Resumo: O arseniato de cobre cromatado (CCA) protege a madeira contra organismos xilófagos. Assim, objetivou-se analisar a resistência biológica e a colorimetria da madeira de *Eucalyptus cloeziana* tratada e não tratada com CCA. Testaram-se três fungos, em delineamento experimental em blocos casualizados, com dois tratamentos (madeira tratada e não tratada) e 10 repetições por tratamento. Analisaram-se a perda de massa e a colorimetria pelo sistema CIE *L*a*b**. A maior perda de massa foi observada para os fungos *Antrodia xantha* e *Wolfiporia cocos* na ausência de CCA. Para o fungo *Fibroporia radiculosa*, ocorreu na madeira tratada com CCA. O fungo *A. xantha* causou clareamento da superfície da madeira tratada com CCA, enquanto para o fungo *F. radiculosa* houve o escurecimento. O fungo *W. cocos* causou deterioração > 30% e resistência moderada da madeira. A resistência biológica e os parâmetros de cor da madeira de *E. cloeziana*, tratada e não tratada com CCA, variou conforme espécie fúngica.

Palavras-chave: Podridão parda; Fungos apodrecedores; Biodeterioração.

Biological durability and colorimetric changes in CCA-treated *Eucalyptus cloeziana* wood

Abstract: Chromated copper arsenate (CCA) protects wood against xylophagous organisms. Therefore, this study aimed to evaluate the biological resistance and colorimetric properties of CCA-treated and untreated *Eucalyptus cloeziana* wood. Three fungi were tested in a randomized complete block design with two treatments (treated and untreated wood) and 10 replicates per treatment. Mass loss and colorimetric parameters were evaluated using the CIE *L*a*b** system. The highest mass losses caused by *Antrodia xantha* and *Wolfiporia cocos* were observed in untreated wood. In contrast, the highest mass loss caused by *Fibroporia radiculosa* occurred in CCA-treated wood. *A. xantha* caused a lighter surface coloration in CCA-treated wood, whereas *F. radiculosa* caused surface darkening. *W. cocos* resulted in wood deterioration > 30%, classifying the wood as moderately resistant. The biological resistance and colorimetric parameters of CCA-treated and untreated *E. cloeziana* wood varied according to the fungal species.

Keywords: Brown-rot fungi; Wood decay fungi; Biodeterioration.

1. Introdução

A expansão do setor de árvores cultivadas para fins industriais alcançou 10,52 milhões de hectares em 2024. Dessa totalidade, 8,1 milhões de hectares correspondem a plantios de eucalipto, conforme dados apresentados pela Indústria brasileira de Árvores – IBÁ (2025), acarretando na exportação de celulose, papel, pisos e painéis. Algumas espécies de eucalipto, como o *E. cloeziana*, também é muito utilizada na produção de mourões de cercas, tornando necessário a utilização de tratamentos preservativos no aumento da resistência biológica pelo contato direto com o solo e a condições adversas (Brito et al., 2022).

A constituição química da madeira a torna susceptível a fungos apodrecedores, os quais degradam os componentes estruturais (lignina, celulose e hemicelulose) da parede celular, favorecendo o subsequente estabelecimento da microbiota comumente associada à madeira em decomposição (Tláskal et al., 2021). Fungos decompositores da madeira são denominados em detrimento do tipo de decomposição que causam, podendo ser classificados como fungos de podridão branca, parda e mole. A intensidade do ataque varia conforme as propriedades da madeira e fatores como umidade, temperatura e disponibilidade de oxigênio (Martín & López, 2023; Röllig et al., 2025).

Fungos de podridão branca possuem um versátil arsenal enzimático capaz de degradar polissacarídeos e lignina (Leonowicz et al., 1999). Os fungos de podridão parda metabolizam polissacarídeos da parede celular, não havendo enzimas envolvidas na degradação da lignina, sendo relatado por alguns autores que no seu processo evolutivo houve a perda do aparato enzimático responsável pela degradação da lignina visando estabelecer mecanismos com um menor gasto energético (Goodell et al., 2008; Eastwood et al., 2011). Já os fungos de podridão mole são capazes de metabolizar polissacarídeos de parede celular e lignina, sendo adaptados a ambientes pouco oxigenados, diferente dos fungos de podridão branca e parda (Martín & López, 2023).

Diante da suscetibilidade da madeira de eucalipto ao ataque de fungos apodrecedores, é necessário avaliar a eficácia dos tratamentos preservativos na proteção e qualidade da madeira. O arseniato de cobre cromatado (CCA) é um preservativo de madeira amplamente utilizado no Brasil no tratamento de eucalipto, principalmente, quando expostas a ambientes externos, o qual é constituído por cromo (47,5%), cobre (18,5%) e arsênio (34,0%) (Morais et al., 2021; Brito et al., 2022). O cromo atua como fixador dos outros componentes na madeira, ligando-se as moléculas de lignina e celulose. O cobre possui ação fungicida e bactericida, e o arsênio, inseticida (Morais et al., 2021).

Diante disso, objetivou-se analisar a resistência biológica a fungos apodrecedores e os parâmetros colorimétricos da madeira de *E. cloeziana*, com presença e ausência de CCA.

2. Material e métodos

Ensaio com fungos apodrecedores

Para o ensaio de resistência biológica a fungos de podridão parda foram utilizados mourões de *E. cloeziana*, tratados e não tratados (controle), com arseniato de cobre cromatado (CCA). Os mourões tratados com CCA foram adquiridos no município de Jerônimo Monteiro, Espírito Santo, Brasil. De acordo com as especificações do fornecedor, o tratamento com CCA foi realizado pelo método Bethell (célula cheia), com solução de ≈ 2% de ingredientes ativos (i.a.), retenção de 6,5 kg i.a. m^{-3} e penetração total no alburno, em conformidade com as Normas Brasileiras - NBR 9480 e NBR 6232, Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT (2009, 2013).

A penetração do CCA foi analisada pelo teste com solução de Cromoazurol, o qual detecta a presença de Cu na madeira tratada (Figueiredo, 2025). O *E. cloeziana* possui densidade básica de ≈ 0,73 g cm^{-3} aos 10 anos de idade (Barbosa et al., 2025). Idade aproximada em que a floresta é explorada para produção de mourões.

Os fungos de podridão parda utilizados nos ensaios de resistência biológica da madeira foram o *Wolfiporia cocos* (F.A. Wolf) Ryvarden & Gilb. (MD-106-R), *Antrodia xantha* (Fr.) Ryvarden (Mad-5096-35) e *Fibroporia radiculosa* (Peck) Parmasto (L-9414-Sp), pertencentes ao Laboratório de Biodeterioração e Proteção da Madeira – UFES.

Os ensaios fúngicos foram realizados em frascos de vidro com capacidade de 600 mL, preenchidos com 300 g de solo com pH 6,5 e capacidade de retenção de água de 23,18%. Com base nessas características e visando a manutenção da umidade para o crescimento fúngico, cada frasco foi umedecido com 73 mL de água destilada. Em seguida, utilizaram-se duas amostras de *Pinus* por frascos visando o crescimento inicial dos fungos de podridão parda (Figura 1A). Os frascos foram autoclavados a 103 kPa e 121 °C por 30 min. As amostras utilizadas foram retiradas da região do alburno, sendo suas dimensões 2 × 2 × 2 cm. Em seguida foram lixadas superficialmente e secas em estufa a 103 ± 2 °C por 48 h para a mensuração da massa seca inicial (Figura 1B).

Os fungos de cada espécie foram inoculados sobre as amostras de *Pinus* sp. e deixados em sala climatizada para crescimento e colonização dos frascos. Após a colonização dos fungos,

realizou-se a montagem dos ensaios de resistência biológica, sendo as amostras dispostas sobre a madeira de *Pinus* sp. presente em cada frasco. Os frascos foram levados para sala climatizada com temperatura e umidade relativa controlada (25 ± 2 °C e 60 ± 5%, respectivamente) por um período de 84 dias (Figura 1C). Transcorrido o tempo dos ensaios, realizou-se a limpeza das amostras, retirando-se todos os micélios fúngicos, sendo as amostras mantidas em estufa a 103 ± 2 °C por 48 h para a mensuração da massa seca final.

O delineamento experimental foi em blocos casualizados, com dois tratamentos da madeira (tratada e não tratada com CCA). Os ensaios foram realizados com três espécies de fungos de podridão parda, com 10 amostras por tratamento para cada fungo.

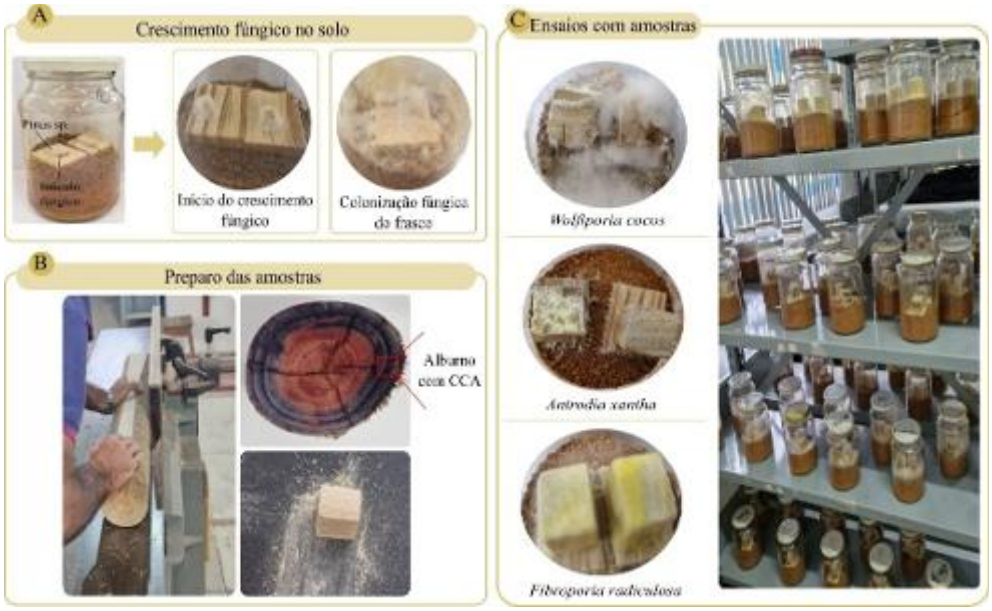


Figura 1 – Ensaios de resistência biológica com madeira de *E. cloeziana* tratada e não tratada (controle) com preservativo à base de CCA.

Após a pesagem também foi analisado a classe de resistência da madeira com e sem tratamento preservativo com CCA em relação aos três fungos apodrecedores analisados (Tabela 1).

Tabela 1 – Classe de resistência da madeira atacada por fungos xilófagos

Perda de massa (%)	Massa residual (%)	Classe de resistência
0-10	90-100	Altamente resistente
11-24	76-89	Resistente
25-44	56-75	Resistência Moderada
≥ 45	≤ 55	Não resistente

Fonte: American Wood Protection Association - AWPA E30 (2022); Medeiros et al. (2025).

Análise colorimétrica e fluorescência de raios X

Analisou-se a colorimetria da madeira de *E. cloeziana*, com presença e ausência de tratamento preservativo com CCA. Para a realização das análises, utilizou-se um espectrofotômetro portátil (3nh-NR200, Beijing, China), o qual mensura os parâmetros colorimétricos de luminosidade ou claridade (*L**), coordenada cromática verde–vermelho (a*), coordenada cromática azul–amarelo (*b**), saturação da cor (C*) e ângulo do matiz (h*) obtidas pelo sistema CIE *L***a***b** (Commission Internationale de l'Éclairage – CIE, 1976), em cinco amostras por tratamento.

Para a quantificação dos metais pesados (Cr, Cu e As) na madeira tratada com CCA, realizou-se a análise de espectrometria por fluorescência de raios X (FRX), em espectrômetro Epsilon 1 (PANalytical). Utilizaram-se três amostras por tratamento, sendo as leituras realizadas na face transversal.

Análises estatística

Os dados foram submetidos à análise de normalidade e homogeneidade de variâncias. Em seguida, as médias dos tratamentos com presença e ausência de CCA foram comparadas pelo teste t de Student ($p < 0,05$), ao utilizar o software R Studio (versão 2026.04.0).

3. Resultados e discussão

A maior perda de massa da madeira de *E. cloeziana* exposta aos fungos *A. xantha* e *W. cocos* ocorreu na ausência de tratamento preservativo com CCA. O contrário foi observado para amostras expostas ao fungo *F. radiculosa*, com maior perda de massa para madeiras tratadas com CCA (Figura 2A).

Após a biodeterioração, a concentração do As diminuiu de 48,77% para valores entre 13,61% (*W. cocos*) e 25,70% (*A. xantha*). Já as concentrações de Cr e Cu permaneceram mais estáveis (Figura 2B).

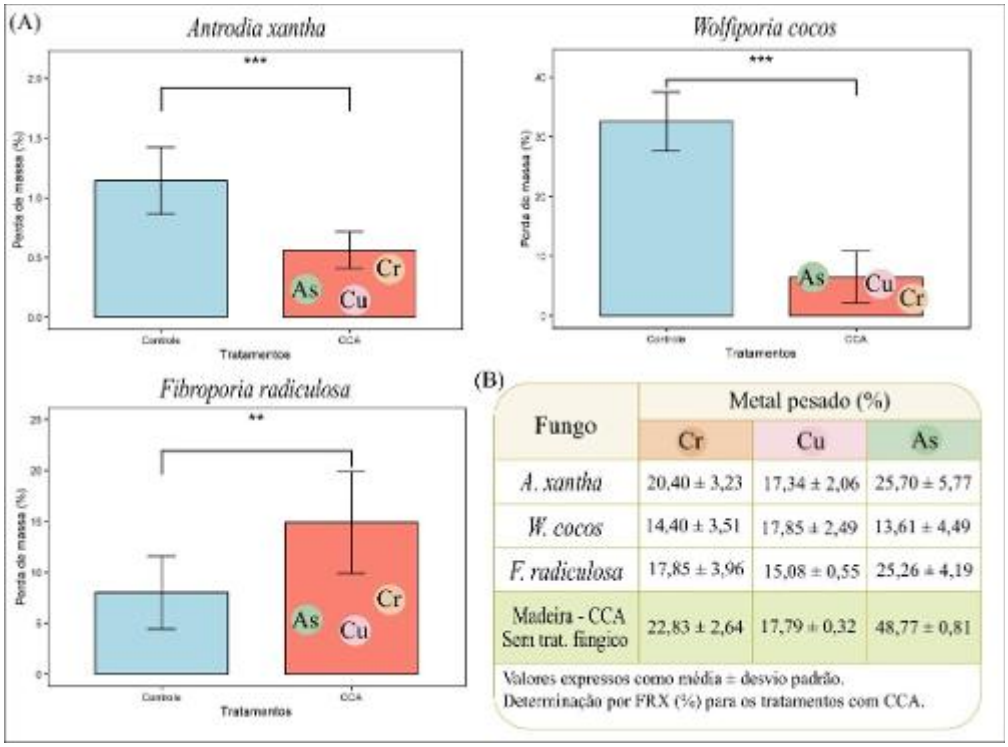


Figura 2 – (A) Perda de massa de *E. cloeziana* na ausência (controle) e presença de CCA e (B) quantificação de Cr, Cu e As na madeira com e sem exposição aos fungos apodrecedores. Diferenças significativas entre os tratamentos pelo teste t de Student ($^{**}p < 0,01$; $^{***}p < 0,001$).

Com base na perda de massa e nos preceitos da AWPA E30 (2022) (Tabela 1), a classe de resistência da madeira de *E. cloeziana* exposta ao fungo *A. xantha*, em ambos os tratamentos, foram classificadas como altamente resistentes. Para o fungo *W. cocos*, a madeira sem tratamento preservativo apresentou perda de massa superior a 30% e classe de resistência moderada. E madeiras tratadas com CCA apresentaram maior resistência ao fungo *W. cocos*, diferença de 26,05% na perda de massa, classificando-a como altamente resistente. Já as madeiras expostas ao fungo *F. radiculosa* foram classificadas como altamente resistentes e resistentes para os tratamentos controle e à base de CCA, respectivamente.

Observa-se que a perda de massa não está relacionada apenas com às concentrações dos constituintes químicos do CCA na madeira, mas também com a capacidade de tolerância das espécies fúngicas a esses elementos. Nesse estudo, *A. xantha* e *W. cocos* demonstraram maior sensibilidade aos constituintes do CCA em comparação a *F. radiculosa*. Muitos fatores estão envolvidos na tolerância fúngica aos preservativos da madeira, destacando-se a capacidade do metabolismo fúngico em produzir enzimas antioxidantes capazes de proteger as células contra o estresse oxidativo, mantendo a homeostase celular (Shukla et al., 2025). E

também a aptidão de produzir ácidos orgânicos, como o ácido oxálico, o qual atua na diminuição do pH do substrato, causando a lixiviação dos constituintes do CCA (Kartal et al., 2004).

Madeiras não expostas aos fungos e tratadas com CCA apresentaram redução dos parâmetros *a** em relação ao controle. Contudo, não houve diferença entre os tratamentos para a característica de luminosidade (*L**) (Tabela 2).

Tabela 2 – Parâmetros de luminosidade ou claridade (*L**), coordenada cromática verde–vermelho (*a**), coordenada cromática azul–amarelo (*b**), saturação da cor (C*) e ângulo do matiz (h*) obtidas pelo sistema CIE *L***a***b** em amostras de *E. cloeziana* com presença e ausência (controle) de tratamento à base de CCA

Condição de inoculação	Tratamentos	*L**	*a**	*b**	C*	h*
Ausência de fungo	controle	70.54 (2.73)	7.07* (0.51)	18.28 (1.17)	19.60* (1.16)	68.83* (1.54)
	CCA	69.73 (2.32)	5.10* (0.41)	17.15 (0.60)	17.89* (0.69)	73.46* (0.77)
	p-valor	0.6233	0.0001	0.0901	0.0221	0.0003
A. xantha	controle	57,70* (3,44)	9,32 (1,00)	24,05 (1,75)	25,81 (1,83)	68,81 (1,86)
	CCA	62,27* (2,69)	8,15 (1,60)	22,31 (3,26)	23,75 (3,61)	70,06 (1,04)
	p-valor	0,0473	0,1993	0,3238	0,2884	0,2265
W. cocos	controle	44,48 (4,24)	11,36 (1,41)	21,77 (2,47)	24,57 (2,72)	62,43 (1,99)
	CCA	41,83 (4,92)	13,07 (3,56)	19,75 (2,17)	23,97 (0,79)	56,66 (9,71)
	p-valor	0,3891	0,3480	0,2084	0,6492	0,2287
F. radiculosa	controle	48,78* (6,12)	10,49 (1,79)	22,01 (1,73)	24,41 (2,08)	64,59* (3,17)
	CCA	41,25* (2,80)	12,47 (0,70)	21,07 (2,16)	24,49 (2,21)	59,32* (1,15)
	p-valor	0,0368	0,0506	0,4665	0,9589	0,0082

*Médias seguidas de asteriscos diferem entre os tratamentos controle e CCA dentro de cada condição de inoculação pelo teste t de Student ($p < 0,05$).

Madeiras tratadas com CCA e expostas ao fungo *A. xantha* apresentaram diferença significativa de luminosidade *L** (p = 0,0473), cujo aumento indica superfície mais clara em relação ao controle. Para o fungo *W. cocos* não houve diferença significativa entre os tratamentos para os parâmetros analisados (p > 0,05). E para madeiras tratadas com CCA e

expostas ao fungo *F. radiculosa* houve escurecimento superficial em relação ao controle com a redução da característica de luminosidade *L** (p = 0,0368). Também houve redução do ângulo de matiz h* (p = 0,0082), indicando alterações na tonalidade da cor (Tabela 2).



Figura 3 – Amostras de madeira de *E. cloeziana* com presença e ausência de tratamento preservativo com CCA, evidenciando amostras não inoculadas (A) e inoculadas em substrato com os fungos *W. cocos* (B), *A. xantha* (C) e *F. radiculosa* (D).

A cor da madeira é uma característica de qualidade instável, podendo ser alterada por diversos fatores, como a degradação por fungos apodrecedores (Medeiros Neto et al., 2025). Alguns autores também observam que a impregnação da madeira com o preservativo químico à base de CCA pode causar seu escurecimento, associado à redução da luminosidade (*L**) e ao deslocamento da cor das coordenadas cromáticas na direção verde (- *a**) e amarelo (+ *b**) (Hadi et al., 2025). Nesse estudo, a redução da luminosidade associada ao CCA foi observada, de forma isolada e significativa (p = 0,0368), em madeiras expostas ao fungo *F. radiculosa*. Comparando somente valores médios (Tabela 2) e características visuais (Figura 3), também foi observado que amostras expostas aos fungos aumentaram seu escurecimento em relação as não expostas.

Amostras expostas ao fungo *W. cocos* no tratamento controle também apresentaram visualmente rachaduras e deformações causadas na perda de massa acima de 30%, com classe de resistência moderada. Dentre os fungos analisados, o *W. cocos* demonstrou alta capacidade na deterioração das amostras.

4. Conclusões

A presença de CCA diminuiu a ação dos fungos apodrecedores *A. xantha* e *W. cocos*, em relação ao controle. Para o *F. radiculosa*, as maiores perdas ocorreram na presença de CCA. A concentração de As foi mais afetada em relação ao Cr e Cu após a biodeterioração da madeira. Em relação a classe de resistência e perda de massa, o *W. cocos* apresentou alta capacidade de deterioração (> 30%). A resistência biológica e os parâmetros de cor da madeira de *E. cloeziana*, tratadas e não tratadas com CCA, variam em função da espécie fúngica.

5. Agradecimentos

À Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação do Espírito Santo (FAPES) pela concessão de bolsa de Pós-Doutorado à Drª. Caroline Palacio de Araujo.

6. Referências bibliográficas

American Wood Protection Association – AWPA. (2022). E30-22: Standard method for evaluating natural decay resistance of woods using laboratory decay tests. In AWPA Book of Standards, AWPA Standards, Birmingham, AL, USA.

Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT. NBR 6232: Penetração e retenção de preservativos em madeira tratada sob pressão. Rio de Janeiro. 2013.

Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT. NBR 9480: Peças roliças preservadas de eucalipto para construções rurais – Requisitos. Rio de Janeiro. 2009.

Barbosa, L. A., Oliveira, M. L. R., Salgado, A. L. P., Campos, I. P. F., Oliveira, J. C., Freitas, I. C., Santos, L. D. T., Castro, R. V. O., Silva, R. S., Oliveira, L. S., Baldin, T., Frazão, L. A. Eucalyptus in agrosilvopastoral systems: An alternative for carbon sequestration and the production of roundwood and sawmill timber. Trees, Forests and People, 20, 100842. https://doi.org/10.1016/j.tfp.2025.100842

Brito, T. R., Guedes, D. P., Silva, J. R. M., Baraúna, E. E. P., & Paes, J. B. (2022). Influence of chromated copper arsenate type-C concentration on the quality of treated fence posts. Research, Society and Development, 11(4), e21411427088. https://doi.org/10.33448/rsd-v11i4.27088

Commission Internationale de l'Éclairage – CIE. (1986). Colorimetry. Part 4: CIE 1976 (*L*a*b**) System. 2. Ed. Vienna; 1986. (CIE,15.2).

Eastwood, D. C., Floudas, D. & Binder, M. et al. (2011). The plant cell wall-decomposing machinery underlies the functional diversity of forest fungi. Science, 333(6043), 762–765. https://doi.org/10.1126/science.1205411

Goodell, B., Qian, Y., & Jellison, J. (2008). Fungal decay of wood: Soft rot–brown rot–white rot. In P. Schultz, H. Militz, M. H. Freeman, B. Goodell & D. D. Nicholas (Ed.), Development of commercial wood preservatives (pp. 9–31). American Chemical Society. https://doi.org/10.1021/bk-2008-0982.ch002

Hadi, Y. S., Yosi, C., Marai, P., Mubarok, M., Abdillah, I. B., Pari, R., Pari, G., Syukur, A., Zaini, L. H., Hermawan, D., & Liao, J. (2025). Performance of polystyrene-impregnated and CCA-preserved tropical woods against subterranean termites in PNG field and treatment-induced color change. Polymers, 17(14), 1945. https://doi.org/10.3390/polym17141945

Indústria Brasileira de Árvores – IBÁ (2025). Relatório Anual 2025. IBÁ. https://iba.org/wp-content/uploads/2025/10/relatorioAnual2025.pdf

Kartal, S. N., Munir, E., Kakitani, T., & Imamura, Y. (2004). Bioremediation of CCA-treated wood by brown-rot fungi *Fomitopsis palustris*, *Coniophora puteana*, and *Laetiporus sulphureus*. Journal of Wood Science, 50(2), 182-188. https://doi.org/10.1007/s10086-003-0544-8

Leonowicz, A., Matuszewska, A., Luterek, J., Ziegenhagen, D., Wojtaś-Wasilewska, M., Cho, N. S., Hofrichterl, M. & Rogalski, J. (1999). Biodegradation of lignin by white rot fungi. Fungal genetics and biology, 27(2-3), 175-185. https://doi.org/10.1006/fgbi.1999.1150

Martín, J. A., & López, R. (2023). Biological deterioration and natural durability of wood in Europe. Forests, 14(2), 283. https://doi.org/10.3390/f14020283

Medeiros Neto, P. N., Paes, J. B., Missia da Silva, J. G., Gonçalves, F. G., Minini, D., Silva Ribeiro, L., & Maffioletti, F. D. (2025). Colorimetric changes in two radial positions caused by wood-decaying fungi in wood of seven eucalypt species. Southern Forests: a Journal of Forest Science, 87(1-2), 31-39. https://doi.org/10.2989/20702620.2024.2410491

Medeiros, J. R., Paes, J. B., Medeiros Neto, P. N., Araujo, C. P., Andrade, J. K. B., França, T. S. F. A., Lopez, Y. M., & Figueiredo, D. L. (2025). Durability of heat-treated eucalyptus wood against decay fungi. BioResources 20(4), 10051–10068. https://doi.org/10.15376/biores.20.4.10051-10068

Morais, S., Fonseca, H. M., Oliveira, S. M., Oliveira, H., Gupta, V. K., Sharma, B., & Lourdes Pereira, M. (2021). Environmental and health hazards of chromated copper arsenate-treated wood: A review. International journal of environmental research and public health, 18(11), 5518. https://doi.org/10.3390/ijerph18115518

Röllig, R., Lebreton, A., Grenga, L., Cresswell, R., Lett, S., Tryfona, T., Navarro, D., Lambert, J., Grisel, S., Gimbert, I., Martens, H. J., Miotello, G., Yu, X., Drula, E., Rosso, M. N., Tarrago, L., Henrissat, B., Johansen, K., Dupree, R., Armengaud, J., Dupree, P. & Berrin, J. G. (2025). Wood decay under anoxia by the brown-rot fungus *Fomitopsis pinicola*. Nature Communications, 16(1), 7352. https://doi.org/10.1038/s41467-025-62567-3

Shukla, J., Singh, S., Dixit, S., Kushwaha, A. S., Mohd, S., Saji, J., & Kumar, M. (2025). Efficient Removal of arsenic from the environment by endophytic fungus *Serendipita indica* through bio-accumulation in cells and adsorption on the cell wall. Environmental Technology & Innovation, 39, 104229. https://doi.org/10.1016/j.eti.2025.104229

Tláskal, V., Brabcová, V., Větrovský, T., Jomura, M., López-Mondéjar, R., Monteiro, L. M. O, Saraiva, J. P., Human, Z. R., Cajthaml, T., Rocha, U. N., & Baldrian, P. (2021). Complementary roles of wood-inhabiting fungi and bacteria facilitate deadwood decomposition. Msystems, 6(1), e01078-20. https://doi.org/10.1128/msystems.01078-20

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Resistência da madeira *Hevea brasiliensis* Muell. Arg. à ação do fungo xilófago *Rhodonia placenta*

Carlos Fernando Ferreira da Silva[1]; Alexandre Monteiro de Carvalho[1]; Henrique Trevisan.[1]; Wattson Quinelato Barreto de Araújo[1]; Larissa Brandão Pereira[1]; Thuane Sofia Gomes dos Santos[1]; Bruno Maia Barroso Burns[1]; Jessica Tavares Chaves Faria[1]

1 Departamento de Produtos Florestais, Instituto de Florestas (IF), Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (UFRRJ), Seropédica/RJ, Brasil

Resumo: A madeira pode ser aproveitada em diversos produtos, tanto pelo lenho quanto pelos extrativos, e sua rentabilidade aumenta com estudos mecânicos, químicos e de resistência a agentes deterioradores. Entre os principais agentes xilófagos estão os fungos, que causam manchas e podridão. O fungo *Rhodonia placenta* é responsável pela podridão parda, e a espécie *Hevea brasiliensis* apresenta vulnerabilidade a esse tipo de deterioração, agravada por fatores fisiológicos e doenças fúngicas. O trabalho avaliou a resistência da *H. brasiliensis* frente ao *R. placenta* em laboratório, utilizando amostras submetidas a tratamento químico com fungicida e a secagem drástica. O fungicida Osmotox, da Montana Química, foi aplicado em concentração de 5% nas amostras tratadas. Após a exposição ao fungo, verificou-se que as amostras sem tratamento apresentaram perda de massa significativamente maior. Já aquelas submetidas ao tratamento químico tiveram resultados melhores. A combinação de secagem drástica e fungicida mostrou-se a mais eficaz, apresentando os menores índices de perda de massa e maior resistência à deterioração.

Palavras-chave: Agentes xilófagos; Podridão parda; Tratamento químico.

Wood Resistance of Hevea brasiliensis Muell. Arg. to the Attack of the Xylophagous Fungus *Rhodonia placenta*

Abstract: Wood can be used in various products, both for its timber and extractives, and profitability increases with mechanical, chemical, and resistance studies against deteriorating agents. Among the main xylophagous agents are fungi, which cause stains and rot. The fungus *Rhodonia placenta* is responsible for brown rot, and the species *Hevea brasiliensis* shows vulnerability to this type of deterioration, worsened by physiological factors and fungal diseases. This study evaluated the resistance of *H. brasiliensis* to *R. placenta* in laboratory conditions, using samples subjected to chemical treatment with fungicide and drastic drying. The fungicide Osmotox, from Montana Química, was applied at a 5% concentration to treated samples. After exposure to the fungus, untreated samples showed significantly higher mass loss. Those treated chemically had better results, while the combination of drastic drying and fungicide proved most effective, showing the lowest mass loss and greater resistance to deterioration.

Keywords: Xylophagous agentes; Brown rot; Chemical treatment.

1. Introdução

A espécie *Hevea brasiliensis*, conhecida popularmente como seringueira possui em média 25 m de altura e DAP de 45 cm em indivíduos adultos. Pertence à família Euphorbiaceae e sua ocorrência natural se dá na região amazônica, em matas ciliares e várzeas de terra firme em solos inundáveis. O desenvolvimento da seringueira é considerado rápido, podendo atingir altura superior a 3 m em dois anos. Madeira leve com 0,45 g/cm³ de durabilidade natural considerada baixa. (LORENZI, 1998).

A principal fonte de renda atribuída a esta espécie é a produção de látex que possibilita a produção de borracha de alta qualidade. Sua madeira pode ser usada para caixotaria, produção de painéis, tábuas e forros no Brasil. A produção de látex foi comprometida no Brasil devido a ação do fungo *Microcyclus ulei*, que é especifico da seringueira e promove a enfermidade denominada “Mal-das-Folhas”, pois a espécie *Hevea brasiliensis*, que contribui com a maior parte da produção de látex no país, apresenta alta suscetibilidade a este patógeno (PINHEIRO E LIBONATTI, 1971).

Por se tratar de uma madeira leve com boa presença de vasos/poros sua suscetibilidade a agentes xilófagos como o fungo causador da podridão parda *Rhodonia placenta* pode prejudicar a produtividade madeireira, autores como Oldertrøen et al. (2016) e Coneglian (2011) recomendam o uso de tratamentos preventivos quanto a ação de possíveis patógenos logo após o corte de toras de *H. brasiliensis*.

Segundo Peries (1990), nas células parenquimáticas de *H. brasiliensis* encontram-se altos teores de açúcares e amido armazenados, que fazem com que ela seja altamente suscetível a fungos e insetos. O estudo da resistência da madeira de seringueira tratada com preservativos a deterioração é importante para determinar a durabilidade de produtos que possam ser fabricados com sua madeira (FARIA et al, 2020).

A etapa de secagem é considerada essencial em praticamente todos os processos de transformação da madeira, sendo indispensável tanto para o uso direto da madeira serrada quanto para aplicações industriais mais complexas, como na fabricação de compensados, painéis de partículas e produtos de madeira reconstituída (MENDES; MARTINS; GOUVEIA, 2019).

A secagem também representa um dos métodos de prevenção da deterioração da madeira, pois as hidroxilas (OH) terminais se unem durante o processo de secagem e dificultam a passagem de enzimas fúngicas que são essenciais para quebrar cadeias de

moléculas como a celulose, por exemplo, essas enzimas também podem ser carreadas pela água e sofrer solubilização (ROWELL, 2005).

A pesquisa comandada por De Almeida (2026) é um exemplo de investigação, com uso de extrativos, que tem como objetivo promover a otimização da resistência de madeiras como seringueira e pinus à podridão causada por fungos, devido a suscetibilidade e, consequentemente, as limitações quanto a produtividade que essas espécies apresentam.

Por consumir polissacarídeos como a celulose, que não apresenta variações em sua constituição química, e o tipo e constituintes de ligninas não representar barreira para que ocorra a degradação, a podridão parda pode ocorrer na mesma velocidade em espécies folhosas (NILSSON, 2009), garantindo assim um mecanismo de biodeterioração muito eficiente e com vasto espectro de atuação. A redução de massa de madeira promovida por fungos como *R. placenta* pode ser elevada mesmo em experimentos com amostras que recebem tratamento térmico (VIITANEN, 2009).

Um componente essencial para o sucesso na colonização da madeira por fungos da podridão parda é o ácido oxálico, presente nas hifas dos fungos e áreas afetadas da madeira colonizada. De acordo com Brand, Anzaldo e Moreschi (2006), o ácido oxálico promove a redução do pH tornando-o mais ácido e resultando na hidrólise de polioses presentes nas paredes celulares das madeiras, permitindo assim o acesso das hifas dos fungos.

Segundo Castro e Guimarães (2018), ao realizar a secagem da madeira as hidroxilas (OH) terminais se unem durante este processo e dificultam a passagem de enzimas fúngicas que são essenciais para quebrar cadeias de moléculas como a celulose, por exemplo, essas enzimas também podem ser carreadas pela água e sofrer solubilização. O Osmotox (Montana Química) é um fungicida preservativo para madeira, pertencente ao grupo dos fungicidas organossintéticos com ação protetora contra fungos manchadores e deterioradores. Trata-se de um produto hidrossolúvel, registrado no IBAMA e frequentemente utilizado para uso industrial em preservação de madeira. O uso de fungicidas hidrossolúveis é recomendado por autores com Kronka, Ribas e Monteiro (2006) por manter a coloração da madeira e permitir a confecção de variados produtos após seu uso.

Neste contexto, o trabalho teve como objetivo analisar a perda de massa em corpos de prova de *H. brasiliensis* tratados com fungicida e secagem drástica a ação do fungo xilófago *R. placenta*, bem como testar a eficiência destes métodos preventivos.

2. Material e métodos

A madeira de *Hevea brasiliensis* utilizada neste trabalho foi obtida na Fazenda Ondulada, em Ituberá/BA, da empresa Agrícola Cantagalo. o povoamento de onde com se retirou as toras tem aproximadamente 40 anos. Após o processamento das toras resultando em tábuas foram confeccionados corpos de prova da parte central do lenho na medida 2,54 x 1,0 x 2,0 cm, de acordo com a norma AWPA Standard E30-16 (2016), totalizando 40 corpos de prova.

Os corpos de prova de *Hevea brasiliensis* foram divididos em quatro grupos experimentais, cada um composto por dez amostras. O primeiro grupo não recebeu qualquer tratamento preventivo, servindo como controle. O segundo grupo foi submetido exclusivamente à secagem drástica, enquanto o terceiro recebeu apenas tratamento químico por imersão em fungicida Osmotox a 5% durante 20 segundos. O quarto grupo combinou ambos os procedimentos, sendo constituído por amostras provenientes de tábuas previamente submetidas à secagem drástica e, posteriormente, tratadas com o fungicida. Essa divisão permitiu avaliar comparativamente a eficácia dos diferentes métodos de proteção contra a ação do fungo *Rhodonia placenta*, responsável pela podridão parda.

O método de secagem drástica das tábuas precedeu a confecção dos corpos de prova e seguiu os protocolos de Jankowsky (2009), onde determinou-se os seguintes parâmetros: Temperatura Inicial (Ti), Temperatura Final (Tf) e Potencial de Secagem (Ps).

O ensaio de apodrecimento das espécies em estudo por fungos deterioradores foi realizado no Laboratório de Biodeterioração da Madeira, situado no Departamento de Tecnologia da Madeira (DPF) do Instituto de Florestas (IF) na Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (UFRRJ). Os corpos de prova foram acondicionados em incubadora BDO (Biochemical Oxygen Demand), com temperatura de 23 ±1ºC e umidade relativa de 65 ±2 % até peso constante, promovendo assim condições ideais para o desenvolvimento dos fungos xilófagos nos corpos de prova.

Os fungos foram cultivados em meio de cultura BDA (Batata, Dextrose, Agar) em Placas de Petri com 140 mm de diâmetro. Foram adicionados aos frascos 118 gramas de solo (características do solo encontravam-se dentro do recomendado pela ASTM D 2017 (2005)), 50 mL de água destilada (H_2O Dest), duas placas de madeira (*Pinus sp*., alimentadores dos fungos). Em seguida os frascos foram esterilizados em autoclave por 20 minutos a 120 °C (figura 05). A inoculação dos fungos foi feita na Câmara de Fluxo Laminar. Após 14 dias o fungo *R. placenta*,

já tinham colonizado as placas alimentadoras, a etapa seguinte é o preparo dos corpos de prova para introduzi-los nos frascos contendo os fungos.

Os corpos de prova foram separados por tratamento em frascos para serem esterilizados em autoclave (20 min a 120 °C). Após a esterilização foram colocados em cada frasco dois corpos de prova (sobre as placas colonizadas pelos fungos), este procedimento também é feito na câmara de fluxo laminar (ou capela). Após a inserção dos corpos de prova nos frascos contendo *R. placenta*, o período de inoculação teve duração de 20 semanas. Após este período as amostras foram retiradas dos frascos para análises dos corpos de prova que sofreram ação dos fungos deterioradores.

Após a retirada das amostras dos frascos foi feita uma limpeza superficial dos corpos de prova, sendo novamente levados a BDO em semelhantes condições ao início do preparo dessas amostras (temperatura de 23 ±1 ºC e umidade relativa de 65 ±2 %) até atingir peso constante para que as análises pudessem ser feitas. Para classificar a perda de massa observado nas amostras utilizou-se a norma AWPA Standard E30-16 (2016), onde considera-se: pouco ou não resistente (perda de massa acima de 45%); moderadamente resistente (perda de massa de 25 a 44%); resistente (perda de massa de 11 a 24%) e altamente resistente (perda de massa de 0 a 10%).

A análise de dados foi feita no programa RStudio Team. (2015). Após fazer análise de variância (ANOVA), a homogeneidade das variâncias foi testada pelos testes de Bartlett e de Levene, ambos com 5% de significância. O teste de Tukey HSD foi posteriormente executado, com intervalos de confiança de 95% e p-valores ajustados.

3. Resultados e discussão

Após fazer análise de variância (ANOVA) observou-se que os tratamentos diferem significativamente entre si, onde pelo menos um grupo tem média diferente dos outros. A homogeneidade das variâncias foi confirmada pelos testes de Bartlett (p valor = 0,986) e de Levene (p valor = 0.8927), ambos com 5% de significância constatando-se dados com distribuição normal. O teste de Tukey demonstrou com intervalos de confiança de 95% e p-valores ajustados que as amostras submetidas a tratamento químico diferem significativamente dos dados obtidos nas demais amostras (Tabela 1).

Os corpos de prova submetidos a combinação de secagem drástica e tratamento com fungicida e os que receberam tratamento apenas com fungicidas apresentaram perdas de massa significativamente inferior às amostras sem tratamento e apenas submetidas à secagem

(Tabela 1). Observou-se que o banho de fungicida foi o fator determinante para a redução na perda de massa das amostras diante da ação de *R. placenta*.

Tabela 1: Classe de resistência e peso de massa (PM) mediante ação de *R. placenta* na madeira de *H. brasiliensis* submetida aos tratamentos: banho de fungicida (F), secagem drástica (SD), secagem drástica e banho de fungicida (SD + F) e sem tratamento (ST)

Tratamento	PM (g)	PM (%)	Classe de resistência
ST	1,210 ± 0.228 a	33,50	moderadamente resistente
SD	1.028 ± 0.232 a	28,89	moderadamente resistente
F	0.439 ± 0.241 b	10,14	Resistente
SD + F	0,237± 0.233 b	5,81	Altamente resistente

Letras distintas, entre linhas, diferem estatisticamente (Tukey 5% de significância).

Com relação a secagem drástica como forma de prevenção, Oliveira et al (2010) relatam que a retirada de água higroscópica reduz as moléculas de água presente nas microfibrilas da celulose que fazem parte da composição da parede celular, promovendo a contração da madeira e reduzindo também a disponibilidade de água livre. A contração causada pela remoção da água higroscópica não só altera as dimensões da madeira, mas também diminui a umidade interna necessária para fungos xilófagos, contribuindo para a durabilidade e resistência do material.

Após a duração de 53,77 horas, correspondente a 2,25 dias, período considerado muito rápido de acordo com o Instituto brasileiro de desenvolvimento florestal (1981), corroborando com o trabalho de Martins, Mendes e Gouveia (2019), onde foi feito um programa de secagem também com povoamento de 40 anos de *H. brasiliensis*. Os valores médios dos parâmetros temperatura inicial, temperatura final e potencial de secagem foram: Ti = 56,99°C; Tf = 82,85°C e Ps = 3,18, respectivamente. A madeira apresentou boa estabilidade dimensional diante desses ensaios, corroborando com valores entre 2,84 a 3,74 observados para determinar os potenciais de secagem dessa espécie, considerados de médio a alto.

Os corpos de prova durante a estabilização na BDO voltaram a ser expostos em ambiente com cerca de 65% de umidade, a madeira mesmo reabsorvendo água, apresentou discreta melhora em sua resistência, pois as dimensões e quantidade de moléculas de água não tendem a apresentar os mesmos valores que os observados antes do processo de secagem.

As amostras que receberam a apenas a secagem apresentou redução na perda de 4,61 % em relação as amostras sem tratamento, já as amostras submetidas a secagem e fungicida

tiveram perdas de massa de 4,33 % menor em relação as amostras que receberam apenas o tratamento químico (Figura 1). No entanto, a análise estatística indicou que as amostras submetidas apenas ao fungicida, bem como aquelas previamente secas e posteriormente tratadas quimicamente, não apresentaram redução significativa na perda de massa em comparação às demais. Em termos numéricos, as amostras submetidas à secagem drástica mostraram valores ligeiramente inferiores de perda de massa, mas essa diferença não foi estatisticamente relevante, mesmo após o equilíbrio da umidade da madeira com o ambiente experimental (Figura 1).

Figura 1: Perda de massa percentual da madeira de *H. brasiliensis*. tratada com fungicida (F), secagem drástica (SD), secagem drástica e banho de fungicida (SD + F) e sem tratamento (ST) e submetida à ação do fungo xilófagos *R. placenta*. Letras distintas, entre barras, diferem estatisticamente (Tukey, 5% de significância).

A perda de massa inferior observada nas amostras submetidas previamente ao banho de fungicida pode ter relação com a constituição do Osmotox e corrobora com os estudos comandados por Brand, Anzaldo e Moreschi (2006). Na fórmula deste fungida há presença de: carbendanzim ($C_9H_9N_3O_2$), que inibe a síntese de β-tubulina, impedindo assim a formação dos microtúbulos essenciais para a divisão celular dos fungos, reduzindo a produção desse metabólito e; Cobre-8-quinolato ($C_{18}H_{12}CuN_2O_2$), em que o cobre apresenta toxidez a enzimas essenciais dos microrganismos, pois reage diretamente com o ácido oxálico formando sais insolúveis (oxalato de cobre), neutralizando parte da acidez e reduzindo a disponibilidade do ácido para o fungo, enquanto o quinolato potencializa a penetração e a estabilidade do composto.

Dentre os tratamentos testados no trabalho de Coneglian (2011) utilizou-se carbendanzim e Cobre-8-quinolato, nos resultados o autor observou uma redução da ação de fungos manchadores em *H. Brasiliensis* de 40 % para cerca de 7 %, corroborando com a hipótese da atuação destes compostos contra fungos xilófagos.

4. Conclusões

O processo de secagem reduziu a disponibilidade de água higroscópica nas paredes celulares, mas, estatisticamente, não se observou maior resistência da madeira de *Hevea brasiliensis* a ação fúngica.

A presença de carbendazim e cobre-8-quinolato na formulação do Osmotox promoveu a ação antifúngica.

O banho de fungicida foi o fator determinante para a redução significativa da perda de massa das amostras frente à ação de *R. placenta*, confirmando sua eficiência como tratamento preventivo.

5. Agradecimentos

Aos meus orientadores, a colaboração dos colegas do Departamento de Tecnologia da Madeira (DPF), sobretudo dos laboratórios de Biodeterioração da Madeira (LBM) e de Processamento da Madeira (LPM), da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, cujas análises e discussões foram essenciais para o desenvolvimento deste estudo.

6. Referências

American Wood Protection Association. (2016). *AWPA E30-16: Standard method for evaluating natural decay resistance of woods using laboratory decay tests*. AWPA Book of Standards. Birmingham, AL: AWPA.

Brand, M. A., Anzaldo, J., & Moreschi, J. C. (2006). Novos produtos para o tratamento preservante da madeira: Perspectivas da pesquisa e utilização. *Floresta*, 36(1).

Castro, V. G., & Guimarães, P. P. (2018). *Deterioração e preservação da madeira*. Mossoró: EdUFERSA.

Coneglian, A. (2011). *Efeito da resistência natural e tratamentos químicos no lenho juvenil e adulto de Hevea brasiliensis Mull. Arg. ao fungo manchador Botryodiplodia theobromae e cupim Cryptotermes brevis* (Tese de Doutorado). Universidade Estadual Paulista.

De Almeida, A. T. S., Paes, J. B., Brocco, V. F., Brocco, L. G. C., Da Costa, B., Gonçalves, F. G., Lopez, Y. M., & Nicacio, M. A. (2026). Efficiency of extracts from Amazonian species in protecting the wood of *Hevea brasiliensis* Muell. Arg. against xylophagous fungi. *Holzforschung*, 80(4), 265–276.

Faria, D. L., Mesquita Júnior, L., Lopes, D. E., Mendes, L. M., & Guimarães Júnior, J. B. (2020). Study of mechanical behavior of treated glued laminated timber beams of rubber wood (*Hevea brasiliensis*). *Revista Construindo*, 12(2), 1–8.

Jankowsky, I. P. (2009). *Metodologia simplificada para indicação de programas de secagem* (Tese de Livre-Docência). Universidade de São Paulo.

Kronka, F. J. N., Ribas, C., & Monteiro, C. (2006). *Uso potencial da madeira da seringueira*. Sociedade Brasileira de Silvicultura. http://www.sbs.org.br/secure/Palestra2006_Heveicultura.pdf

Lorenzi, H. (1998). *Árvores brasileiras: Manual de identificação e cultivo de plantas arbóreas nativas do Brasil* (2ª ed., Vol. 2). Nova Odessa, SP: Instituto Plantarum de Estudos da Flora Ltda.

Nilsson, T. (2009). Biological wood degradation. In M. Ek, G. Gellerstedt, & G. Henriksson (Eds.), *Pulp and paper chemistry and technology* (Vol. 1, pp. 219–244). Estocolmo: De Gruyter.

Oliveira, J. T. D. S., Tomazello Filho, M., & Fiedler, N. C. (2010). Avaliação da retratibilidade da madeira de sete espécies de *Eucalyptus*. *Revista Árvore*, 34(5), 929–936.

Peries, O. S. (1990). Rubber wood: A byproduct of the natural rubber industry. *Rubber Research Institute of Sri Lanka Bulletin*, 15, 1–5.

Oldertrøen, K., H-Kittikun, A., Phongpaichit, S., Riyajan, S., & Teanpaisal, R. (2016). Treatment of rubberwood (*Hevea brasiliensis* (Willd. ex A. Juss.) Müll. Arg.) with maleic anhydride to prevent moulds. *Journal of Forest Science, 62*(7), 314–321. https://doi.org/10.17221/109/2015-JFS (doi.org in Bing)

Pinheiro, E., & Libonatti, V. E. (1971). O emprego da *Hevea pauciflora* como fonte de resistência ao mal-das-folhas. *Polímeros – Revista Técnica e Informação*, 1(1), 8.

Rowell, R. M. (2005). *Handbook of wood chemistry and wood composites*. CRC press.

Viitanen, H. A. (2009). Modelagem do fator tempo no desenvolvimento da podridão parda no alburno de pinheiros e abetos: O efeito de condições críticas de umidade e temperatura. *Holzforschung*, 51, 99–106

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Secagem ao ar livre da madeira de *Peltophorum dubium* (canafístula)

Bárbara Lôpo de Lima[1]; Talita Baldin[2]; Giovanna Cechin de Oliveira[2]; Mylena da Silva Brum[2]; Rutiele do Nascimento Nobre[2]; Isabella Luciana Horquen[2]; Mikaela Rehbein[2]

[1] Universidade Federal de Uberlândia - UFU
[2] Universidade Federal de Santa Maria - UFSM

Resumo: A secagem da madeira constitui uma das etapas mais importantes do seu processamento, influenciando diretamente a qualidade, a estabilidade dimensional e o desempenho durante sua utilização. Este trabalho teve como objetivo avaliar o desdobro e o comportamento da secagem ao ar livre da madeira de *Peltophorum dubium* (Spreng.) Taub. (canafístula). O estudo foi realizado na Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), utilizando uma tora processada em serraria móvel. Foram avaliados o rendimento volumétrico, a variação do teor de umidade e a ocorrência de defeitos durante a secagem. O rendimento bruto obtido foi de 44,15%. Os tempos para atingir o ponto de saturação das fibras variaram entre 408 e 1080 horas, evidenciando elevada heterogeneidade no processo de secagem. Após aproximadamente 840 horas, a pilha apresentou teor médio de umidade de 21,12%. Os principais defeitos observados foram rachaduras de topo, alterações de coloração e fungos manchadores, sem ocorrência significativa de empenamentos. Assim, a heterogeneidade da perda de umidade e a ocorrência de defeitos de topo constituem os principais aspectos a serem considerados na secagem ao ar livre da madeira avaliada de *P. dubium*.

Palavras-chave: Defeitos de secagem; Ponto de saturação das fibras; Rendimento volumétrico.

Air Drying of *Peltophorum dubium* (Canafístula) Wood

Abstract: Wood drying represents one of the most critical stages in wood processing, as it directly affects wood quality, dimensional stability, and performance during service. This study aimed to evaluate the sawing yield and air-drying behavior of Peltophorum dubium (Spreng.) Taub. wood. The study was conducted at the Federal University of Santa Maria (UFSM), using a log processed in a portable sawmill. Volumetric yield, moisture content variation, and the occurrence of drying defects were evaluated. The gross lumber yield was 44.15%. The time required to reach the fiber saturation point ranged from 408 to 1,080 hours, indicating high variability in the drying process. After approximately 840 hours, the wood stack reached an average moisture content of 21.12%. The main defects observed were end checks, color changes, and sapstain fungi, with no significant occurrence of warping. Thus, the heterogeneity of moisture loss and the occurrence of end checks are the main aspects to be considered during the air drying of *P. dubium* wood.

Keywords: Drying defects; Fiber saturation point; Volumetric yield.

1. Introdução

A secagem da madeira é uma das etapas mais importantes do processamento de produtos florestais, influenciando diretamente a qualidade, a estabilidade dimensional e o desempenho

durante sua utilização (Yin & Liu, 2021). A remoção controlada da água reduz a suscetibilidade ao ataque de organismos xilófagos, melhora as propriedades mecânicas e minimiza variações dimensionais (Thybring et al., 2022). Entretanto, por se tratar de um material anisotrópico e heterogêneo, a movimentação da umidade ocorre de maneira complexa, sendo influenciada por fatores anatômicos, físicos e ambientais.

Durante a secagem, a água livre presente no lume celular é removida inicialmente com relativa facilidade. À medida que o teor de umidade se aproxima do ponto de saturação das fibras (PSF), a taxa de secagem diminui devido à remoção da água adsorvida nas paredes celulares (Siau, 1984). Nessa etapa, gradientes de umidade podem gerar tensões internas, provocando rachaduras, empenamentos e colapso, comprometendo a qualidade da madeira (Fu et al., 2023). Assim, compreender o comportamento higroscópico das espécies florestais é essencial para o desenvolvimento de estratégias de secagem mais eficientes.

A secagem ao ar livre é utilizada por pequenos e médios produtores devido ao baixo custo operacional e à reduzida demanda energética (Yin & Liu, 2021). Contudo, o processo depende das condições climáticas, como temperatura, umidade relativa, precipitação e velocidade do vento, que afetam a taxa de remoção de água. Além disso, a disposição das peças, o espaçamento entre tabiques e a proteção contra intempéries influenciam a uniformidade da secagem e a ocorrência de defeitos (Perré, 2007).

Entre as espécies nativas com potencial de uso industrial destaca-se a canafístula (*Peltophorum dubium* (Spreng.) Taub.), amplamente distribuída no Brasil e empregada em marcenaria, mobiliário e construção civil, com madeira moderadamente pesada, resistente e de boa trabalhabilidade (Carvalho, 2003). A espécie apresenta, no entanto, coeficiente de contração anisotrópica relativamente elevado (Longui et al., 2025) e variações na proporção entre cerne e alburno, na densidade e nas características anatômicas ao longo da tora (Eloy et al., 2021), o que pode influenciar o comportamento durante a secagem e o tempo necessário para atingir o equilíbrio higroscópico.

Nesse contexto, o presente trabalho teve como objetivo acompanhar o processamento da madeira de *Peltophorum dubium*, desde o desdobro em serraria móvel até a secagem ao ar livre, avaliando a perda de umidade, o tempo necessário para atingir o ponto de saturação das fibras e a ocorrência de defeitos associados à secagem.

2. Material e métodos

Foi utilizada uma tora de *Peltophorum dubium* (Spreng.) Taub., proveniente de uma doação do setor responsável pela manutenção e jardinagem do campus da Universidade Federal

de Santa Maria (UFSM), Santa Maria, RS. A tora correspondeu ao único material da espécie disponibilizado para o estudo. Foram determinados o comprimento, o diâmetro médio e a espessura média da casca. A geometria da tora foi caracterizada pela conicidade e pelo índice de achatamento. O desdobro foi realizado em serraria móvel equipada com serra-fita simples, produzindo tábuas com espessura nominal de 25 mm. Foram determinados o volume da tora, o volume de madeira serrada, os rendimentos bruto e líquido, a velocidade de alimentação e o desbitolamento das tábuas, obtido pela diferença entre a espessura nominal e a espessura produzida.

Três tábuas foram selecionadas como amostras-controle para o monitoramento da secagem, apresentando, após o desdobro, as seguintes espessuras: 27,2 mm (C1), 22,7 mm (C2) e 23,3 mm (C3). Amostras retiradas da região central dessas peças foram utilizadas para determinar o teor de umidade inicial, conforme a ABNT NBR 7190-3 (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2022). O teor de umidade foi calculado pela relação entre a massa úmida e a massa seca após secagem em estufa até massa constante.

A secagem foi realizada ao ar livre entre setembro e novembro de 2025. As tábuas foram empilhadas sobre base elevada, utilizando tabiques alinhados e espaçados uniformemente para favorecer a circulação de ar. A pilha foi orientada na direção predominante dos ventos e protegida por cobertura superior contra precipitações.

A secagem foi acompanhada pelo método gravimétrico, com pesagens periódicas das três tábuas-controle. O teor de umidade foi estimado pela variação de massa das peças, usando como referência o teor de umidade inicial determinado em laboratório. Com esses dados, foram construídas as curvas individuais de secagem e a curva média da pilha. O PSF foi utilizado para avaliar o comportamento de secagem da espécie.

Dados de temperatura do ar, umidade relativa e precipitação foram obtidos junto ao Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) e utilizados na interpretação da secagem da madeira. Ao final do experimento, as tábuas foram avaliadas quanto à ocorrência de rachaduras, arqueamento, encurvamento, alterações de coloração e fungos manchadores.

O estudo foi conduzido com material proveniente de uma única tora, sendo três tábuas utilizadas como amostras-controle para o monitoramento da secagem. Portanto, os resultados devem ser interpretados como uma caracterização descritiva do comportamento do material avaliado sob as condições experimentais adotadas. O número reduzido de unidades experimentais limita a representatividade amostral e não permite que os resultados sejam generalizados para a espécie *Peltophorum dubium*.

3. Resultados e discussão

3.1 Desdobro e rendimento

A tora processada apresentou comprimento de 143 cm, diâmetro médio de 36,37 cm e espessura média de casca de 0,46 mm, com baixa conicidade (3,32%, Classe I) e índice de achatamento médio de 89% (Classe I), indicando boa regularidade geométrica. O volume com casca (0,1495 m³) diferiu do volume sem casca em apenas 0,0005 m³, evidenciando a baixa influência da casca no volume total processado.

O desdobro gerou onze tábuas, com volume serrado de 0,06599 m³, resultando em rendimento bruto de 44,15%, rendimento líquido de 44,30% e eficiência de 0,037 m³ por operário/turno. Esses valores são superiores ao coeficiente de rendimento volumétrico de 35% estabelecido pela Resolução CONAMA nº 474 (2016) para a conversão de toras em madeira serrada, indicando aproveitamento superior ao valor de referência adotado pelos órgãos ambientais brasileiros. Isso pode estar associado à geometria favorável da tora, como baixa conicidade e maior regularidade da seção transversal, fatores que influenciam o aproveitamento no desdobro (Mendoza et al., 2017). A menor conicidade reduz a perda de material durante o processamento, já que toras com maior regularidade geométrica tendem a apresentar melhor aproveitamento volumétrico e menor geração de resíduos.

O desbitolamento das tábuas, avaliado em relação à espessura nominal de 25 mm, variou de −1,9 mm a +1,0 mm. Essa variação pode ser atribuída, principalmente, às características do sistema de desdobro empregado, uma vez que a regulagem da espessura de corte na serra móvel é realizada manualmente e depende da definição e do controle efetuados pelo operador. Além disso, o alívio das tensões de crescimento da madeira e eventuais deslocamentos da tora durante sua fixação no equipamento também podem ter contribuído para essa variação dimensional. Segundo Mattheck e Kubler (1997), esse comportamento está relacionado ao estado de afiação e à tensão da lâmina de corte.

3.2 Secagem da madeira

A determinação do teor de umidade inicial das tábuas-controle revelou diferenças expressivas entre as peças, com valores de 90,14% (C1), 80,15% (C2) e 77,38% (C3). Essa variação pode estar relacionada à posição radial das tábuas na tora, uma vez que o teor de umidade da madeira pode variar no sentido medula–casca. Em geral, diferenças entre as regiões de cerne e alburno podem resultar em distintos teores de umidade inicial, com o cerne apresentando menor teor de umidade em determinadas espécies. Assim, a posição das tábuas

dentro da própria tora constitui uma possível explicação para a heterogeneidade de umidade observada antes do início da secagem (Mangini et al., 2023).

Essa variação é compatível com os resultados de Muñoz e Moya (2008) para *Gmelina arborea*, que identificaram a posição radial da peça e a proporção entre cerne e alburno como fatores determinantes da variabilidade do teor de umidade inicial. O alburno, por apresentar maior quantidade de água livre nos lumes celulares e menor obstrução por extrativos, apresenta maiores teores de umidade que o cerne (Yang et al., 2022). Assim, a tábua C1, com maior teor de umidade (90,14%), pode representar uma peça com maior proporção de alburno, hipótese que contribui para explicar seu comportamento de secagem mais lento.

O monitoramento das condições climáticas evidenciou variações de temperatura e umidade relativa, com alternância entre períodos secos e episódios de precipitação intensa. Essas condições influenciam diretamente a secagem ao ar livre, uma vez que a perda de umidade da madeira depende do gradiente de pressão de vapor entre a superfície da peça e o ambiente (Remki et al., 2012). Em períodos de alta umidade relativa, esse gradiente é reduzido, limitando tanto a remoção de água livre nos estágios iniciais quanto a difusão de água de impregnação nas fases posteriores (Li et al., 2017).

As curvas de secagem das três tábuas-controle evidenciaram diferenças no tempo necessário para atingir o PSF, correspondendo a 1080 horas para C1, 504 horas para C3 e 408 horas para C2. Essa variação pode estar associada, entre outros fatores, às diferenças de espessura entre as tábuas-controle, que apresentaram 27,2 mm (C1), 23,3 mm (C3) e 22,7 mm (C2). A maior espessura de C1 pode ter contribuído para sua secagem mais lenta, em razão do maior percurso necessário para a movimentação da umidade até as superfícies de evaporação. As diferenças de espessura decorreram das condições de desdobro em serraria móvel, na qual a manutenção de uma bitola rigorosamente uniforme entre as tábuas pode ser dificultada por aspectos operacionais.

As tábuas-controle foram distribuídas em diferentes posições na pilha (C1 na parte inferior, C2 na intermediária e C3 na superior). A posição pode influenciar a velocidade de secagem devido às diferenças na circulação de ar; contudo, embora a C3 estivesse na parte superior, a C2 atingiu o PSF em menor tempo (408 horas), indicando que a posição, isoladamente, não explica a variabilidade observada. As diferenças de espessura entre as tábuas-controle (22,7 mm em C2, 23,3 mm em C3 e 27,2 mm em C1) também podem ter contribuído para esse comportamento, sugerindo que a dinâmica de secagem resultou da combinação entre posição na pilha e espessura das peças.

A tábua C1 apresentou o maior teor de umidade inicial e a menor taxa de secagem, reforçando a influência das características anatômicas, como proporção cerne/alburno, tecido parenquimático, tiloses e pontoações, sobre a permeabilidade do lenho e a velocidade de secagem (Muñoz & Moya, 2008). Comportamento semelhante foi relatado por Liu et al. (2023) em *Eucalyptus urophylla* × *E. grandis*, no qual diferenças nos mecanismos de transporte interno influenciaram a taxa de secagem das peças.

As tábuas C2 e C3 apresentaram curvas semelhantes, embora com tempos distintos até o PSF (408 e 504 horas, respectivamente). Essa proximidade sugere que fatores intrínsecos da madeira, como sua organização anatômica e permeabilidade, podem ter exercido maior influência sobre a secagem do que a posição ocupada pelas peças na pilha. Além disso, diferenças na posição radial dentro da tora podem ter contribuído para o comportamento observado, embora essa hipótese necessite de confirmação por análises anatômicas. Resultados semelhantes são descritos para espécies nativas, nas quais diferenças locais na estrutura da madeira contribuem para variações significativas no comportamento de secagem (Yang et al., 2022).

A variabilidade observada para *P. dubium* também pode estar relacionada às características de retração da espécie. Madeiras com maior anisotropia dimensional apresentam diferenças mais acentuadas entre as retrações radial e tangencial durante a perda de umidade abaixo do PSF, favorecendo o desenvolvimento de tensões internas e a ocorrência de defeitos de secagem, como rachaduras de topo (Gao et al., 2023).

Considerando o conjunto das tábuas, a pilha atingiu o PSF em aproximadamente 840 horas (35 dias) de secagem, com teor médio de umidade de 21,12% (Figura 1). Embora as peças individuais tenham apresentado ampla dispersão temporal, o comportamento médio convergiu para um valor mais estável, indicando que o acompanhamento de um lote pode fornecer uma estimativa geral do avanço da secagem. Entretanto, essa abordagem pode mascarar a variabilidade entre peças.

As condições climáticas registradas em Santa Maria durante o período de secagem (Figura 1) ajudam a explicar parte da heterogeneidade observada entre as curvas. O evento de maior precipitação do período ocorreu em 21 de setembro (95,4 mm, correspondendo a 120 horas de secagem), acompanhado de elevação da umidade relativa do ar para 88,6%. Esse episódio coincidiu com uma reversão momentânea na curva da tábua C1, cujo teor de umidade se elevou de 80,13% para 84,14% no intervalo seguinte, evidenciando reabsorção superficial de água em resposta à chuva intensa. Por outro lado, o intervalo entre 20 e 24 de outubro (816 a 912

horas) registrou o período mais seco do experimento, com umidade relativa do ar entre 50,8% e 63,8% e ausência de precipitação, condições que coincidiram com a maior taxa de perda de umidade observada na curva média da pilha, que caiu de 27,00% para 18,85% nesse intervalo. Esse padrão confirma que o gradiente de pressão de vapor entre a madeira e o ar ambiente exerceu influência direta sobre a velocidade de secagem, com os episódios de chuva e alta umidade relativa retardando a perda de água e os períodos secos acelerando-a (Remki et al., 2012).

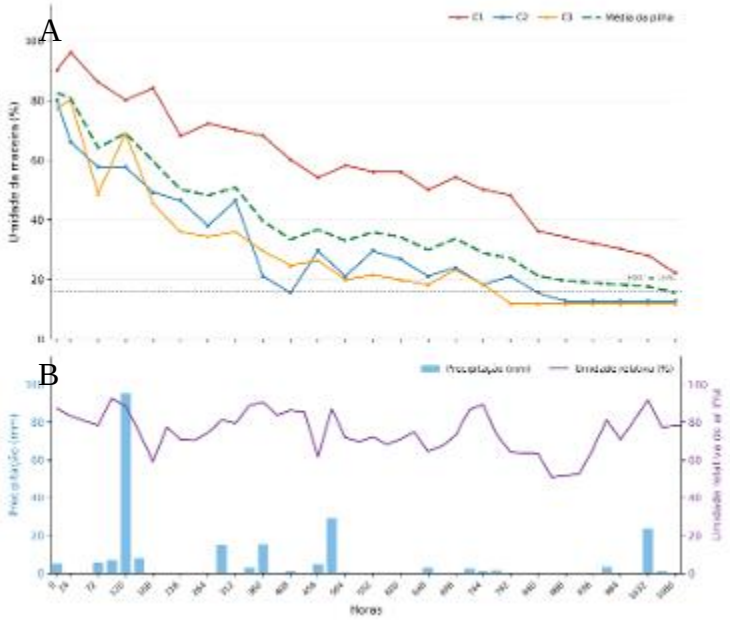


Figura 1 – A) Curvas de secagem individuais e umidade média da pilha. B) precipitação diária e à umidade relativa do ar em Santa Maria/RS no período.

A retirada da pilha ocorreu abaixo do PSF, com teor médio de umidade de 21,12%, enquanto o teor de equilíbrio higroscópico (EMC) estimado para Santa Maria foi de aproximadamente 16% (Neris, 2024). Essa diferença indica que a madeira ainda não havia alcançado a condição de equilíbrio com o ambiente e, consequentemente, apresentava potencial para alterações dimensionais durante o uso (Glass & Zelinka, 2021). Abaixo do PSF, a remoção de água ligada resulta em retração da parede celular e no desenvolvimento de tensões internas associadas aos gradientes de umidade formados entre a superfície e o interior das peças (Yin & Liu, 2021). Dessa forma, a permanência das tábuas por período adicional de secagem poderia favorecer a redução desses gradientes e minimizar tensões residuais, contribuindo para maior estabilidade dimensional do material (Gao et al., 2023).

3.3 Defeitos de secagem

A avaliação das tábuas não identificou empenamentos, arqueamentos ou encurvamentos, indicando que a configuração da pilha, base elevada, tabiques alinhados verticalmente e cobertura contra chuva e radiação direta, foi eficiente para minimizar deformações durante a secagem. Esse resultado está de acordo com recomendações da literatura, que destacam o alinhamento dos tabiques e a distribuição uniforme da carga como fatores essenciais para o controle desses defeitos (Marques & Martins, 2002). De forma semelhante, Mangini et al. (2023) observaram baixa incidência de empenamentos em *P. dubium* submetida à secagem ao ar livre, indicando que o empilhamento adequado favorece a estabilidade geométrica das peças.

Apesar da ausência dessas deformações, as tábuas apresentaram alteração de coloração, rachaduras de topo e manchas fúngicas. Isso indica que o empilhamento, embora eficiente para controlar deformações globais, não evitou defeitos decorrentes da secagem diferencial e da retenção localizada de umidade. Resultados semelhantes foram relatados por Mangini et al. (2023) para *P. dubium*, em que as rachaduras de topo permaneceram entre os principais defeitos observados após a secagem ao ar livre.

A alteração de coloração foi atribuída à oxidação de extrativos durante a exposição ao ar. Entretanto, esse escurecimento não ocorreu nas regiões de contato entre as tábuas e os tabiques, onde houve maior incidência de fungos manchadores. Essa associação sugere que essas regiões permaneceram com maior teor de umidade devido à menor circulação de ar, condição que reduziu a oxidação superficial dos extrativos e favoreceu o desenvolvimento fúngico (Isola et al., 2024).

As rachaduras de topo foram associadas à rápida perda de água pelas extremidades das tábuas, regiões mais expostas ao ambiente e sujeitas aos maiores gradientes de umidade. A formação dessas fissuras está relacionada ao desenvolvimento de tensões de secagem decorrentes da retração diferencial abaixo do ponto de saturação das fibras (Yin & Liu, 2021). Esse mecanismo também foi descrito por Fu et al. (2023) e Gao et al. (2023), que apontam os gradientes de umidade e a retração anisotrópica como os principais responsáveis pela formação de rachaduras durante a secagem.

A quantificação das rachaduras evidenciou diferenças entre as peças. A tábua 6 apresentou o maior comprimento de rachadura (15,04 cm), equivalente a 10,59% do comprimento total, enquanto as tábuas 7 e 11 apresentaram valores de 5,91% e 4,77%, respectivamente. Essa variação reforça a heterogeneidade observada nas curvas de secagem e sugere influência das características anatômicas na distribuição das tensões internas. Da mesma

forma, Mangini et al. (2023) observaram que, embora *P. dubium* apresente baixa suscetibilidade a empenamentos, a ocorrência de rachaduras de topo permanece frequente durante a secagem ao ar, evidenciando que esse defeito está relacionado às características intrínsecas da espécie.

4. Conclusões

As tábuas de *P. dubium* atingiram o PSF após aproximadamente 840 horas (35 dias) de secagem ao ar, com a umidade final média de 21,12%, valor superior ao equilíbrio higroscópico da região de Santa Maria. É importante destacar que esse valor médio não reflete o comportamento individual das peças, que variou entre 408 horas (17 dias, C2) e 1080 horas (45 dias, C1), tampouco o período total de monitoramento do experimento (56 dias, entre setembro e novembro de 2025). Essa heterogeneidade reforça a necessidade de prolongar o período de secagem para minimizar retrações durante o uso da madeira. As amostras apresentaram elevada variabilidade higroscópica, mesmo entre peças provenientes da mesma tora, refletida nos diferentes tempos para atingir o PSF e na intensidade das rachaduras de topo. Apesar dessa heterogeneidade, não foram observados defeitos estruturais severos, como colapso ou empenamentos, evidenciando a eficiência do sistema de empilhamento no controle das deformações.

5. Referências bibliográficas

Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2022). *ABNT NBR 7190: Projeto de estruturas de madeira — Parte 3: Métodos de ensaio para corpos de prova isentos de defeitos para madeiras de florestas nativas*.

Carvalho, P. E. R. (2003). *Espécies Arbóreas Brasileiras*. Embrapa Florestas.

Eloy, E., Trevisan, R., Piecha, T. D. S., Fontoura, M. R., Dalla Costa, H. W., & Caron, B. O. (2021). ANATOMY AND DRYING OF WOOD OF FOUR SPECIES FROM AN AGROFORESTRY SYSTEM. *FLORESTA*, *51*(4), 910. https://doi.org/10.5380/rf.v51i4.74061

Fu, Z., Chen, J., Zhang, Y., Xie, F., & Lu, Y. (2023). Review on Wood Deformation and Cracking during Moisture Loss. *Polymers*, *15*(15), 3295. https://doi.org/10.3390/polym15153295

Gao, Y., Fu, Z., Fu, F., Zhou, Y., Gao, X., & Zhou, F. (2023). The formation mechanism of microcracks and fracture morphology of wood during drying. *Drying Technology*, *41*(8), 1268–1277. https://doi.org/10.1080/07373937.2022.2139270

Glass, S. V., & Zelinka, S. L. (2021). Moisture Relations and Physical Properties of Wood. In R. J. Ross (Ed.), *Wood Handbook: Wood as an Engineering Material*. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory.

Isola, D., Lee, H.-J., Chung, Y.-J., Zucconi, L., & Pelosi, C. (2024). Once upon a Time, There Was a Piece of Wood: Present Knowledge and Future Perspectives in Fungal Deterioration of Wooden Cultural Heritage in Terrestrial Ecosystems and Diagnostic Tools. *Journal of Fungi*, *10*(5), 366. https://doi.org/10.3390/jof10050366

Li, X., Wang, X., & Zhang, M. (2017). An Investigation of the Drying Rate of Water in Wood at

Different Relative Humidities Studied by Time Domain Nuclear Magnetic Resonance. *BioResources*, *12*(2), 2991–3000.

Lima, I. L. de, Longui, E. L., Cerato, C., Freitas, M. L. M., Florsheim, S. M. B., & Zanatto, A. C. S. (2015). BASIC SPECIFIC GRAVITY AND ANATOMY OF Peltophorum dubium WOOD AS A FUNCTION OF PROVENANCE AND RADIAL POSITION. *Revista Do Instituto Florestal*, *27*(1), 18–29. https://doi.org/10.4322/rif.2015.002

Liu, H., Ke, M., Zhou, T., & Sun, X. (2023). Effect of Samples Length on the Characteristics of Moisture Transfer and Shrinkage of Eucalyptus urophylla Wood during Conventional Drying. *Forests*, *14*(6), 1218. https://doi.org/10.3390/f14061218

Longui, E. L., Lima, I. L., Galão, A. T. D., Machado, J. A. R., Ranzini, M., Ballarin, A. W., Freitas, M. L. M., & Sebbenn, A. M. (2025). GENETIC PARAMETERS AND CORRELATIONS OF GROWTH AND WOOD PROPERTIES IN Peltophorum dubium. *Revista Do Instituto Florestal*, *37*, 1–12. https://doi.org/10.24278/rif.2025.37e962

Mangini, T. de S., Candaten, L., Trevisan, R., Eloy, E., Bandera, E., & Zanchetta, L. da S. (2023). Taxa e defeitos de secagem ao ar livre de quatro espécies provenientes de um sistema agroflorestal. *Scientia Forestalis*, *51*, 1–10. https://doi.org/10.18671/scifor.v51.22

Marques, M. H. B., & Martins, V. A. (2002). *Secagem da Madeira*. Laboratório de Produtos Florestais.

Mendoza, Z. M. dos S. H. de, Borges, P. H. de M., & Pierin, L. C. (2017). Coeficiente de rendimento em madeira serrada de oito espécies nativas de Mato Grosso. *Nativa*, *5*. https://doi.org/10.5935/2318-7670.v05nespa16

Muñoz, F., & Moya, R. (2008). Moisture content variability in kiln-dried Gmelina arborea wood: effect of radial position and anatomical features. *Journal of Wood Science*, *54*(4), 318–322. https://doi.org/10.1007/s10086-008-0954-8

Neris, A. P. S. (2024). *Atualização dos mapas de umidade de equilíbrio e de risco de apodrecimento da madeira em condições de serviço no Brasil*.

Perré, P. (2007). *FUNDAMENTALS OF WOOD DRYING*. A.R.BO.LOR.

Remki, B., Abahri, K., Tahlaiti, M., & Belarbi, R. (2012). Hygrothermal transfer in wood drying under the atmospheric pressure gradient. *International Journal of Thermal Sciences*, *57*, 135–141. https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2012.02.005

Siau, J. F. (1984). *Transport Processes in Wood* (Vol. 2). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-69213-0

Thybring, E. E., Fredriksson, M., Zelinka, S. L., & Glass, S. V. (2022). Water in Wood: A Review of Current Understanding and Knowledge Gaps. *Forests*, *13*(12), 2051. https://doi.org/10.3390/f13122051

Yang, L., Zheng, J., & Huang, N. (2022). The Characteristics of Moisture and Shrinkage of Eucalyptus urophylla × E. Grandis Wood during Conventional Drying. *Materials*, *15*(9), 3386. https://doi.org/10.3390/ma15093386

Yin, Q., & Liu, H.-H. (2021). Drying Stress and Strain of Wood: A Review. *Applied Sciences*, *11*(11), 5023. https://doi.org/10.3390/app11115023

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Tolerância de fungos apodrecedores de madeira aos constituintes do arseniato de cobre cromatado - CCA

Caroline Palacio de Araujo[1]; Damielle Leite Figueiredo[1]; Juarez Benigno Paes[1]; Genivaldo Alves da Silva[2]; Elisandro Ricardo Drechsler dos Santos[2]; Marcela Monteiro[2]; Emanuel Bizareli de Moraes[1]

[1] Universidade Federal do Espírito Santo – UFES; [2] Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC.

Resumo: A biorremediação é uma estratégia na mitigação da contaminação ambiental causada pela madeira tratada com arseniato de cobre cromatado (CCA), sendo necessário identificar organismos resistentes aos diferentes constituintes químicos. Assim, objetivou-se analisar a tolerância de fungos apodrecedores de madeira a meios de cultura suplementados com cromo (Cr), cobre (Cu) e arsênio (As). Os fungos foram inoculados em meios de cultura, de forma isolada para Cr, Cu e As, nas concentrações 4 e 6 g L^{-1}. Analisou-se o crescimento (%) por meio da mensuração da área fúngica com o software ImageJ. Os fungos *Nodulisporium verrucosum*, *Gloeophyllum sepiarium*, *Talaromyces amestolkiae* cresceram nos meios suplementados com Cr nas duas concentrações testadas (4 e 6 g L^{-1}). Apenas o fungo *T. amestolkiae* apresentou crescimento micelial em exposição ao As nas concentrações de 4 e 6 g L^{-1}. Não houve crescimento nos meios suplementados com Cu. Conclui-se que os constituintes do CCA afetam distintamente o crescimento dos fungos apodrecedores de madeira testados.

Palavras-chave: Crescimento fúngico; Biorremediação; Biodegradação da madeira.

Resistance of wood-decaying fungi to the constituents of chromated copper arsenate (CCA)

Abstract: Bioremediation is a strategy for mitigating environmental contamination caused by wood treated with chromated copper arsenate (CCA), making it necessary to identify organisms that are resistant to its different chemical constituents. Thus, this study aimed to evaluate the resistance of wood-decaying fungi to culture media supplemented with chromium (Cr), copper (Cu), and arsenic (As). The fungi were inoculated into culture media, in isolation, to Cr, Cu, and As, at concentrations of 4 and 6 g L^{-1}. Fungal growth (%) was assessed by measuring the fungal colony area using the ImageJ software. The fungi *Nodulisporium verrucosum*, *Gloeophyllum sepiarium*, *Talaromyces amestolkiae* grew in media supplemented with Cr at both concentrations tested (4 and 6 g L^{-1}). Only *T. amestolkiae* exhibited mycelial growth when exposed to As at concentrations of 4 and 6 g L^{-1}. No growth was observed in media supplemented with Cu. It was concluded that the constituents of CCA distinctly affect the growth of the wood-decaying fungi evaluated.

Keywords: Fungal growth; Bioremediation; Wood biodegradation.

1. Introdução

A madeira desempenha um importante papel em vários setores industriais, conforme apresentado pela Indústria Brasileira de Árvores – IBÁ (2025), com grande expansão das florestas plantadas e o aumento das exportações de produtos florestais. Entretanto, por causa de sua constituição química, torna-se suscetível à biodegradação por fungos apodrecedores, principalmente quando expostas a condições de intemperismo (Brocco et al., 2025; Medeiros et al., 2025). Visando aumentar a durabilidade da madeira ao ataque de organismos xilófagos, são amplamente utilizados tratamentos químicos, como a impregnação em CCA, aumentando décadas de vida útil da madeira (Atiang' et al., 2025).

O CCA é muito utilizado na proteção contra organismos xilófagos, sendo constituído por Cr, Cu e As (Brito et al., 2022). Pela sua constituição química tóxica, o descarte dos resíduos de madeiras impregnados com CCA torna-se um caso de saúde pública e ambiental (Katoozi et al., 2023). O descarte inadequado desses resíduos incentiva futuras pesquisas focadas na descontaminação da madeira tratada (Atiang' et al., 2025). A biorremediação é uma estratégia com potencial na mitigação da contaminação ambiental causada pelo uso do CCA no tratamento da madeira, sendo considerada sustentável em comparação a outras abordagens químicas. Muitos estudos buscam identificar organismos resistentes aos diferentes constituintes utilizados nos preservativos de madeira, além de compreender os mecanismos e princípios metabólicos envolvidos (Xing et al., 2020).

A capacidade de biorremediação de algumas espécies de fungos de madeira é associada a alta produção de ácido oxálico. Esse potencial foi relatado nos fungos de podridão parda *Laetiporus sulphureus* e *Fomitopsis palustris* cuja produção de ácido oxálico permitiu a remoção de 85 e 100% do As, respectivamente. O acúmulo de ácido oxálico ocasionou a acidificação do substrato e uma maior solubilidade dos constituintes, causando a lixiviação desses compostos da madeira (Kartal et al., 2004). O aumento da acidez da madeira é um fator chave na lixiviação dos componentes do CCA, com aumento de até 100% de lixiviação em pH 3,5. O contrário também foi observado, com apenas 9% de lixiviação desses componentes em pH 8,5 (Warner & Solomon, 1990).

A descontaminação de madeiras tratadas com CCA por meio da biorremediação é uma estratégia que visa a redução dos impactos desse preservativo no ambiente (Atiang' et al., 2025). Isso pode ser observado em linhagens ou variantes genéticas da espécie *Serpula lacrymans* na remoção do Cu em madeira tratada, que variou entre 80 a 90% (Kartal et al., 2015). Outras espécies, como *F. radiculosa*, se destaca na remediação do elemento Cu (96%) em resíduos de

eucalipto tratados com CCA. E as espécies *A. xantha*, *W. cocos* e *F. radiculosa* na remoção dos metais pesados As (59–85%) e Cr (38–61%) (Costa et al., 2022).

Assim, objetivou-se analisar a tolerância de fungos apodrecedores de madeira a meios de cultura suplementados com Cr, Cu e As, para indicar potenciais espécies para futuros estudos de biorremediação de madeiras tratadas.

2. Material e métodos

Inoculação e preparo do meio de cultura

Foram testados três fungos apodrecedores de madeira (*Nodulisporium verrucosum*, *Gloeophyllum sepiarium*, *Talaromyces amestolkiae*) isolados em mourões de *Eucalyptus* spp., com tempo de serviço entre 8 e 10 anos. As amostras de madeira foram coletadas em áreas rurais no município de Jerônimo Monteiro, Espírito Santo, Brasil. Os fungos isolados foram identificados geneticamente no MIND.Funga – Monitoring and Inventorying Neotropical Diversity of Fungi, Laboratório de Micologia, da UFSC.

Os fungos foram inoculados em placas de Petri contendo meio de cultura Ágar Sabouraud com cloranfenicol (65,05 g L^{-1}) suplementado, de forma isolada para os elementos cromo (Cr), cobre (Cu) e arsênio (As) nas concentrações 4 e 6 g L^{-1}. Utilizou-se como fonte de Cr, As e Cu os reagentes químicos dicromato de potássio ($K_2Cr_2O_7$), o trióxido de diarsênio (As_2O_3) e o sulfato de cobre pentahidratado ($CuSO_4 \cdot 5H_2O$), respectivamente. As concentrações foram expressas em base óxida, conforme a formulação do CCA, fornecendo concentrações equivalentes ao CrO_3 (trióxido de cromo), As_2O_5 (pentóxido de arsênio) e CuO (óxido de cobre) (Figueiredo, 2025).

Foram utilizadas três repetições por tratamento, sendo estes mantidos em sala climatizada com temperatura e umidade relativa controlada (25 ± 2 °C e 65 ± 5%, respectivamente) por um período de cinco dias de incubação.

Crescimento fúngico

O crescimento fúngico (%) foi mensurado com uso do software ImageJ por meio da determinação da área fúngica colonizada e da área total do meio de cultura na placa de Petri. As imagens foram obtidas contendo uma escala de referência (régua milimetrada) visando a calibração do software. Foi delimitada uma reta com distância conhecida de 1 cm na escala, estabelecendo-se uma relação entre pixels e unidades de medida (Figura 1A). Após a calibração, realizou-se as delimitações da colônia fúngica (Figura 1B) e do meio de cultura (Figura 1C) para

a mensuração da área em cm^2. Posteriormente, os valores das áreas obtidos em cada tratamento foram convertidos em porcentagem de crescimento pela Equação (1).

$$Crescimento = \frac{Área\ da\ colônia}{Área\ total\ do\ meio} * 100 \quad (1)$$

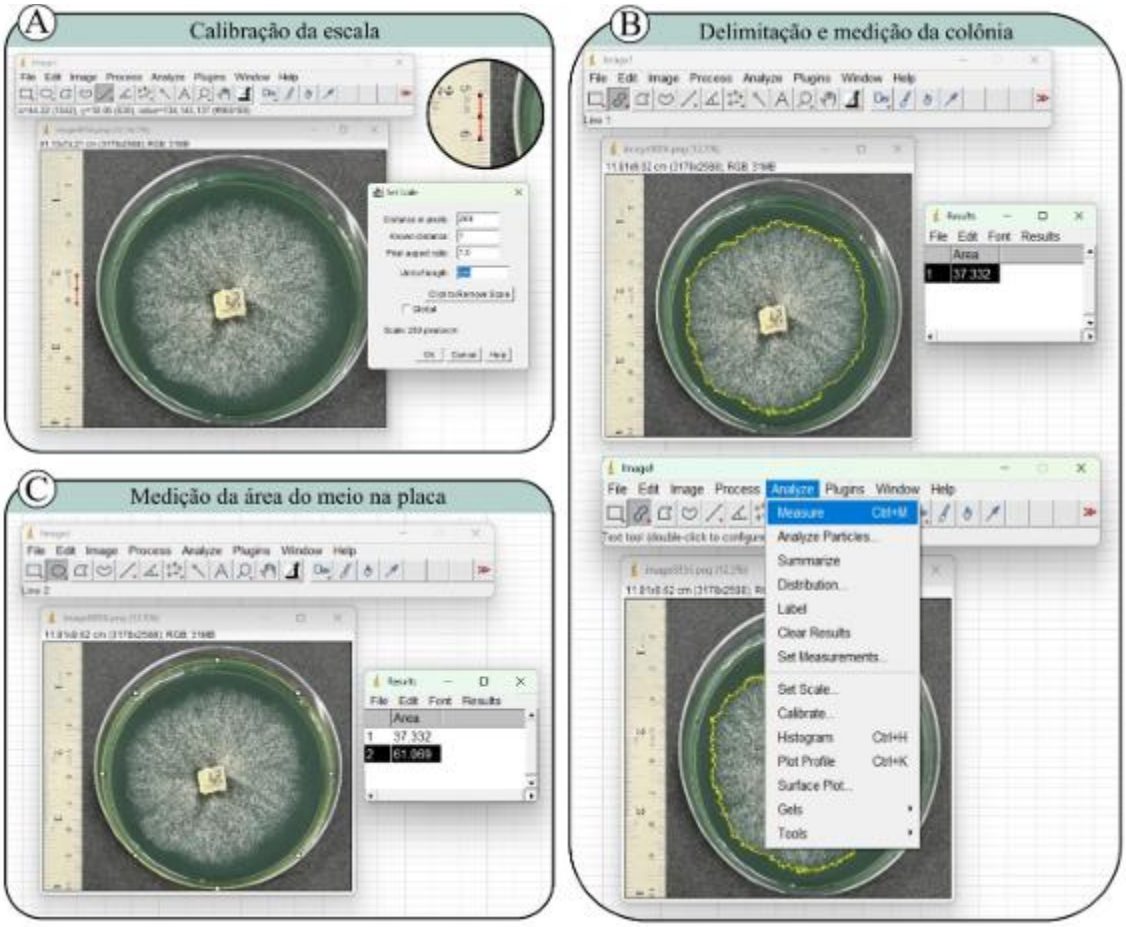


Figura 1 – Esquema representativo das medições de crescimento por meio da delimitação das áreas de crescimento fúngico e do meio de cultura.

Análise estatística

O experimento de crescimento fúngico (%) foi realizado em delineamento inteiramente casualizado, com três repetições por tratamento. Foram utilizados três elementos químicos (Cr, Cu e As) e duas concentrações (4 e 6 g L^{-1}) para cada elemento. Os resultados foram expressos por meio dos valores médios e dos desvios-padrão para cada tratamento.

3. Resultados e discussão

O crescimento fúngico das espécies *N. verrucosum* e *G. sepiarium* foi inibido em meios suplementados com As e Cu. Para a espécie *T. amestolkiae*, a inibição ocorreu somente em meios suplementados com Cu. O metal pesado Cr não apresentou efeito tóxico no crescimento fúngico das espécies estudadas, as quais apresentaram maior valor médio de crescimento na maior concentração de 6 g L^{-1} (Figura 2A, B).

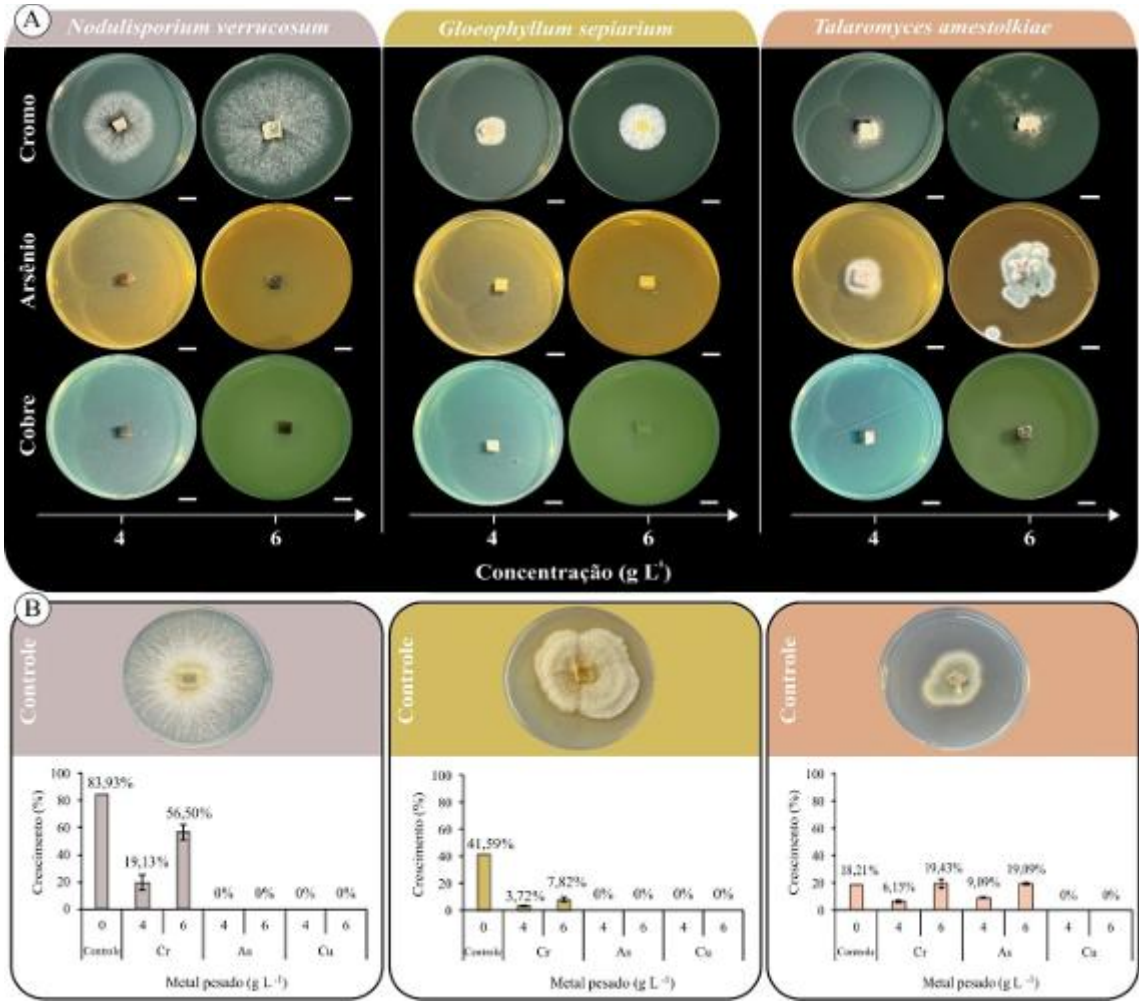


Figura 2 – Crescimento fúngico em meios suplementados com Cr, Cu e As em sua forma isolada, nas concentrações 4 e 6 g L^{-1} (A) e porcentagem de crescimento para cada tratamento pelo programa ImageJ, incluindo o controle (B). Fonte: Imagens do controle (Figueiredo, 2025). Escala: 1 cm.

A inibição do crescimento observada, principalmente na presença de As e Cu, está associada às funções que estes metais desempenham quando incorporados nas formulações dos preservativos de madeira. O CCA é um preservativo de madeira constituído por Cr (47,5%), Cu (18,5%) e As (34,0%) na forma de óxidos (Morais et al., 2021). A capacidade de retenção do As

e Cu nas paredes celulares da madeira depende do Cr, sendo esse utilizado principalmente como agente fixador em função da sua alta afinidade pelas moléculas de lignina (Singh et al., 2014). Isso explica a baixa toxicidade observada no crescimento das espécies fúngicas em Cr.

Já a atividade antifúngica do CCA depende da presença de Cu e a capacidade inseticida, da presença do As (Morais et al., 2021). Estudos com madeiras tratadas com Cu evidenciam que esse componente auxilia para uma menor perda de massa quando expostas aos fungos apodrecedores dos tipos podridão branca (*Trametes versicolor*) e podridão parda (*Poria* (≈ *Rodhonia*) *placenta*), principalmente na concentração de 3 g L^{-1} de Cu (Pařil et al., 2017). Esses resultados explicam o observado nesse estudo, no qual o Cu apresentou alta toxicidade sobre o crescimento dos três fungos estudados.

O fungo *T. amestolkiae* apresentou capacidade de crescimento micelial em meio suplementado com As, indicando tolerância a esse elemento químico. Em estudo semelhante, com o fungo *Serendipita indica*, a tolerância ao As foi atribuída a capacidade do metabolismo em produzir enzimas antioxidantes (superóxido dismutase, catalase, glutationa redutase, glutationa-S-transferase) capazes de diminuir a concentração das espécies reativas de oxigênio formadas durante o estresse oxidativo, permitindo a desintoxicação (via glutationa) e a homeostase celular (Shukla et al., 2025).

Conforme observado nesse estudo, a tolerância fúngica a metais pesados varia entre as espécies, reforçando a necessidade de estudos que visem a identificação desses organismos e o seu potencial de uso em processos de biorremediação. Isso foi observado por Figueiredo (2025), a qual identificou três espécies potenciais (*Penicillium wotroi*, *Penicillium citreosulfuratum*, e *Paecilomyces lecythidis*) capazes de crescer em meios suplementados com Cr, Cu e As em concentrações elevadas de até 8 g L^{-1} de cada elemento analisado individualmente. Também foi evidenciado a capacidade do fungo *P. lecythidis* no crescimento em meio suplementado com CCA (6,5 g L^{-1}).

4. Conclusões

Observa-se um alto potencial inibitório no crescimento fúngico em meios suplementos com Cu, seguido pelo As (exceto para *T. amestolkiae*). O Cr exerceu o menor efeito tóxico no crescimento para as três espécies estudadas, permitindo um maior desenvolvimento micelial, principalmente na maior concentração (6 g L^{-1}). O fungo *T. amestolkiae* demonstrou tolerância ao As, mesmo em concentrações elevadas (6 g L^{-1}), indicando potencial para futuros estudos

voltados à remediação desse metal pesado. Os resultados demonstram como os constituintes do CCA afetam de forma distinta o crescimento dos fungos apodrecedores de madeira testados.

5. Agradecimentos

Os autores agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação do Espírito Santo (FAPES) pela concessão de bolsa de Pós-Doutorado à Drª. Caroline Palacio de Araujo, no âmbito do Edital FAPES nº 12/2024 - Fixação e Aperfeiçoamento de Doutores no Espírito Santo - PROFIX 2024 (Processo nº 2025-93R7Z, Termo de Outorga nº 416/2025), sob a coordenação do Prof. Dr. Juarez Benigno Paes.

838. **Referências bibliográficas**

Atiang', S., Ndunda, E. N., & Okello, V. A. (2025). Advances in removal of chromated copper arsenate elements in wood waste, contaminated water and soils. Frontiers in Environmental Chemistry, 6, 1452837. https://doi.org/10.3389/fenvc.2025.1452837

Brito, T. R., Guedes, D. P., Silva, J. R. M. Baraúna, E. E. P., & Paes, J. B. (2022). Influence of chromated copper arsenate type-C concentration on the quality of treated fence posts. Research, Society and Development, 11(4), e21411427088. http://dx.doi.org/10.33448/rsd-v11i4.27088

Brocco, V. F., Costa, L. G. D., Paes, J. B., Kirker, G. T., & Bishell, A. B. (2025). Extracts from teak wood industrial waste: decay performance of treated wood after artificial weathering. Holzforschung, 79(2-3), 152-167. https://doi.org/10.1515/hf-2024-0085

Costa, L. G., Brocco, V. F., Paes, J. B., Kirker, G. T., & Bishell, A. B. (2022). Biological and chemical remediation of CCA treated eucalypt poles after 30 years in service. Chemosphere, 286, 131629. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.131629

Figueiredo, D. L. (2025). Isolamento e identificação de fungos lignocelulolíticos capazes de mitigar CCA em madeira tratada (dissertação de mestrado). Universidade Federal do Espírito Santo.

Indústria Brasileira de Árvores – IBÁ (2025). Relatório Anual 2025. IBÁ. https://iba.org/wp-content/uploads/2025/10/relatorioAnual2025.pdf

Kartal, S. N., Munir, E., Kakitani, T., & Imamura, Y. (2004). Bioremediation of CCA-treated wood by brown-rot fungi *Fomitopsis palustris*, *Coniophora puteana*, and *Laetiporus sulphureus*. Journal of Wood Science, 50(2), 182-188. https://doi.org/10.1007/s10086-003-0544-8

Kartal, S. N., Terzi, E., Yılmaz, H., & Goodell, B. (2015). Bioremediation and decay of wood treated with ACQ, micronized ACQ, nano-CuO and CCA wood preservatives. International Biodeterioration & Biodegradation, 99, 95-101. http://dx.doi.org/10.1016/j.ibiod.2015.01.004

Katoozi, E., Liow, J. L., Khennane, A., & Pignatta, G. (2023). Leachability of spent chromated copper arsenate (CCA)-treated wood encapsulated in geopolymer cement. In *Mediterranean architecture and the green-digital transition: selected papers from the world renewable energy congress med green forum* 2022 (pp. 657-666). Cham: Springer International Publishing.

Medeiros, J. R., Paes, J. B., Medeiros Neto, P. N., Araujo, C. P., Andrade, J. K. B., França, T. S. F. A., Lopez, Y. M., & Figueiredo, D. L. (2025). Durability of heat-treated eucalyptus wood against decay fungi. BioResources 20(4), 10051–10068. https://doi.org/10.15376/biores.20.4.10051-10068

Morais, S., Fonseca, H. M., Oliveira, S. M., Oliveira, H., Gupta, V. K., Sharma, B., & Lourdes Pereira, M. (2021). Environmental and health hazards of chromated copper arsenate-treated wood: A review. International journal of environmental research and public health, 18(11), 5518. https://doi.org/10.3390/ijerph18115518

Pařil, P., Baar, J., Čermák, P., Rademacher, P., Prucek, R., Sivera, M., & Panáček, A. (2017). Antifungal effects of copper and silver nanoparticles against white and brown-rot fungi. Journal of Materials Science, 52(5), 2720-2729. https://doi.org/10.1007/s10853-016-0565-5

Shukla, J., Singh, S., Dixit, S., Kushwaha, A. S., Mohd, S., Saji, J., & Kumar, M. (2025). Efficient Removal of arsenic from the environment by endophytic fungus *Serendipita indica* through bio-accumulation in cells and adsorption on the cell wall. Environmental Technology & Innovation, 39, 104229. https://doi.org/10.1016/j.eti.2025.104229

Singh, A. P., & Singh, T. (2014). Biotechnological applications of wood-rotting fungi: A review. Biomass and Bioenergy, 62, 198-206. https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2013.12.013

Warner, J. E., & Solomon, K. R. (1990). Acidity as a factor in leaching of copper, chromium and arsenic from CCA-treated dimension lumber. Environmental Toxicology and chemistry, 9(11), 1331-1337. https://doi.org/10.1002/etc.5620091102

Xing, D., Magdouli, S., Zhang, J., & Koubaa, A. (2020). Microbial remediation for the removal of inorganic contaminants from treated wood: Recent trends and challenges. Chemosphere, 258, 127429. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.127429

a.

b. Tratamento da madeira de seringueira com óleos de *Schinus* spp. contra o fungo *Pleurotus ostreatus*

c.

Matheus Jardim dos Santos[1]; Vinícius José Fernandes[1]; Cláudio Eduardo Rodrigues-Santos[1]; Henrique Trevisan[1]

[1] Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro - UFRRJ

Resumo: A madeira de *Hevea brasiliensis* apresenta potencial de utilização na indústria madeireira, porém sua baixa durabilidade natural frente a organismos xilófagos limita seu uso. O presente estudo avaliou a eficiência dos óleos essenciais (OE) das folhas de *Schinus terebinthifolius* e *Schinus molle* na agregação de resistência da madeira de *H. brasiliensis* ao fungo xilófago *Pleurotus ostreatus*. Os corpos de prova foram tratados com OE nas concentrações de 10; 25; 50 e 100%, utilizando óleo mineral como diluente, e submetidos à ação do fungo, conforme norma AWPA E10-16. O óleo de *S. terebinthifolius* elevou a resistência da madeira nas concentrações 25; 50 e 100%, tornando-a resistente nas duas primeiras e altamente resistente na terceira. Para *S. molle*, o aumento ocorreu nas concentrações 50 e 100%, tornando a madeira resistente. Conclui-se que o tratamento da madeira de *H.* brasiliensis com OE das folhas de *S. terebinthifolius* e *S. molle* aumenta a resistência dessa madeira à ação do fungo *P. ostreatus*.

Palavras-chave: Preservação da madeira; Óleo essencial; Produtos naturais.

Treatment of *seringueira* wood with essential oils from *Schinus* spp. against *Pleurotus ostreatus*

Abstract: *Hevea brasiliensis* wood has potential for use in the wood industry; however, its low natural durability against xylophagous organisms limits its use. The present study evaluated the effectiveness of leaf essential oils (EO) from *Schinus terebinthifolius* and *Schinus molle* in enhancing the resistance of *H. brasiliensis* wood against the wood-decay fungus *Pleurotus ostreatus*. Wood specimens were treated with EO at concentrations of 10, 25, 50, and 100%, using mineral oil as a diluent, and exposed to the fungus according to the AWPA E10-16 standard. *S. terebinthifolius* oil increased wood resistance at concentrations of 25, 50, and 100%, resulting in wood classified as resistant at the first two concentrations and highly resistant at the highest concentration. For *S. molle*, increased resistance was observed at concentrations of 50 and 100%, resulting in wood classified as resistant. It is concluded that the treatment of *H. brasiliensis* wood with leaf EO from *S. terebinthifolius* and *S. molle* increases the resistance of this wood against the fungus *P. ostreatus*.

Keywords: Wood preservation; Essential oil; Natural products.

1. Introdução

A madeira é um dos materiais naturais mais versáteis utilizados pela humanidade, destacando-se por sua ampla utilização nos setores da construção civil, mobiliária e energia (Junior; Silva; Soares, 2017). Além de ser um recurso renovável, apresenta resistência mecânica, trabalhabilidade e armazena carbono (Vidal *et al*., 2015).

Por outro lado, processos de deterioração abióticos e bióticos podem afetar a durabilidade desse material e dos produtos derivados. Dentre os agentes bióticos, os fungos xilófagos apodrecedores assumem papel de destaque devido à sua capacidade de utilizar os componentes estruturais da parede celular como fonte de nutrientes (Daniel, 2016; Couturier *et al.*, 2018). Esses organismos secretam enzimas capazes de deteriorar materiais lignocelulósicos, promovendo alterações significativas na estrutura anatômica e química da madeira (Silva, 2020).

Apesar dos fungos xilófagos desempenharem importante função ecológica nos ecossistemas florestais, participando do processo de ciclagem de nutrientes, quando associados à madeira em serviço, tornam-se responsáveis por prejuízos econômicos consideráveis (Silva, 2020). No grupo dos Basidiomicetos, o fungo *Pleurotus ostreatus* é um organismo amplamente conhecido pela sua capacidade de degradação dos componentes ligno-celulósicos, com alta eficiência enzimática no processo de deterioração, sendo um organismo amplamente empregado em ensaios de laboratório (Fernández-Fueyo *et al.*, 2016; Andrade-Alvarado *et al*., 2025).

A árvore *Hevea brasiliensis* é fonte de látex, que serve para produção de borracha (Boadu *et al.*, 2022). Ao final do ciclo de extração desse produto são abatidas, o que, consequentemente, promove oferta significativa de madeira dessa espécie florestal (Eufrade, 2015). Essa situação tem promovido o interesse do setor madeireiro, no sentido de viabilizar o emprego otimizado desse material (Eufrade, 2015; Boadu *et al*., 2022). Nesse sentido, a madeira de seringueira apresenta baixa durabilidade frente à ação de organismos xilófagos, o que sinaliza a necessidade de tratamento (De Almeida *et al.*, 2026).

Nesse contexto, historicamente a preservação da madeira tem sido realizada por meio de produtos químicos a base de metais pesados, capazes de conferir elevada proteção contra organismos xilófagos (Vettraino *et al*., 2023). Contudo, embora muito eficientes, esses produtos químicos apresentam restrições devido sua toxicidade em diferentes lugares do mundo. Essas

restrições ocorrem em função de dúvidas sobre a persistência ambiental, riscos potenciais à saúde humana e ao descarte da madeira tratada (Broda, 2020; Ahmed *et al*., 2026).

Diante desse contexto, diversos estudos e pesquisas têm sido desenvolvidos para buscar compostos naturais como alternativas ao tratamento convencional (Broda, 2020; Ahmed *et al*., 2026). Entre esses compostos naturais, os óleos essenciais vêm se destacando por apresentar elevada diversidade química como também atividade biológica, tendo substâncias frequentemente associadas a propriedades antimicrobianas, antifúngicas e inseticidas (Broda, 2020).

Embora existam evidências do potencial dos óleos essenciais de espécies do gênero *Schinus* em inibir fungos, são inexistentes os estudos voltados para a sua aplicação na proteção da madeira frente a fungos xilófagos. Diante disso, torna-se oportuno avaliar a eficiência desses óleos no aumento da resistência biológica da madeira de *Hevea brasiliensis.*

Diante do exposto, o presente estudo teve por objetivo avaliar eficiência do tratamento da madeira de *Hevea brasiliensis* (seringueira) com óleos essenciais da folha de *Schinus therebinthifolius* e *Schinus molle* na agregação de resistência ao fungo xilófago Pleurotus *ostreatus*, em condições de laboratório.

2. Material e métodos

A madeira de *H. brasiliensis* foi adquirida em um reflorestamento destinado a produção de látex, no município de Porto Seguro - BA. O processamento da madeira procedeu-se pela fabricação de sarrafos retirados do tronco principal e posteriormente, foram utilizados para confeccionar 100 corpos-de-prova (2.5 x 2.5 x 0.9), conforme recomendações da norma AWPA E10-16.

Para obtenção dos óleos essenciais, foram selecionados três indivíduos adultos das espécies florestais *Schinus therebinthifolius* (22°45'22"S; 43°41'50"W) e *Schinus molle* (22°46'14"S; 43°41'07"W), cultivados na Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (UFRRJ). De cada indivíduo foram coletados ramos, dos quais as folhas foram separadas em laboratório. Em seguida, 500 g de folhas foram pesadas e trituradas em liquidificador laboratorial com 100 mL de água destilada. A solução foi transferida para balão volumétrico e aquecida por manta térmica até ebulição, para viabilizar a extração do óleo essencial em aparelho tipo Clevenger, por hidrodestilação. O processo foi conduzido em ciclos de 60 minutos, repetidos sucessivamente, até a obtenção de aproximadamente 20 mL de óleo essencial de cada espécie florestal.

Os óleos puros de *S. terebinthifolius* e *S. molle* foram diluídos em óleo mineral puro à 10; 25 e 50%. Procedimento realizado em capela de fluxo laminar horizontal. Os óleos diluídos foram armazenados em frascos de vidro esterilizados (10mL), selados com tampa e armazenados em câmara fria à 0º C. Os tratamentos aplicados à madeira constituíram-se de óleo puro de *S. terebinthifolius* e *S. molle* e nas diluições mencionadas. A testemunha foi constituída de madeira natural. A incorporação dos óleos nas amostras se deu via pincelamento diretamente nas amostras, em duas demãos. O delineamento experimental foi constituído de dez repetições para cada condição de tratamento.

Após esse procedimento, os corpos de prova foram climatizados em estufa B.O.D. à 24 ± 2 ºC e a 65% ± 5% de umidade relativa, sendo pesados e expostos à luz ultravioleta, por 30 minutos em capela de fluxo laminar.

O ensaio com o fungo seguiu as diretrizes da norma AWPA E10-16. Para tanto, utilizou-se 50 frascos de vidro com capacidade de 400 mL, cada um contendo 180 g de solo e 50 mL de água destilada. Nestes frascos foram adicionadas lâminas de *Pinus* spp, utilizadas como substrato inicial para o desenvolvimento do fungo, sendo todo o conjunto posteriormente esterilizado em autoclave. Após a esterilização, em cada lâmina inoculou-se o fungo *Pleurotus ostreatus*, cultivado em meio de cultura BDA.

Após 15 dias, período necessário para o desenvolvimento do fungo nas lâminas, os corpos de prova previamente tratados, aclimatados e pesados, foram inseridos nos frascos sob as lâminas, sendo acomodadas duas amostras por frasco, permanecendo nesta condição por quatro meses. Decorrido esse intervalo, as amostras foram retiradas dos frascos, limpas e novamente aclimatadas nas mesmas condições anteriores. A perda de massa foi determinada com base na diferença entre a massa inicial e a massa final dos corpos de prova, sendo os resultados expressos em porcentagem. Os valores calculados foram utilizados para enquadrar a madeira em classes de resistência, conforme critérios estabelecidos pela AWPA E30-16. Sendo assim, as amostras que perderam, em média, 0-10% de massa, foram enquadradas como altamente resistente; 11 a 24% resistente; 25 a 44% moderadamente resistente e acima de 45%, não resistente à ação de *P. ostreatus*.

A análise estatística dos dados foi realizada no software BioEstat 5.0, onde, testou-se a normalidade pelo teste de Lilliefors (5% de significância). Por conseguinte, utilizou-se o teste não paramétrico de Kruskal-Wallis, com pós-teste de SNK (5% de significância) para avaliação da variação dos postos médios, dado que os dados assumiram distribuição não normal.

3. Resultados e discussão

A perda de massa relativa da madeira natural de *H. brasiliensis*, submetida à ação do fungo *P. ostreatus* foi 33%. Por outro lado, quando essa madeira foi tratada com óleo mineral puro, registrou-se perda de massa de 25%. Já, quando o tratamento foi realizado com óleo essencial da folha de *S. terebinthifolius*, nas concentrações 10; 25; 50 e 100%, observou-se perdas de massa de: 23; 18; 18; e 9%, respectivamente. Quando se empregou o óleo essencial de *S. molle*, nas mesmas concentrações, as perdas de massa registradas foram: 26; 24; 12 e 13%, respectivamente (Tabela 1).

Tabela 1. Perda de massa percentual e classe de resistência da madeira de *Hevea brasiliensis* natural, tratada com óleo mineral e com óleo essencial de *S. terebinthifolius* e *S. molle*, em quatro concentrações, e submetida à ação do fungo *P. ostreatus*, por quatro meses, em condições de laboratório. Letras diferentes entre os valores de perda de massa expressam diferença estatística (SNK, 5% significância).

	Tratamento	Perda de massa (%)	Classe de resistência
	Testemunha	33 a	Moderadamente resistente
	Óleo Mineral	25 ± 7,1 ab	Moderadamente resistente
S. terebinthifolius	10	23 ± 7,4 ab	Resistente
	25	18 ± 9,4 bc	Resistente
	50	18 ± 5,3 cd	Resistente
	100	9 ± 0,5 d	Altamente resistente
S. molle	10	26 ± 7,2 ab	Moderadamente resistente
	25	24 ± 9,8 ab	Resistente
	50	12 ± 4,6 cd	Resistente
	100	13 ± 4,6 cd	Resistente

Sendo assim, o tratamento da madeira de *H. brasiliensis* com óleo de essencial de *S. terebinthifolius*, nas concentrações 25; 50 e 100%, proporcionou redução significativa na perda de massa, em comparação com o valor observado na madeira natural. No entanto, nas amostras tratadas com óleo de *S. molle*, observou-se que a redução significativa da perda de massa, ocorreu, somente, quando se empregou 50 e 100% de óleo essencial.

Esses registros apontam que o tratamento, nessas concentrações, com ambos óleos, agregou resistência significativa à madeira de *H. brasiliensis* ao fungo xilófago, porém o óleo de *S. terebinthifolius* foi mais eficiente. Por outro lado, o tratamento da madeira realizado em concentração de 10% dos óleos essenciais e com óleo mineral puro, não inibiu significativamente à ação de *P. ostreatus*, em relação à madeira natural (Tabela 1).

Portanto, a madeira natural de *H. brasiliensis* foi enquadrada como moderadamente resistente. Porém, quando tratada com óleo essencial da folha, de ambas espécies florestais, observou-se inibição do fungo xilófago, com consequentemente aumento de classe resistência, em comparação à madeira natural. Contudo esse aumento foi influenciado pela concentração do óleo empregada nos tratamentos.

Desta forma, para as amostras onde aplicou-se 100% de óleo de *S. terebinthifolius*, a madeira foi classificada como altamente resistente, sendo a condição de tratamento mais eficiente. Já a madeira que recebeu este óleo à 50; 25 e 10%, demostrou-se resistente à *P. ostreatus*, conforme critérios da norma AWPA E30-16 (2016). Em relação ao tratamento realizado com óleo de *S. molle*, onde empregou-se 100; 50 e 25% de concentração, também se registrou aumento da classe de resistência da madeira, tornando-a resistente ao fungo. Porém à 10% de concentração, esse aporte não ocorreu, a madeira permaneceu enquadrada na mesma classe que a madeira natural (Tabela 1).

A baixa durabilidade da madeira de *H. brasiliensis* observada neste trabalho é corroborada por De Almeida *et al.* (2026), reportando que a madeira natural de *H. brasiliensis* teve perda de massa percentual de 38,58%, frente à ação do fungo xilófago de podridão branca *Trametes versicolo*r. Para explicar esses resultados, De Almeida *et al.* (2026) associam o baixo teor de compostos fenólicos e a alta disponibilidade de polissacarídeos estruturais, como atributos que favorecem a ação fúngica. Sobre isso, Oghenekaro *et al.*, 2020; Martín, J. e López, R., 2023 explicam que essas características favorecem o estabelecimento de fungos basidiomicetos capazes de degradar componentes lignocelulósicos.

Sobre a inibição da ação de *P. ostreatus*, pelos óleos essenciais, a literatura reporta que compostos naturais presentes em óleos essenciais podem atuar como agentes protetivos da madeira, contra fungos xilófagos (Mohamed *et al.*, 2020; Trevisan *et al.*, 2026, Broda, M., 2020). Ainda, os óleos de *S. terebinthifolius* e *S. molle* tem atividade fungicida reportada (Santos *et al.*, 2010). Em fungos xilófagos, Souza (2026) observou, *in vitro*, que o óleo essencial do fruto de *S. terebinthifolius* apresentou efeito fungistático para os fungos *R. placenta* e *P. ostreatus*. Para o primeiro, a concentração de 3,5 µL/mL promoveu inibições significativas,

com redução de 32,5% na área do halo micelial e 16,1% no perímetro. Em *P. ostreatus*, o efeito foi mais pronunciado, registrando-se 36,7% de redução na área e 18,3% no perímetro, na mesma concentração. Resultados que corroboram os registros deste trabalho.

Diversos outros estudos relatam efeitos antifúngicos dos óleos estudados, entretanto, nenhum desses estudos aplica-se para a área de preservação da madeira (Mohamed *et al.*, 2020; de Oliveira *et al*., 2018; López-Menezes *et al*. 2018). Em experimentos laboratoriais, os autores López-Menezes *et al*. (2018) estudaram a aplicação do óleo essencial de *Schinus molle* em nanopartículas de quitosana, observando inibição maior que 80% do fungo *Aspergillus parasiticus*. Já os autores De Oliveira *et al*. (2018), relataram que o óleo essencial obtido a partir dos frutos de *Schinus terebinthifolius* inibiu à ação do fungo *Malassezia furfur* em ensaios *in vitro.*

A superior eficiência do óleo de *S. terebinthifolius*, em relação ao óleo de *S.molle*, pode estar associada à sua composição química, uma vez que, seus óleos foliares e de outras partes do vegetal são ricos em compostos terpênicos, incluindo α-pineno, β-pineno, limoneno, terpinen-4-ol e β-cariofileno. Os estudos associam a atividade antifúngica dos óleos de *Schinus*¸ principalmente, à presença de frações de monoterpenos e sesquiterpenos (Elshafie *et al.*, 2016; Mohamed *et al*., 2020).

Embora menos eficiente, o óleo de *S. molle*, também promoveu aumento significativo de resistência da madeira de *H. brasiliensis* à *P. ostreatus*. Esse resultado está associado, possivelmente, às diferenças na composição química (Prado *et al.*, 2018).

Sendo assim, Prado *et al.* (2018) relatam que o óleo essencial de *S. molle* possui composição química distinta da relatada para *S. terebinthifolius*, embora ambos óleos compartilham α-pineno e β-pineno; em *S. molle*, também se destacam epi-α-cadinol, mirceno e sabineno. Essas diferenças podem ter contribuído para a menor eficiência antifúngica, embora ainda significativa, observada para o óleo de *S. molle*.

É importante salientar que, no presente trabalho, os óleos essenciais foram extraídos de material foliar e que, as concentrações desses compostos podem variar de acordo com a fonte extrativa, seja ela as folhas, frutos ou flores (Belhoussaine *et al.*, 2022; Oliveira *et al.*, 2024).

4. Conclusões

A madeira de *Hevea brasiliensis* tem resistência moderada ao fungo xilófago *Pleurotus ostreatus*. O tratamento, por pincelamento, com óleos essenciais de *Schinus terebinthifolius* e *Schinus molle* aumenta a resistência biológica da madeira, sendo o óleo de *S. terebinthifolius* mais eficiente, principalmente na concentração de 100%, que tornou a madeira altamente resistente. Dessa forma, os resultados demonstram o potencial de ambos os óleos essenciais, especialmente o de *S. terebinthifolius*, como alternativa natural para a proteção da madeira contra fungos xilófagos, indicando perspectivas promissoras para preservantes de menor impacto ambiental.

5. Agradecimentos

Agradeço à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão da bolsa de mestrado, fundamental para a realização desta pesquisa, e ao Programa de Pós-Graduação em Fitossanidade e Biotecnologia Aplicada (PPGFBA) pelo suporte acadêmico e institucional oferecido.

6. Referências bibliográficas

American Wood Protection Association. (2016). *AWPA E10-16: Laboratory method for evaluating the decay resistance of wood-based materials against pure basidiomycete cultures: Soil/block test.* American Wood Protection Association.

American Wood Protection Association. (2016). *AWPA E30-16: Standard method for evaluating natural decay resistance of wood using laboratory decay tests*. AWPA.

Andrade-Alvarado, A. D., González-Márquez, A., González-Mota, R., & Sánchez, C. (2025). Enhanced growth and production of laccase and peroxidases by Pleurotus *ostreatus* in an enriched natural medium in submerged fermentation. BioResources. https://doi.org/10.15376/biores.21.1.839-850

Ahmed, N., Boyd-Shields, G. D., Stokes, C. E., & Hassan, E. B. (2026). Nano-Chitosan Formulations and Essential Oil Encapsulation for Sustainable Wood Protection: A Comprehensive Review. *Applied Sciences.* https://doi.org/10.3390/app16052207

Ayres, M., Ayres Jr., M., Ayres, D. L., & Santos, A. A. S. (2007). *BioEstat 5.0: Aplicações estatísticas nas áreas das ciências biológicas e médicas*. Sociedade Civil Mamirauá.

Belhoussaine, O., Kourchi, C. E., Harhar, H., Bouyahya, A., El Yadini, A., Fozia, F., Alotaibi, A. A., Ullah, R., & Tabyaoui, M. (2022). Chemical composition, antioxidant, insecticidal activity, and comparative analysis of essential oils of leaves and fruits of *Schinus molle* and *Schinus terebinthifolius*. *Evidence-Based Complementary and Alternative Medicine, 2022*. https://doi.org/10.1155/2022/4288890

Boadu, K., Anokye, R., Afrifah, K. A., Tetteh, E. N., Anning, O. F., & Osei, B. K. (2022). Characterization of the fibre morphology and chemical composition of aged PB 260 and IRCA 41 clones of rubber *(Hevea brasiliensis*) wood for pulp and paper making. *Journal of the Indian Academy of Wood Science*, 19, 133 - 140. https://doi.org/10.1007/s13196-022-00304-9

Broda, M. (2020). Natural Compounds for Wood Protection against Fungi—A Review. *Molecules*, 25. https://doi.org/10.3390/molecules25153538

Couturier, M., Ladevèze, S., Sulzenbacher, G., Ciano, L., Fanuel, M., Moreau, C., & Berrin, J. G. (2018). Lytic xylan oxidases from wood-decay fungi unlock biomass degradation. *Nature Chemical Biology*, 14(3), 306-310.

De Almeida, A. T. S., Paes, J., Brocco, V. F., Da Costa Brocco, L. G., Gonçalves, F., López, Y., & Nicácio, M. A. (2026). Efficiency of extracts from Amazonian species in protecting the wood of *Hevea brasiliensis* Muell. Arg. against xylophagous fungi. *Holzforschung*, 80, 265 - 276. https://doi.org/10.1515/hf-2025-0101

de Oliveira, M. S., Gontijo, S. M. L., Teixeira, M. S., Teixeira, K. I. R., Takahashi, J. A., Millan, R. D. S., & Segura, M. E. C. (2018). Chemical composition and antifungal and anticancer activities of extracts and essential oils of *Schinus terebinthifolius* Raddi fruit.

Elshafie, H. S., Ghanney, N., Mang, Ş., Ferchichi, A., & Camele, I. (2016). An in vitro attempt for controlling severe phytopathogens and human pathogens using essential oils from Mediterranean plants of genus *Schinus*. *Journal of Medicinal Food, 19*, 266–273. https://doi.org/10.1089/jmf.2015.0093

Eufrade, H. J., Ohto, J. M., Silva, L. L., Palma, H. A. L., & Ballarin, A. W. (2015). Potential of rubberwood (*Hevea brasiliensis*) for structural use after the period of latex extraction: A case study in Brazil. *Journal of Wood Science, 61*, 384–390. https://doi.org/10.1007/s10086-015-1478-7

Fernández-Fueyo, E., Ruiz-Dueñas, F. J., López-Lucendo, M. F., Pérez-Boada, M., Rencoret, J., Gutiérrez, A., Pisabarro, A., Ramírez, L., & Martínez, A. T. (2016). A secretomic view of woody and nonwoody lignocellulose degradation by *Pleurotus ostreatus*. *Biotechnology for Biofuels, 9*, Article 49. https://doi.org/10.1186/s13068-016-0462-9

Geoffrey Daniel, Chapter 8 - Fungal Degradation of Wood Cell Walls, Editor(s): Yoon Soo Kim, Ryo Funada, Adya P. Singh, Secondary Xylem Biology, Academic Press, 2016, Pages 131-167, ISBN 9780128021859, https://doi.org/10.1016/B978-0-12-802185-9.00008-5.

Junior, C. R. C., Silva, W. C. R., & Soares, P. T. M. L. (2017). Uso da madeira na construção civil. *Projectus, 2*(4), 79–93.

López-Meneses, A. K., Plascencia-Jatomea, M., Lizardi-Mendoza, J., Fernández-Quiroz, D., Rodríguez-Félix, F., Mouriño-Pérez, R., & Cortez-Rocha, M. O. (2018). *Schinus molle* L. essential oil-loaded chitosan nanoparticles: Preparation, characterization, antifungal and anti-aflatoxigenic properties. *LWT, 96*, 597–605. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2018.06.013

Martín, J., & López, R. (2023). Biological deterioration and natural durability of wood in Europe. *Forests, 14*(2), 283. https://doi.org/10.3390/f14020283

Mohamed, A. A., Behiry, S. I., Ali, H. M., El-Hefny, M., Salem, M. Z. M., & Ashmawy, N. A. (2020). Phytochemical compounds of branches from *Pinus halepensis* oily liquid extract and *Schinus terebinthifolius* essential oil and their potential antifungal activity. *Processes, 8*(3), 330. https://doi.org/10.3390/pr8030330

Oghenekaro, A. O., Kovalchuk, A., Raffaello, T., Camarero, S., Gressler, M., Henrissat, B., Lee, J., Liu, M., Martínez, A. T., Miettinen, O., Mihaltcheva, S., Pangilinan, J., Ren, F., Riley, R., Ruiz-Dueñas, F. J., Serrano, A., Thon, M., Wen, Z., Zeng, Z., & Asiegbu, F. O. (2020). Genome sequencing of *Rigidoporus microporus* provides insights on genes important for wood decay, latex tolerance and interspecific fungal interactions. *Scientific Reports, 10*, Article 3000. https://doi.org/10.1038/s41598-020-62150-4

Prado, N. R. T., Silva, J. K. R., Andrade, E. H. A., Maia, J. G. S., & Setzer, W. N. (2018). Chemical composition and biological activity of essential oils from *Schinus* species: A review.

Santos, A. C. A., Rossato, M., Serafini, L. A., Bueno, M., Crippa, L. B., Sartori, V. C., Dellacassa, E., & Moyna, P. (2010). Efeito fungicida dos óleos essenciais de *Schinus molle* L. e *Schinus terebinthifolius* Raddi, Anacardiaceae, do Rio Grande do Sul. *Revista Brasileira de Farmacognosia, 20*(2), 154–159. https://doi.org/10.1590/S0102-695X2010000200003

Souza, A. C. A. S. (2026). *Avaliação da resistência natural da madeira de espécies florestais submetidas ao ataque de fungos apodrecedores.* (Monografia de graduação), Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro.

Silva, M. M. (2020). *Efeito da incorporação de nanopartículas de Ag na proteção da madeira de Hevea brasiliensis (Willd. ex Adr. de Juss.) contra a ação de organismos xilófagos em condições de campo* (Monografia de graduação). Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro.

Trevisan, H., Fernandes, V. J., & Rodrigues-Santos, C. E. R. (2026). *Chrysopogon zizanioides* (L.) Roberty essential oil as *Pinus* wood resistance enhancer against the action of xylophagous fungus *Rhodonia placenta*. *Cerne, 32*, e103616.

Vettraino, A., Zikeli, F., Humar, M., Biscontri, M., Bergamasco, S., & Romagnoli, M. (2023). Essential oils from *Thymus* spp. as natural biocide against common brown- and white-rot fungi in degradation of wood products: Antifungal activity evaluation by in vitro and FTIR analysis. *European Journal of Wood and Wood Products*, *81*, 747–763. https://doi.org/10.1007/s00107-022-01914-3

Vidal, J. M., Evangelista, W. V., Silva, J. C., & Jankowsky, I. P. (2015). Preservação de madeiras no Brasil: Histórico, cenário atual e tendências. *Ciência Florestal*, *25*(1), 257–271.

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Uso de resíduos lignocelulósicos na fabricação de painéis particulados

Chris Stephanie Larco Chávez[1]; Lizbeth Rosario Meza Sanabria[1]; Angélica Gonçalves Nogueira[1], José Benedito Guimarães Júnior[1], Saulo Rocha Ferreira[1]

[1] Universidade Federal de Lavras (UFLA), Lavras/MG, Brasil.

Resumo: A crescente demanda por materiais de menor impacto ambiental tem estimulado o aproveitamento de resíduos lignocelulósicos na produção de painéis particulados. Este estudo avaliou a viabilidade técnica de resíduos de sabugo de milho, mamona, casca de banana, soja, café e arroz, além de partículas de madeira de eucalipto, para a fabricação de painéis aglomerados. Os materiais foram caracterizados quanto à densidade básica e composição química e utilizados na produção dos painéis, submetidos a ensaios físicos e mecânicos. Os resultados demonstraram que a densidade e a composição química das matérias-primas influenciaram a absorção de água, o inchamento em espessura, o módulo de ruptura, o módulo de elasticidade e a razão de compactação. Materiais de menor densidade apresentaram maiores razões de compactação. Conclui-se que os resíduos avaliados apresentam potencial para substituir, total ou parcialmente, matérias-primas convencionais na produção de painéis mais sustentáveis.

Palavras-chave: Sustentabilidade; Resíduos Agroflorestais; Propriedades Mecânicas.

Use of lignocellulosic materials in the manufacture of particleboards

Abstract: The growing demand for materials with lower environmental impact has encouraged the use of lignocellulosic residues in the production of particleboards. This study evaluated the technical feasibility of corn cob, castor bean, banana peel, soybean, coffee, and rice residues, as well as eucalyptus wood particles, for the manufacture of particleboards. The materials were characterized according to basic density and chemical composition and used in the production of the panels, which were subjected to physical and mechanical tests. The results demonstrated that the density and chemical composition of the raw materials influenced water absorption, thickness swelling, modulus of rupture, modulus of elasticity, and compaction ratio. Lower-density materials presented higher compaction ratios. It is concluded that the evaluated residues have the potential to partially or totally replace conventional raw materials in the production of more sustainable particleboards.

Keywords: Agroforestry Residues; Mechanical Properties; Sustainability.

1. Introdução

A crescente preocupação com a sustentabilidade e com o uso racional dos recursos naturais tem estimulado o desenvolvimento de materiais alternativos para a indústria de produtos de origem madeireira. Nesse cenário, resíduos lignocelulósicos provenientes dos setores agrícola e florestal têm recebido atenção devido à sua elevada disponibilidade, ao baixo custo e ao potencial de substituição parcial das matérias-primas convencionais. Sua utilização

pode contribuir tanto para a redução dos impactos ambientais quanto para a valorização de subprodutos agroindustriais que, frequentemente, são descartados de maneira inadequada (Nakashima et al., 2017).

Os painéis particulados estão entre os principais produtos reconstituídos à base de madeira empregados pelas indústrias moveleira e da construção civil. Embora sejam tradicionalmente produzidos com madeira proveniente de florestas plantadas, diferentes resíduos lignocelulósicos podem ser incorporados à sua composição, desde que as características físicas e químicas de cada matéria-prima sejam devidamente consideradas. O aproveitamento desses resíduos representa, portanto, uma alternativa para reduzir a demanda por recursos florestais e ampliar a utilização de subprodutos agrícolas na fabricação de materiais de maior valor agregado (Klimek et al., 2018).

Estudos anteriores demonstram o potencial de diferentes resíduos lignocelulósicos para a produção de painéis particulados, como o sabugo de milho (Silva et al., 2015), resíduos de sorgo (Guimarães Júnior et al., 2017) e colmos de Miscanthus (Klimek et al., 2018). Outros resíduos agrícolas, como casca de arroz, resíduos de café, mamona, soja e casca de banana, também têm sido investigados na literatura para essa finalidade.

Além dos benefícios ambientais, o aproveitamento de resíduos lignocelulósicos está alinhado aos princípios da economia circular, uma vez que permite agregar valor a materiais anteriormente descartados, reduzir a geração de resíduos e diversificar as matérias-primas utilizadas pela indústria. Contudo, a viabilidade de sua aplicação depende da compatibilidade entre as características do resíduo, o adesivo empregado e os parâmetros de processamento dos painéis. Dessa forma, a caracterização física e química desses materiais constitui uma etapa fundamental para a identificação daqueles com maior potencial tecnológico.

Diante desse contexto, o presente trabalho teve como objetivo avaliar a viabilidade técnica de diferentes materiais lignocelulósicos para a fabricação de painéis particulados, investigando a influência de suas propriedades físicas e químicas sobre o desempenho físico e mecânico dos painéis produzidos.

2. Material e métodos

1.1. Seleção e caracterização física dos materiais lignocelulósicos

O estudo foi desenvolvido utilizando diferentes resíduos lignocelulósicos, incluindo sabugo de milho, mamona, casca de banana, soja, grão de café, grão de arroz e madeira de eucalipto híbrido (*Eucalyptus urophylla* × *Eucalyptus grandis*). A madeira foi proveniente de

um plantio experimental com 36 meses de idade, localizado no campus da Universidade Federal de Goiás, Regional Jataí, Goiás (17°55' S; 51°43' W).

A densidade básica da madeira de eucalipto foi determinada conforme a ABNT NBR 11941 (ABNT, 2003). Para os resíduos lignocelulósicos, o volume das amostras foi obtido pelo método de deslocamento de água em proveta graduada, conforme Silva et al. (2015), permitindo o cálculo da densidade básica.

1.2. Caracterização química dos materiais

Para a análise química, os materiais foram processados em moinho tipo Willey, utilizando a fração retida entre as peneiras de 40 e 60 mesh (0,42 e 0,25 mm). As amostras foram acondicionadas em ambiente controlado a 20 ± 2 °C e 65 ± 5% de umidade relativa até atingirem massa constante.

Foram determinados os teores de extrativos totais, conforme a norma ABTCP M 3/69 (1974), lignina insolúvel segundo ABTCP M 10/71 (1974), teor de cinzas conforme NBR 13999 (ABNT, 2003) e holocelulose, obtida pela diferença entre os teores de extrativos, lignina e cinzas.

1.3. Preparação das partículas e produção dos painéis

Após a caracterização física e química dos materiais, realizou-se o processamento das partículas. Os resíduos lignocelulósicos foram triturados em moinho Willey, enquanto as partículas de eucalipto foram obtidas em moinho de martelos. Para ambos os materiais, utilizou-se a fração retida entre as peneiras de 10 e 30 mesh (2,00 e 0,59 mm).

As partículas foram secas até atingirem aproximadamente 3% de umidade em base seca, condição recomendada para a produção de painéis particulados e adequada para a aplicação de adesivos à base de ureia-formaldeído, conforme descrito por Iwakiri (2005). Posteriormente, aplicou-se adesivo ureia-formaldeído na proporção de 12% em relação à massa seca das partículas.

A formação do colchão de partículas foi realizada manualmente, seguida de pré-prensagem a 0,5 MPa durante 5 minutos, em temperatura ambiente. Em seguida, os painéis foram submetidos à prensagem a quente a 180 °C, pressão específica de 4 MPa e tempo de prensagem de 15 minutos. Foram produzidos três painéis por tratamento, com dimensões nominais de 250 × 250 × 15 mm e densidade nominal de 0,60 g cm^{-3}.

1.4. Avaliação das propriedades físicas e mecânicas dos painéis

A qualidade dos painéis produzidos foi avaliada por meio da determinação de suas propriedades físicas e mecânicas. Nos ensaios físicos, foram determinadas a densidade aparente, a absorção de água e o inchamento em espessura após 2 e 24 horas de imersão em água, conforme os procedimentos estabelecidos pela norma ASTM D1037 (2006).

As propriedades mecânicas dos painéis foram avaliadas por meio do ensaio de resistência à tração perpendicular à superfície, conforme a ASTM D1037 (2006), e do ensaio de flexão estática, utilizado para determinar o módulo de ruptura (MOR) e o módulo de elasticidade (MOE), de acordo com a DIN 52362 (1982).

Antes dos ensaios, os painéis foram climatizados em condições controladas de 20 ± 3 °C e 65 ± 5% de umidade relativa.

1.5. Delineamento experimental e análise estatística

O experimento foi conduzido em delineamento inteiramente casualizado (DIC), com três repetições. Os dados obtidos foram submetidos à análise de variância e as médias comparadas pelo teste de Scott-Knott, considerando nível de significância de 5%.

3. Resultados e discussão

Os resultados obtidos permitiram avaliar a influência das características dos materiais lignocelulósicos nas propriedades físicas e mecânicas dos painéis aglomerados produzidos. A análise considerou parâmetros como densidade, composição química (extrativos totais, lignina, cinzas e holocelulose), absorção de água, inchamento em espessura, razão de compactação e propriedades mecânicas de resistência à flexão (MOR) e módulo de elasticidade (MOE)

Inicialmente, foram avaliadas as propriedades dos materiais lignocelulósicos utilizados na produção dos painéis. Os resultados demonstraram diferenças significativas entre as matérias-primas analisadas. A densidade variou entre 0,16 g/cm³ para a mamona e 0,55 g/cm³ para a madeira de eucalipto (Tabela 1). As diferenças de densidade observadas entre as matérias-primas indicam que esse parâmetro pode influenciar o comportamento físico e mecânico dos painéis produzidos, sendo um fator importante na seleção dos materiais lignocelulósicos (Guimarães Júnior et al., 2017).

Tabela 1 – Caracterização física e química dos materiais lignocelulósicos utilizados na produção dos painéis particulados

Resíduos lignocelulósicos	Densidade (g/cm^3)	Extrativos totais (%)	Lignina (%)	Cinzas (%)	Holocelulose (%)
Sabugo de milho	0.17 A	4,35 A	20,51 A	3,5 B	71,64 D
Mamona	0,16 A	12,65 B	30,79 C	2,86 B	53,7 B
Banana	0,28 B	31,01 C	25,87 B	1,88 B	41,24 A
Soja	0,2 B	9,57 B	16,41 A	8,77 C	65,25 C
Café	0,3 B	3,66 A	42,83 D	0,61 A	52,9 B
Madeira	0,55 C	6,15 A	28,05 C	0,25 A	65,55 C
Arroz	0,15 A	10,56 B	15,34 A	14,58 D	59, 52 C

Em relação à composição química, observou-se variação nos teores de extrativos, lignina, cinzas e holocelulose entre os materiais avaliados. A banana apresentou o maior teor de extrativos totais (31,01%), enquanto o café apresentou o maior teor de lignina (42,83%). A lignina possui importante influência nas propriedades mecânicas dos painéis, contribuindo para sua rigidez e resistência (Silva et al., 2009). Já a holocelulose apresentou maior valor para a madeira de eucalipto (65,55%), indicando maior presença de celulose e hemiceluloses, componentes relacionados à estrutura e resistência dos materiais lignocelulósicos (Silva et al., 2009).

Os ensaios físicos e mecânicos realizados conforme as normas ASTM D1037 e DIN 52362 permitiram identificar o desempenho dos diferentes painéis produzidos. Nos ensaios de flexão estática, foram observadas diferenças nos valores de MOR e MOE entre os materiais. O paneil produzido com resíduo de banana apresentou o maior valor de MOR (1684 MPa), enquanto a mamona apresentou 1272 MPa e o sabugo de milho 1231 MPa. Para o MOE, a mamona apresentou 12,68 GPa, seguida da banana com 12,18 GPa e do sabugo de milho com 6,71 GPa. Esses resultados indicam que a composição e estrutura dos materiais lignocelulósicos influenciam diretamente a capacidade de resistência dos painéis, conforme apresentado na Figura 1.

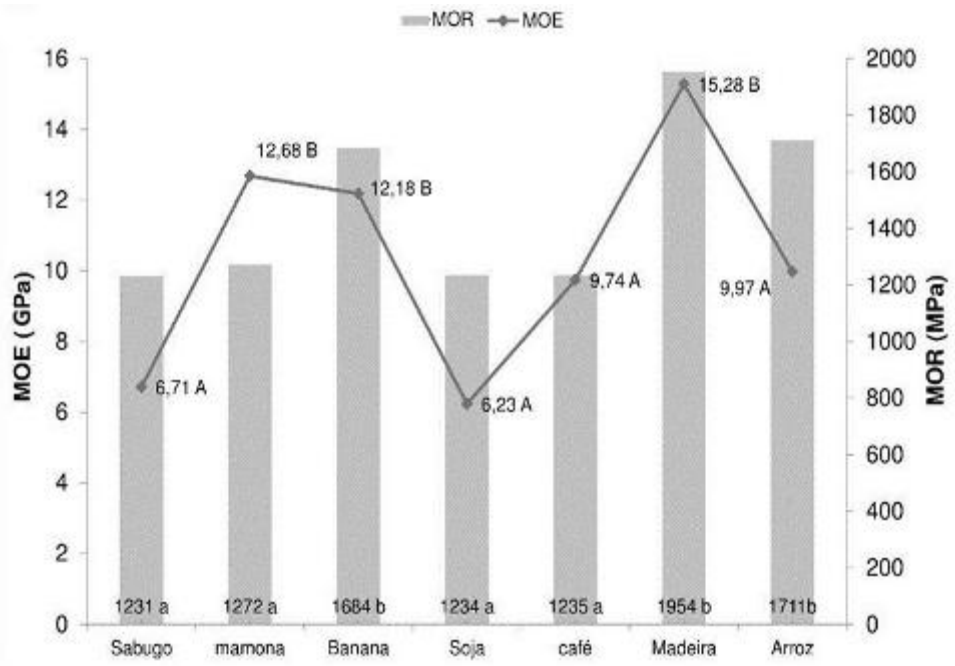


Figura 1 – Valores de módulo de ruptura (MOR) e módulo de elasticidade (MOE) dos painéis produzidos com diferentes materiais lignocelulósicos.

Quanto às propriedades relacionadas à estabilidade dimensional, os resultados demonstraram diferenças no comportamento dos painéis após a exposição à água. Os resultados de inchamento em espessura após 2 e 24 horas de imersão são apresentados na Figura 2. Após duas horas de imersão, o inchamento em espessura foi de 6,8% para o sabugo de milho, 17,8% para a mamona, 12,0% para a banana, 25,0% para a soja, 16,2% para o café, 15,7% para a madeira e 22,5% para o arroz. Após 24 horas de imersão, os valores foram de 23,5%, 25,0%, 21,5%, 32,0%, 24,3%, 23,5% e 42,0%, respectivamente.

Após 24 horas de imersão, o arroz apresentou o maior inchamento em espessura (42,0%), seguido pela soja (32,0%), enquanto a banana apresentou o menor valor (21,5%). Os maiores valores de inchamento em espessura indicam menor estabilidade dimensional dos painéis, uma vez que a exposição à água pode provocar alterações dimensionais no material (GUIMARÃES JÚNIOR et al., 2017).

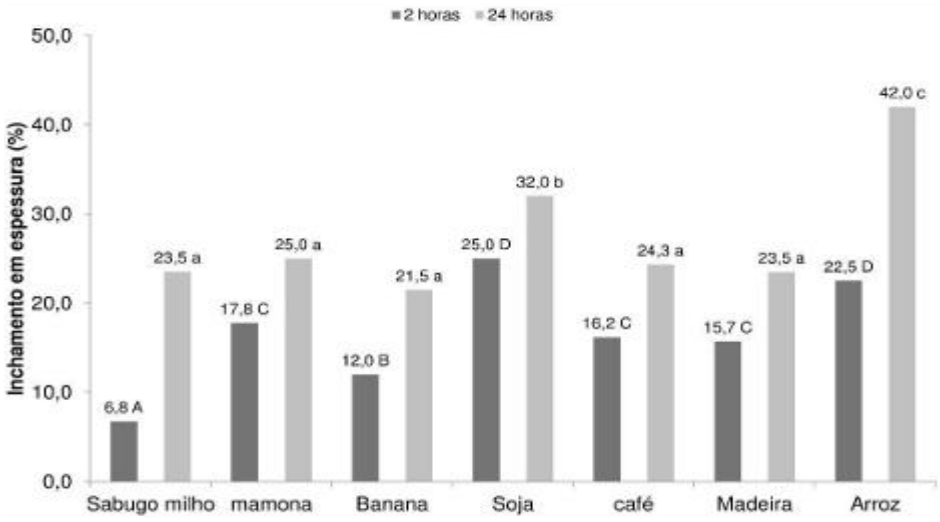


Figura 2 – Inchamento em espessura dos painéis após 2 e 24 horas de imersão em água.

Em relação à absorção de água, após duas horas de imersão, os valores foram de 32% para o sabugo de milho, 36% para a mamona, 37% para a banana, 48% para a soja, 65% para o café, 77% para a madeira e 86% para o arroz. Após 24 horas de imersão, os valores aumentaram para 48%, 42%, 65%, 83%, 78%, 87% e 108%, respectivamente. Os resultados de absorção de água dos painéis após 2 e 24 horas de imersão são apresentados na Figura 3.

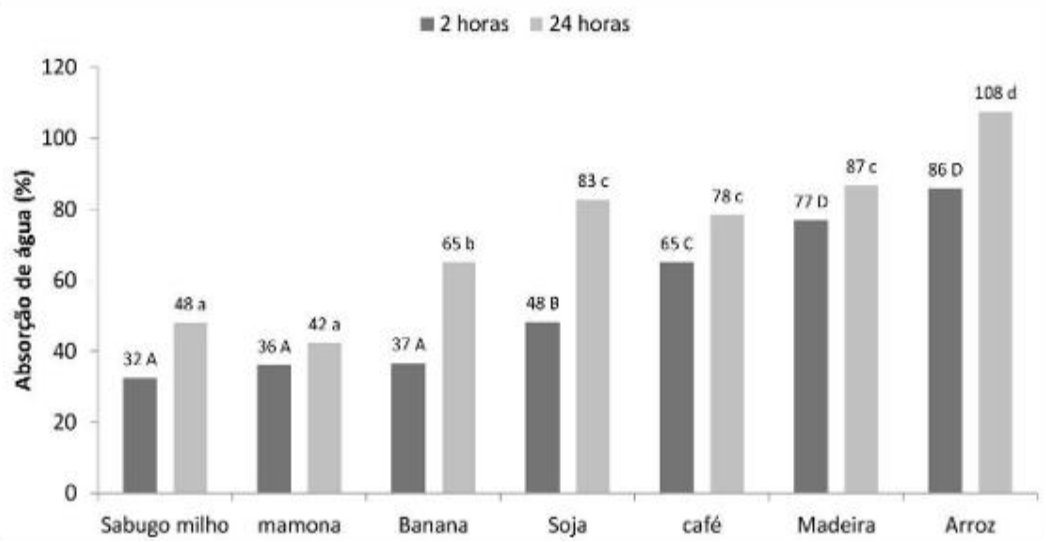


Figura 3 – Absorção de água dos painéis após 2 e 24 horas de imersão.

Por meio da Figura 3, é possível analisar os resultados da absorção de água dos painéis em diferentes períodos de imersão. Observou-se que, após 24 horas de imersão, o arroz apresentou a maior absorção de água (108%), seguido pela madeira (87%) e pela soja (83%), enquanto a mamona apresentou o menor valor (42%). A banana apresentou absorção de 65%, enquanto o café e o sabugo de milho apresentaram valores de 78% e 48%, respectivamente. A

maior absorção de água pode estar relacionada à maior ocorrência de inchamento e deformações dos painéis, comprometendo sua estabilidade dimensional (GUIMARÃES JÚNIOR et al., 2017).

A razão de compactação também apresentou variação entre os materiais estudados, com valores entre 1,2 para a madeira e 4,0 para o arroz. Esse parâmetro demonstra a relação entre a densidade do painel e a densidade da matéria-prima, influenciando diretamente a formação da estrutura interna e as propriedades finais do material, conforme apresentado na Figura 4.

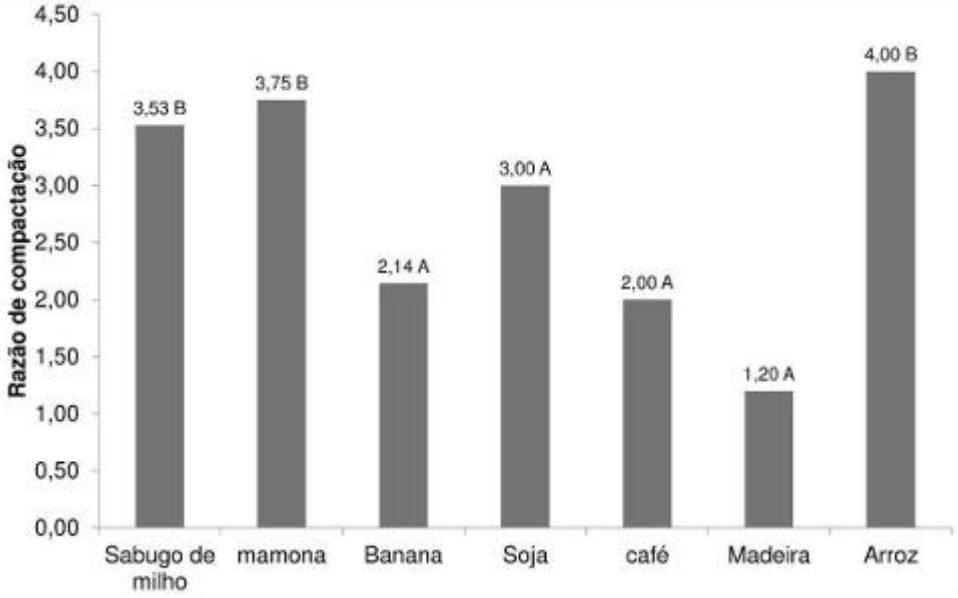


Figura 4 – Razão de compactação dos painéis produzidos com diferentes materiais lignocelulósicos.

Os resultados obtidos demonstram que as características físicas e químicas das diferentes matérias-primas lignocelulósicas influenciaram o desempenho dos painéis produzidos. A variação da densidade dos materiais refletiu-se na razão de compactação, uma vez que a madeira apresentou a maior densidade (0,55 g/cm³) e a menor razão de compactação (1,2), enquanto o arroz apresentou uma das menores densidades (0,15 g/cm³) e a maior razão de compactação (4,0). Esse comportamento evidencia a relação entre a densidade da matéria-prima e a formação da estrutura dos painéis.

Nas propriedades mecânicas, a madeira apresentou o maior valor de MOR (1954 MPa), enquanto a mamona apresentou o maior MOE (12,68 GPa). Por outro lado, o sabugo de milho apresentou os menores valores de MOR (1231 MPa) e MOE (6,71 GPa). Esses resultados demonstram que a utilização de diferentes materiais lignocelulósicos resulta em diferentes níveis de resistência e rigidez dos painéis.

Quanto às propriedades relacionadas à umidade, o arroz apresentou os maiores valores de inchamento em espessura (42,0%) e absorção de água (108%) após 24 horas de imersão, enquanto a banana apresentou o menor inchamento (21,5%) e a mamona apresentou a menor absorção de água (42%). A soja também apresentou valores elevados para essas propriedades, com 32,0% de inchamento e 83% de absorção de água. Esses resultados indicam que os materiais apresentaram comportamentos distintos quando expostos à água, sendo que maiores valores de absorção estão associados a maiores alterações dimensionais dos painéis e, consequentemente, podem comprometer sua estabilidade dimensional (GUIMARÃES JÚNIOR et al., 2017).

Dessa forma, os resultados indicam que a seleção da matéria-prima deve considerar conjuntamente as propriedades físicas e mecânicas dos painéis, uma vez que nenhum dos materiais avaliados apresentou o melhor desempenho em todas as propriedades analisadas. A escolha do material deve, portanto, estar relacionada às características e aos requisitos de desempenho da aplicação pretendida.

4. Conclusões

O presente estudo demonstrou que a natureza da matéria-prima lignocelulósica influencia as propriedades físicas e mecânicas dos painéis particulados. Entre os materiais avaliados, a madeira apresentou a maior densidade (0,55 g/cm³) e o maior valor de MOR (1954 MPa), enquanto a mamona apresentou o maior valor de MOE (12,68 GPa).

Em relação à estabilidade dimensional, o arroz apresentou os maiores valores de inchamento em espessura (42,0%) e absorção de água (108%) após 24 horas de imersão. A mamona apresentou a menor absorção de água (42%), enquanto a banana apresentou o menor inchamento em espessura (21,5%). Esses resultados indicam que o desempenho dos painéis varia conforme a matéria-prima utilizada.

Considerando conjuntamente as propriedades avaliadas, a madeira apresentou o melhor desempenho mecânico, enquanto materiais como mamona e banana se destacaram em propriedades específicas. Entretanto, com base nos resultados obtidos neste estudo, não é possível indicar um único material como o mais adequado para todas as aplicações, nem afirmar o atendimento a uma norma de desempenho específica, uma vez que não foram estabelecidos no trabalho critérios normativos de classificação ou aprovação dos painéis.

Quanto à viabilidade técnica, os resultados demonstram o potencial de utilização dos materiais lignocelulósicos avaliados na produção de painéis particulados, porém a escolha da

matéria-prima deve considerar os requisitos da aplicação final, especialmente quanto à resistência mecânica, absorção de água e estabilidade dimensional.

5. Agradecimentos

Agradecemos à Universidade Federal de Lavras (UFLA) pelo apoio institucional na concretização deste estudo. Agradecemos também aos colaboradores e aos laboratórios envolvidos pelo suporte técnico e pela contribuição para a execução deste estudo.

6. Referências bibliográficas

American Society for Testing and Materials. (2006). ASTM D1037: Standard test methods for evaluating properties of wood-base fiber and particle panel materials. ASTM International.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2003). NBR 11941: Madeira – Determinação da densidade básica. ABNT.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2003). NBR 13999: Papel, cartão, pastas celulósicas e madeira – Determinação do resíduo (cinza) após a incineração a 525 °C. ABNT.

Associação Brasileira Técnica de Celulose e Papel. (1974). Normas técnicas ABCP. ABCP.

Deutsches Institut für Normung. (1982). DIN 52362: Testing of wood chipboards – Bending test – Determination of bending strength. DIN.

Guimarães Júnior, J. B., Xavier, M. M., Santos, T. S., et al. (2017). Addition of sorghum culture waste in eucalyptus particleboards. Pesquisa Florestal Brasileira, 36(88), 435–443.

Klimek, P., Wimmer, R., Meinlschmidt, P., & Kudela, J. (2018). Utilizing Miscanthus stalks as raw material for particleboards. Industrial Crops and Products, 111, 270–276.

Nakashima, G. T., et al. (2017). Materiais lignocelulósicos: Caracterização e produção de briquetes. Revista Virtual de Química, 9(1), 150–162.

Silva, D. W., Farrapo, C. L., Pereira, D., Mendes, R. F., & Mendes, L. M. (2015). MDP com partículas de eucalipto e palha de milho. Scientia Forestalis, 43(108), 853–862. https://doi.org/10.18671/scifor.v43n108.10

Silva, R., Haraguchi, S. K., Muniz, E. C., & Rubira, A. F. (2009). Aplicações de fibras lignocelulósicas na química de polímeros e em compósitos. Química Nova, 32(3), 661–671.

Vila-Chã, N. M. B. (2012). Estudo de um material compósito à base de gesso e cortiça (Dissertação de mestrado). Universidade do Minho.

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Variação colorimétrica de quatro espécies madeireiras submetidas a estresse termo-higrométrico

Marcus Paulo Delunardo Montibeller de Castro[1]; Rodolpho Stephan Santos Braga[1]; Antônio Thiago Soares de Almeida[1]; Maria Vitoria de Lima Colunche[1]; Damielle Leite Figueiredo[1]; José Roberto Victor de Oliveira[1,2]; Caroline Palacio de Araujo[1]; Juarez Benigno Paes[1].

[1] Universidade Federal do Espírito Santo; [2] Laboratório de Produtos Florestais - LPF.

Resumo: A cor da madeira é importante para aplicações onde a aparência influencia a qualidade e a aceitação do produto. Assim, avaliou-se a colorimétrica das madeiras de *Pinus* sp., *Tectona grandis*, *Simarouba amara* e *Eucalyptus camaldulensis* (*in natura* e tratada com arseniato de cobre cromatado - CCA) nos planos anatômicos, quando submetidas a ciclos de secagem, umedecimento e ressecagem. Foram avaliados os parâmetros colorimétricos e a diferença total de cor (Δ*E**). Observou-se redução da luminosidade (*L**) após a saturação em água e recuperação após a ressecagem, com diferença entre as espécies. *T. grandis* exibiu maior estabilidade, enquanto *Pinus* sp. e *S. amara* as maiores variações. O CCA reduziu a *L** do *E. camaldulensis* e contribuiu para maior estabilidade da cor. As maiores alterações foram observadas na face transversal. Conclui-se que a cor é influenciada pela espécie e plano anatômico, fornecendo informações para aplicações em produtos madeireiros sujeitos a variações de umidade.

Palavras-chave: Cor da madeira; Plano anatômico; CIE L*a*b.

Colorimetric variation of four wood species subjected to thermo-hygrometric stress

Abstract: Wood color is important for applications where appearance influences product quality and acceptance. Thus, the colorimetric properties of *Pinus* sp., *Tectona grandis*, *Simarouba amara*, and *Eucalyptus camaldulensis* wood (untreated and treated with chromated copper arsenate - CCA) were evaluated across anatomical planes when subjected to cycles of drying, wetting, and re-drying. Colorimetric parameters and total color difference (Δ*E**) were assessed. A reduction in lightness (*L**) was observed after water saturation, followed by recovery after re-drying, with differences noted among the species. *T. grandis* exhibited the greatest stability, whereas *Pinus* sp. and *S. amara* showed the most significant variations. CCA reduced the *L** value of *E. camaldulensis* and provide greater color stability. The most pronounced changes were observed for transverse face. Color is influenced by species and anatomical plane, providing information relevant to applications of wood products subject to moisture fluctuations.

Keywords: Wood color; Anatomical plane; CIE L*a*b.

1. Introdução

A madeira é um dos principais materiais empregados na construção civil, indústria moveleira e produtos de maior valor agregado, por suas propriedades mecânicas, versatilidade de processamento e estético. Entre os atributos de valorização comercial, a cor desempenha papel fundamental na percepção de qualidade, classificação visual e aplicação em materiais e elementos arquitetônicos (Janin et al., 2001). Alterações cromáticas podem reduzir o valor comercial da madeira e indicar modificações físicas e químicas associadas ao processamento, envelhecimento e exposição ambiental, tornando a estabilidade colorimétrica um importante indicador de qualidade tecnológica (Garcia & Marinonio, 2016).

A cor da madeira é resultado direto de sua composição química, sobretudo da lignina e dos extrativos presentes no xilema, compostos que atuam como cromóforos naturais e respondem de maneira distinta a estímulos térmicos, fotoquímicos e hídricos (Kučerová et al., 2022). Entre espécies, o teor e a natureza dos extrativos, sobretudo compostos fenólicos, explicam a variação natural de tonalidade observada em madeiras de diferentes origens. Sob exposição ao calor, à luz ou à umidade, esses compostos se oxidam e originam quinonas e outros produtos cromóforos de degradação, processo que também compromete a lignina e altera de forma irreversível a coloração original da madeira (Jurczyková et al., 2023).

Para quantificar essas alterações na maneira de forma objetiva e reprodutível, o sistema CIE L*ab** tornou-se a ferramenta indispensável na área da ciência da madeira, descrevendo a cor por meio dos parâmetros *L**, *a** e *b**, que representam, respectivamente, a luminosidade, o eixo verde-vermelho e o eixo azul-amarelo (Commission Internationale de L'Éclairage - CIE, 1986). Esse sistema numérico substituiu com vantagens os métodos de classificação por comparação visual, como o Munsell, ao permitir a mensuração instrumental de pequenas variações cromáticas antes perceptíveis apenas de forma subjetiva (Kirillova et al., 2018).

Ciclos de secagem, umedecimento e exposição térmica são importantes agentes de alteração colorimétrica da madeira, pela degradação de extrativos e componentes da parede celular. Estudos demonstram redução da luminosidade em *Tectona grandis* submetida ao intemperismo (Mesquita et al., 2017), escurecimento de *Eucalyptus grandis* após termorretificação (Zanuncio et al., 2014) e variações cromáticas em espécies amazônicas associadas ao teor de extrativos (Souza et al., 2024). Tratamentos com CCA também modificam a cor da madeira, podendo reduzir a luminosidade (Teles et al., 2016).

Embora estudos sobre estabilidade da cor da madeira tenham avançado, a maioria concentra-se em uma única espécie, tratamentos térmicos isolados ou intemperismo acelerado

(Bessa et al., 2024). Ainda permanecem escassas avaliações comparativas envolvendo espécies com diferentes características anatômicas e químicas submetidas a ciclos sucessivos de secagem, umedecimento e ressecagem, especialmente quando considerado o efeito combinado do tratamento com CCA na estabilidade colorimétrica (Jurczyková et al., 2023). Diante desse contexto, avaliou-se a colorimétrica das madeiras de *Pinus* sp., *Tectona grandis*, *Simarouba amara* e *Eucalyptus camaldulensis* (*in natura* e tratada com arseniato de cobre cromatado - CCA) para os planos anatômicos, quando submetidas a ciclos de secagem, umedecimento e ressecagem.

2. Materiais e métodos

2.1. Preparo das amostras

As madeiras utilizadas foram provenientes de doações do Laboratório de Produtos Florestais - LPF, Serviço Florestal Brasileiro - SFB, Brasília - DF, na forma de ripas de 60,0 x 5,0 x 2,5 cm (comprimento × largura × espessura). Elas foram transformadas em amostras de 5,0 × 5,0 × 2,5 cm (comprimento × largura × espessura), totalizando dez amostras, sendo duas para cada indivíduo. Durante a preparação, foram selecionadas apenas peças isentas de defeitos (nós, rachaduras, empenamentos e ataques biológicos), para minimizar a influência de fatores anatômicos e estruturais na resposta colorimétrica.

O experimento foi conduzido ao considerar a espécie e condição (*in natura* e tratada – eucalipto), perfazendo cinco situações, o plano anatômico (tangencial, radial e transversal) e a condição de avaliação (controle, madeira saturada e madeira ressecada). As variáveis resposta foram avaliadas por meio dos parâmetros colorimétricos claridade ou luminosidade (L^*), coordenada verde-vermelho (a^*), azul-amarelo (b^*), saturação da cor (C*), ângulo de tonalidade (h°) e da diferença total de cor (ΔE^*), obtidos em cada etapa do experimento. As avaliações foram realizadas após a secagem inicial das amostras (controle); após a saturação em água durante sete dias; e após ressecagem, simulando um estresse termohigrométrico. Todas as espécies tiveram suas densidades (12%) avaliadas.

2.2. Procedimento experimental e avaliação colorimétrica

Inicialmente, as amostras foram submetidas à secagem em estufa nas temperaturas de 40, 80 e 103 ± 2 °C, permanecendo 24 h em cada condição, de forma sucessiva, até a conclusão do ciclo térmico. Após a secagem, as amostras foram mantidas em dessecador para

estabilização térmica antes das leituras colorimétricas. As avaliações foram realizadas em duplicatas, com colorímetro portátil (3nh NR110) nas faces tangencial, radial e transversal de cada amostra, de acordo com o sistema CIE L*ab** (CIE, 1986).

Após as avaliações iniciais, as amostras foram submersas em água destilada durante sete dias. Finalizado o período de imersão, o excesso de água superficial foi removido com papel absorvente e uma nova avaliação colorimétrica foi realizada nas mesmas faces previamente analisadas. Em seguida, as amostras foram novamente submetidas ao ciclo de secagem nas temperaturas de 40, 80 e 103 ± 2 °C por 24 h em cada etapa. Ao término do processo, realizou-se uma terceira avaliação colorimétrica, permitindo comparar o comportamento da madeira antes da umidificação, durante a condição saturada e após o estresse termohigrométrico.



Figura 1 - Cor das madeiras após os procedimentos: Situação (S1) controle × madeira saturada; (S2) controle × madeira ressecada; e (S3) madeira ressecada × madeira saturada.

2.3 Avaliação da estabilidade colorimétrica

A estabilidade colorimétrica foi avaliada por meio da diferença total de cor (ΔE*), calculada com base nos parâmetros *L**, *a** e *b** do sistema CIE *Lab**, conforme Equação 1 (CIE, 1986). Tendo os valores sido comparados por meio de análise descritiva.

$$\Delta E^{*} = \sqrt{(\Delta L^{*})^2 + (\Delta a^{*})^2 + (\Delta b^{*})^2} \quad (1)$$

em que Δ*L**, Δ*a** e Δ*b** representam, respectivamente, as diferenças entre os valores de *L**, *a** e *b** obtidos nas duas condições comparadas.

Para interpretar as alterações promovidas pelos ciclos de umedecimento e secagem, foram estabelecidas três condições de comparação: Situação 1 (S1): controle × saturado; S2: controle × ressecagem; S3: ressecagem × saturado. Essas comparações foram realizadas para os planos anatômicos tangencial, radial e transversal de todas as espécies avaliadas, tendo como base a média e o desvio padrão.

3. Resultados e discussão

3.1 Alterações da luminosidade (*L**)

A luminosidade diferenciou as espécies já na condição controle, refletindo a influência da composição química e da estrutura anatômica da madeira. *S. amara* e *Pinus* sp. tiveram maiores valores de *L**, enquanto *T. grandis* e *E. camaldulensis* os menores valores, associados à maior concentração de extrativos e compostos fenólicos. Essa variação decorre da natureza e da concentração dos cromóforos presentes na parede celular e nos extrativos do cerne, que controlam a absorção e a reflexão da luz (Gierlinger et al., 2004).

Após a saturação em água (S1), a luminosidade reduziu em todas as espécies, evidenciando o efeito do aumento da umidade nas propriedades ópticas da madeira. *Pinus* sp. apresentou a maior redução, com queda da luminosidade tangencial de 79,03 para 42,42 (≈ 46% de diferença). As demais espécies exibiram o mesmo comportamento, porém com menor intensidade, confirmando que o escurecimento induzido pela água é um fenômeno comum entre as madeiras.

O escurecimento decorre do preenchimento dos lúmens celulares por água, reduzindo a diferença entre os índices de refração do ar e da parede celular. Isso diminui a reflexão difusa e aumenta a transmissão da luz para o interior da madeira, produzindo um aspecto mais escuro. A intensidade desse fenômeno físico depende da permeabilidade, da porosidade e da organização anatômica da madeira (Gierlinger et al., 2004; Baar et al., 2019).

Após a ressecagem (S2), a luminosidade foi recuperada parcialmente, mas permaneceu abaixo dos valores iniciais. Em *Pinus* sp., a luminosidade tangencial aumentou de 42,42 para 54,44, sem recuperar o valor original (79,03). Comportamento semelhante foi observado em *E. camaldulensis* (64,26 para 59,64), indicando que parte das alterações induzidas pelo ciclo termohigrométrico é irreversível.

A recuperação de *L** está associada às transformações químicas induzidas pelo aquecimento, como degradação parcial das hemiceluloses, oxidação da lignina e modificações dos extrativos, que alteram os cromóforos da parede celular e reduzem a capacidade de reflexão da superfície. Esses processos são reconhecidos como indicadores de degradação superficial durante o envelhecimento térmico e higroscópico da madeira (Jurczyková et al., 2023). De forma geral, espécies com menores teores de extrativos, como *S. amara* (≈ 2,50%) e *Pinus* sp. (≈ 2,80%), tiveram maiores variações de *L**, enquanto *T. grandis* (≈ 4,80) maior estabilidade

óptica, reforçando o papel dos extrativos naturais na resistência às alterações colorimétricas (Moya & Berrocal, 2010).

3.2 Estabilidade colorimétrica da madeira (Δ*E**)

A diferença total de cor (Δ*E**) contablizou as variações de *L**, *a** e *b**, permitindo avaliar os efeitos dos ciclos de umedecimento e ressecagem. As diferenças entre espécies e planos anatômicos indicam que a estabilidade colorimétrica depende da interação entre composição química, estrutura anatômica e condição higrotérmica da madeira (Figura 2).

Figura 2 - Variação total da cor Δ*E**, para as situações S1, S2 e S3 nos diferentes planos anatômicos das espécies estudadas.

A Situação 1 (S1), correspondente à madeira saturada, apresentou os maiores valores de Δ*E** para todas as espécies, evidenciando que a absorção de água foi o principal fator de alteração cromática. Esse efeito está associado ao preenchimento dos lúmens celulares, que reduz a reflexão difusa da luz, além da redistribuição de compostos hidrossolúveis e da alteração temporária da interação entre cromóforos e radiação incidente (Baar et al., 2019).

Pinus sp. apresentou a maior instabilidade durante a saturação, com Δ*E** de 39,79 na face tangencial. Esse comportamento está relacionado à permeabilidade da madeira, que favorece a absorção de água, associada ao menor teor de extrativos fenólicos em comparação às espécies tropicais mais densas (Barański, 2023).

T. grandis teve elevada alteração durante a saturação (Δ*E** = 23,03 na face radial), mas baixa variação após a ressecagem (S2), Δ*E** de 1,23 na face radial e 1,91 na tangencial. A elevada recuperação da cor está associada à presença de extrativos fenólicos e quinonas no cerne, que conferem maior resistência às alterações químicas induzidas pelo ambiente (Moya & Berrocal, 2010). A espécie *S. amara*, por outro lado, exibiu maiores valores de Δ*E** residual após a ressecagem, principalmente nas faces radial e transversal, indicando alterações permanentes após a saturação. A baixa densidade obtida (0,51 g cm^{-3}) e o reduzido teor de extrativos (≈ 2,50%) podem favorecer modificações nos cromóforos superficiais durante o aquecimento e a secagem, reduzindo sua estabilidade colorimétrica (Souza et al., 2024).

De forma geral, a maior parte das alterações cromáticas ocorreu durante a saturação, enquanto a ressecagem promoveu recuperação parcial da cor. A estabilidade colorimétrica esteve relacionada à capacidade de recuperação das propriedades ópticas após a remoção da água, sendo favorecida por madeiras com maior concentração de extrativos, como a *T. grandis* e *E. camaldulensis*.

A diferença total de cor (Δ*E**) teve um indicador distinto da estabilidade visual da madeira por contabilizar as alterações de luminosidade, tonalidade e saturação. Tecnologicamente, espécies com baixos valores de Δ*E** após ciclos de umedecimento e secagem apresentam maior potencial para aplicações em pisos, revestimentos, esquadrias e mobiliário, onde a estabilidade da aparência é um requisito importante.

3.3 Diferenças visuais entre espécies e condições experimentais

Na Figura 3 constam as diferenças visuais entre espécies e condições experimentais consistentes com os valores de Δ*E**. *T. grandis* e *E. camaldulensis* tratado com CCA apresentaram maior estabilidade visual, enquanto *Pinus* sp. e *S. amara*, maiores alterações cromáticas após os ciclos higrotérmicos. Esses resultados demonstram a eficiência da colorimetria para avaliar alterações superficiais da madeira.

O tratamento com CCA promoveu escurecimento inicial da madeira de *Eucalyptus camaldulensis*, reduzindo os valores de *L** e alterando as coordenadas cromáticas (Figura 3). Esse efeito está associado às reações de fixação entre os constituintes do preservativo e a parede

celular, especialmente pela formação de complexos entre cobre, lignina e compostos fenólicos, que modificam as propriedades ópticas da madeira (Temiz et al., 2005). A redução de *a** indicou menor intensidade dos tons avermelhados, embora os valores permanecessem positivos, mantendo a predominância dessa tonalidade no sistema CIE L*ab**.

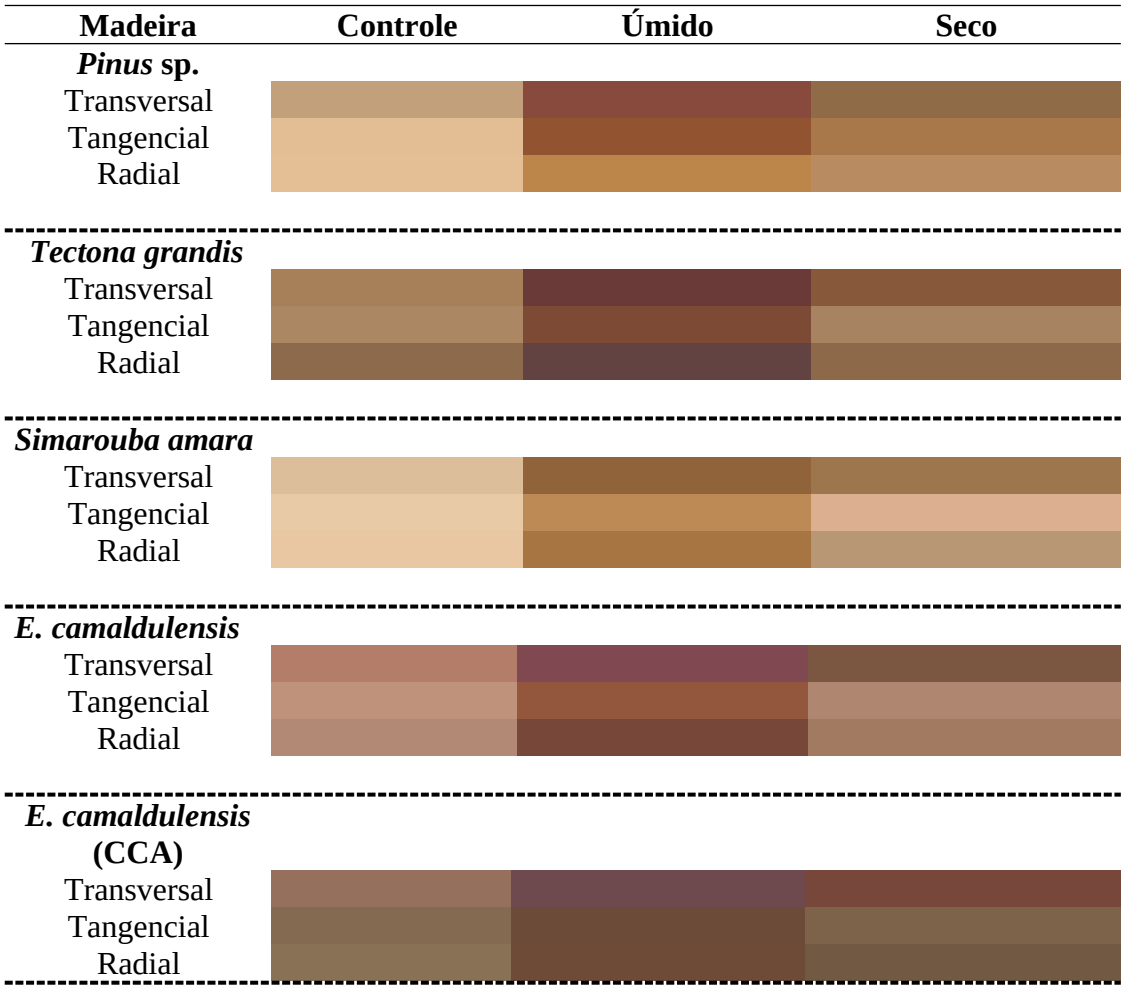


Figura 3 - Representação visual da variação de tonalidade das madeiras avaliadas para as situações S1, S2 e S3 nos diferentes planos anatômicos das espécies.

Durante a saturação, a madeira tratada apresentou menores valores de Δ*E** (Figura 2), indicando maior estabilidade colorimétrica frente às variações de umidade. Esse comportamento pode estar relacionado à fixação química do CCA, que reduz a mobilidade de compostos solúveis e limita alterações ópticas induzidas pela água. Entretanto, o tratamento não mantém a coloração original, pois a impregnação promove alterações cromáticas permanentes (Venkatasamy & Okwara, 2017).

Os planos anatômicos apresentaram respostas distintas aos ciclos termohigrométricos, com a face transversal exibindo menor luminosidade e maiores variações de Δ*E** em comparação às faces radial e tangencial. Esse comportamento está associado ao corte

perpendicular dos elementos anatômicos, que aumenta a rugosidade superficial e favorece a interação da água e da radiação com os lúmens celulares (Atayde et al., 2011). Nas faces longitudinais, as menores variações podem estar relacionadas à distribuição dos raios, parênquima axial e extrativos, que influenciam a reflexão da luz e a resposta colorimétrica. Em *T. grandis*, a maior recuperação da cor ocorreu nas faces radial e tangencial, enquanto a face transversal apresentou maior sensibilidade ao ciclo higrotérmico (Garcia & Marinonio, 2016).

4. Conclusões

Os ciclos de secagem, umedecimento e ressecagem influenciaram a estabilidade colorimétrica das madeiras, com respostas distintas entre espécies e planos anatômicos. *T. grandis* apresentou maior estabilidade, enquanto *Pinus* sp. e *S. amara* exibiram maiores alterações. O tratamento com CCA promoveu escurecimento inicial de *E. camaldulensis* e reduziu as variações cromáticas durante os ciclos higrotérmicos. A face transversal foi mais suscetível às alterações de cor. Esses resultados contribuem para a compreensão do comportamento cromático de madeiras submetidas ao estresse termohigrométrico e auxiliam na seleção de espécies para aplicações que exigem maior estabilidade da aparência superficial, frente a variações drásticas de umidade.

5. Agradecimentos

À Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação do Espírito Santo (FAPES), à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pelo apoio à pesquisa.

6. Referências bibliográficas

Atayde, C. M., Gonçalez, J. C., & Camargos, J. A. A. (2011). Características colorimétricas entre as seções anatômicas da madeira de muirapiranga (*Brosimum* sp.). Cerne, 17(2), 231-235. https://doi.org/10.1590/S0104-77602011000200011

Baar, J., Paschová, Z., Čermák, P., & Wimmer, R. (2019). Color changes of various wood species in response to moisture. Wood and Fiber Science, 51(2), 119-131.

Barański, J. (2023). The impact of drying conditions on the surface color changes of pine wood. Bioresources, 19(1), 656-669. https://doi.org/10.15376/biores.19.1.656-669.

Bessa, F., Sousa, V., Quilhó, T., & Pereira, H. (2024). Diversity of wood colour in tropical timber species and its relationship with wood density and anatomical features. IAWA Journal, 45(3), 335-357. https://doi.org/10.1163/22941932-bja10148

Commission Internationale de L'Éclairage - CIE. (1986). Colorimetry: Part 4: CIE 1976 (Lab) System. 2. ed.

Garcia, R. A., & Marinonio, G. B. (2016). Variação da cor da madeira de teca em função da densidade e do teor de extrativos. Floresta e Ambiente, 23(1), 124-134. https://doi.org/10.1590/2179-8087.035313

Gierlinger, N., Jacques, D., Grabner, M., Wimmer, R., Schwanninger, M., Rozenberg, P., & Pâques, L. E. (2004). Colour of larch heartwood and relationships to extractives and brown-rot decay resistance. Trees, 18(1), 102-108. https://doi.org/10.1007/s00468-003-0290-y

Janin, G., Gonçalez, J. C., Ananías, R. A., Charrier, B., Silva, G. F., & Dilem, A. (2001). Aesthetics appreciation of wood colour and patterns by colorimetry. Part 1. Colorimetry theory for the CIELab system. Maderas. Ciencia y Tecnología, 3(1), 3-13. https://doi.org/10.4067/S0718-221X2001000100001

Jurczyková, T., Šárovec, O., Kačík, F., Hájková, K., Jurczyk, T., & Hrčka, R. (2023). Chromophores' contribution to color changes of thermally modified tropical wood species. Polymers, 15(19), 4000. https://doi.org/10.3390/polym15194000

Kirillova, N. P., Grauer-Gray, J., Hartemink, A. E., Sileova, T. M., Artemyeva, Z. S., & Burova, E. K. (2018). New perspectives to use Munsell color charts with electronic devices. Computers and Electronics in Agriculture, 155, 378-385. https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.10.028

Kučerová, V., Hrčka, R., & Hýrošová, T. (2022). Relation of chemical composition and colour of spruce wood. Polímeros, 14(23), 5333. https://doi.org/10.3390/polym14235333

Mesquita, R. R. S., Gonçalez, J. C., & Paula, M. H. (2017). Comportamento da madeira de *Tectona grandis* frente ao intemperismo. Floresta, 47(1), 29-35. https://doi.org/10.5380/rf.v47i1.38562

Moya, R., & Berrocal, A. (2010). Wood colour variation in sapwood and heartwood of young trees of *Tectona grandis* and its relationship with plantation characteristics, site, and decay resistance. Annals of Forest Science, 67, 109. https://doi.org/10.1051/forest/2009088

Souza, L. V., Stangerlin, D. M., Melo, R. R., Lengowski, E. C., Bonfatti Júnior, E. A., de Vasconcelos, L. G., & Pimenta, A. S. (2024). Colorimetry and chemical properties of thermally modified *Parkia pendula* and *Simarouba amara* wood. Acta Amazonica, 54(3), e54mt23175. https://doi.org/10.1590/1809-4392202301753

Teles, R. F., Costa, A. F., & Souza, M. R. (2016). Análise da influência do tratamento preservativo na cor e rugosidade de superfícies de madeiras tropicais. Floresta e Ambiente, 23(1), 100-108. https://doi.org/10.1590/2179-8087.079714

Temiz, A., Yildiz, U. C., Aydin, I., Eikenes, M., Alfredsen, G., & Çolakoglu, G. (2005). Surface roughness and color characteristics of wood treated with preservatives after accelerated weathering test. Applied Surface Science, 250(1-4), 35-42. https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2004.12.019

Venkatasamy, R. K., & Okwara, D. N. (2017). Fixation, permanency, and leaching of copper chrome arsenate (CCA) wood preservatives: an overview of theories, mechanisms, and implications. Moi University. https://doi.org/10.5281/zenodo.813783

Zanuncio, A. J. V., Farias, E. S., & Silveira, T. A. (2014). Termorretificação e colorimetria da madeira de *Eucalyptus grandis*. Floresta e Ambiente, 21(1), 85-90. https://doi.org/10.4322/floram.2014.005

Variação longitudinal da compressão paralela às fibras de espécies nativas da Mata Atlântica provenientes de reflorestamento

William Colatino Martins[1]; Evanderson Luís Capelete Evangelista [1]; Ana Julia Alves Pereira[1]; Laura Menezes Côrrea[1]; Gabriel Matos Diniz [1]; Marcos Oliveira de Paula[1]; Angélica de Cassia Oliveira Carneiro[2]; Vinicius Resende de Castro [1]

[1] Laboratório de Propriedades da Madeira (LPM), Universidade Federal de Viçosa, Viçosa/MG-Brasil. [2] Laboratório de Painéis e Energia da Madeira (LAPEM), Universidade Federal de Viçosa, Viçosa/MG-Brasil.

Resumo: O reflorestamento com espécies nativas da Mata Atlântica surge como uma alternativa para conciliar a conservação ambiental com a produção de madeiras de alto valor, apesar de ainda haver poucas informações sobre suas propriedades tecnológicas. Este estudo avaliou a resistência à compressão paralela às fibras de cinco espécies, boleira (*Joannesia princeps*), ipê-felpudo (*Zeyheria tuberculosa*), jacarandá-da-bahia (*Dalbergia nigra*), jenipapo (*Genipa americana*) e jequitibá-rosa (*Cariniana legalis*), considerando quatro posições longitudinais ao longo do fuste, seguindo os critérios da ABNT NBR 7190. Os resultados mostraram que jenipapo (37,3 MPa) e ipê-felpudo (36,6 MPa) obtiveram os maiores valores de resistência, enquanto a boleira apresentou o menor desempenho (13,3 MPa). Quanto à variação ao longo do fuste, ipê-felpudo, jacarandá-da-bahia e boleira mantiveram resistência relativamente uniforme, enquanto jenipapo e jequitibá-rosa apresentaram variações significativas entre as posições. Esses achados reforçam a necessidade de considerar não apenas os valores médios de resistência, mas também sua uniformidade longitudinal, ao definir a destinação industrial mais adequada para cada espécie.

Palavras-chave: Sustentabilidade; Propriedades mecânicas; Qualidade da madeira.

Mechanical properties in compression parallel to the grain of native Atlantic Forest species from reforestation

Abstract: The expansion of reforestation with native species from the Atlantic Forest emerges as an alternative to reconcile environmental conservation with the production of high-value timber, although there is still little information available on their technological properties. This study evaluated the compressive strength parallel to the grain of five species, boleira (*Joannesia princeps*), ipê-felpudo (*Zeyheria tuberculosa*), jacarandá-da-bahia (*Dalbergia nigra*), jenipapo

(*Genipa americana*), and jequitibá-rosa (*Cariniana legalis*), considering four longitudinal positions along the stem, following the criteria of ABNT NBR 7190. The results showed that jenipapo (37.3 MPa) and ipê-felpudo (36.6 MPa) obtained the highest strength values, while boleira presented the lowest performance (13.3 MPa). Regarding variation along the stem, ipê-felpudo, jacarandá-da-bahia, and boleira maintained relatively uniform strength, whereas jenipapo and jequitibá-rosa showed significant variations between positions. These findings reinforce the need to consider not only average strength values but also their longitudinal uniformity when defining the most appropriate industrial use for each species.
Keywords: Sustainability; Forest management; Wood quality.

1. Introdução

A madeira de espécies nativas tropicais ocupa uma posição estratégica na interface entre conservação florestal e desenvolvimento econômico, tendo a produção de madeira serrada respondido por US$ 0,668 bilhão das exportações do setor florestal brasileiro em 2024 (Ibá, 2025). Esse potencial econômico contrasta, contudo, com graves entraves ambientais: a retirada predatória de madeiras nativas na Amazônia, a descaracterização do Cerrado pela expansão agropecuária e a fragmentação da Mata Atlântica pela pressão urbana (Santos et al., 2026) alteram diretamente o microclima e degradam os ecossistemas locais (Cerqueira et al., 2003; Ogunkunle; Adewum; Adepoju, 2019). Nesse cenário, o desmatamento associado à expansão agropecuária já foi responsável por 77% das emissões nacionais de gases de efeito estufa (GEE) em 2005 (Torres et al., 2014). O reflorestamento com espécies nativas surge como resposta a essa dupla crise — ambiental e econômica —, favorecendo o sequestro de gases de efeito estufa (Cqnumc, 2001) e a recuperação da biodiversidade local (Janishevski et al., 2015; Possingham et al., 2015), ao mesmo tempo em que impulsiona o mercado de créditos de carbono. Contudo, a sustentabilidade financeira desses projetos depende também da exploração comercial da madeira obtida durante o manejo, uma receita complementar estratégica: sistemas de desbaste seletivo conciliam a manutenção da cobertura florestal com o fornecimento de matéria-prima de alto valor agregado, controlando a proporção entre lenho juvenil e adulto — condição necessária para que a madeira atinja as propriedades tecnológicas exigidas pela indústria (Brancalion et al., 2021; Vidaurre et al., 2011). Esse modelo reduz a pressão sobre remanescentes florestais nativos, alinhando benefícios ambientais e econômicos (Chazdon & Brancalion, 2019; Strassburg et al., 2020).

Apesar desse potencial, a viabilidade comercial do manejo depende do conhecimento das propriedades tecnológicas da madeira produzida (Goulart et al., 2012; Carvalho et al., 2018), sobretudo das propriedades mecânicas, que orientam a comparação entre espécies e a definição de usos potenciais (Stangerlin et al., 2008). No Brasil, a norma ABNT NBR 7190 (Pietrobon et al., 2025) classifica as madeiras tropicais em classes de resistência a partir do valor característico de resistência à compressão paralela às fibras ($f_{c0,k}$); no entanto, esses valores permanecem indisponíveis para a maioria das espécies nativas provenientes de manejo comercial recente, o que compromete o dimensionamento seguro de estruturas e a padronização industrial. Um segundo fator raramente considerado é a variação da resistência mecânica ao longo do fuste, associada a diferenças na proporção de lenho juvenil e adulto entre a base e o topo da árvore — variação que pode comprometer a homogeneidade de peças estruturais, mas que segue pouco documentada para espécies nativas da Mata Atlântica sob manejo florestal ativo.

Portanto, o presente trabalho teve como objetivo analisar a resistência à compressão paralela às fibras e definir o valor característico ($f_{c0,k}$) da madeira de cinco espécies nativas da Mata Atlântica provenientes de plantios de reflorestamento, sendo elas: boleira (*Joannesia princeps*), ipê felpudo (*Zeyheria tuberculosa*), jacarandá-da-bahia (*Dalbergia nigra*), jenipapo (*Genipa americana*) e jequitibá-rosa (*Cariniana legalis*).

2. Material e métodos

As árvores foram cedidas de povoamentos manejados pela empresa Symbiosis Investimentos, no município de Porto Seguro, sul da Bahia, Brasil. Foram selecionados 10 indivíduos por espécie de cinco espécies nativas da Mata Atlântica — boleira (*Joannesia princeps*), ipê-felpudo (*Zeyheria tuberculosa*), jacarandá-da-bahia (*Dalbergia nigra*), jenipapo (*Genipa americana*) e jequitibá-rosa (*Cariniana legalis*) —, totalizando 50 árvores. Após a derrubada das árvores, as toras de madeira foram transportadas para o Laboratório de Propriedades da Madeira (LPM) da Universidade Federal de Viçosa (UFV), no município de Viçosa, Minas Gerais, Brasil.

Discos transversais foram retirados em quatro posições longitudinais do fuste comercial (0, 25, 50 e 75% da altura comercial) para representar a variação longitudinal ao longo do tronco.

Os corpos de prova para o ensaio de compressão paralela às fibras, com dimensões de 2 cm × 2 cm × 6 cm, foram confeccionados a partir de discos retirados das quatro posições

longitudinais das 10 árvores amostradas por espécie. Retirou-se 1 corpo de prova por disco/posição, totalizando 40 corpos de prova por espécie (10 árvores × 4 posições longitudinais × 1 corpo de prova por disco). Na direção radial, os corpos de prova foram padronizados e retirados da região mais próxima à casca, correspondendo à posição de 75% do raio no sentido medula-casca. Por fim, os corpos de prova foram acondicionados em câmara climatizada (20 ± 2 °C e 65 ± 5% de umidade relativa) até atingirem a umidade de equilíbrio de aproximadamente 12%, atendendo às diretrizes da ABNT NBR 7190:2022.



Figura 22 - Retirada das amostras na marcenaria do Laboratório de Propriedades da Madeira - (LPM/UFV).

Todos os corpos de prova tiveram suas dimensões determinadas com o auxílio de um paquímetro digital e foram pesados antes do ensaio mecânico para posterior determinação do teor de umidade no momento dos ensaios (Figura 2).



Figura 2 - Medição da seção transversal da amostra com auxílio de um paquímetro digital e aferição da massa a partir de balança analítica.

A resistência à compressão paralela às fibras foi determinada em máquina universal de ensaios (Contenco, capacidade de 10 t – Figura 3), com aquisição de dados pelo software PAVITEST, sob velocidade de carregamento de **10mm/min**, conforme a norma ABNT NBR 7190-1 (2022). As dimensões da seção transversal de cada corpo de prova foram medidas com paquímetro digital antes do ensaio.



Figura 3 - Ensaio mecânico de compressão paralela as fibras, utilizando máquina de ensaios universal (UMC/Contenco 10T) - LPM/UFV.

A resistência à compressão (σ, MPa) foi calculada pela razão entre a força máxima aplicada (F, N) e a área da seção transversal (A, mm²):

$$\sigma = \frac{F}{A}$$

σ : Tensão de compressão (resistência máxima).

F: Força máxima aplicada (Quilograma-força, kgf).

A: Área da seção transversal da peça onde a força está sendo aplicada (cm^2).

Após o ensaio mecânico, os corpos de prova foram secos em estufa a 103 ± 2 °C até massa constante para determinação do teor de umidade (U, %). Os teores de umidade foram determinados a partir da equação:

$$U(\%) = \left(\frac{m_u - m_s}{m_s} \right) \times 100$$

$U(\%)$: Teor de umidade expresso em porcentagem.

m_u: Massa úmida da amostra (massa inicial, antes de ir para a estufa).

m_s: Massa seca da amostra (massa constante obtida após a secagem a 103 ± 2 °C).

Os valores de resistência foram corrigidos para a umidade padrão de referência de 12%, conforme a ABNT NBR 7190-1 (2022). Para ajuste foi utilizado a seguinte equação:

$$f_{12} = f_U \cdot \left[1 + 0,03 \cdot (U - 12)\right]$$

f_{12}: É a resistência corrigida para a umidade padrão de 12%.

f_U: É a resistência calculada no ensaio com a umidade atual da amostra.

U: É o teor de umidade real da amostra no momento do ensaio, expresso em porcentagem.

A resistência característica (*f_k*) de cada espécie foi obtida pela multiplicação da média aritmética dos valores corrigidos pelo fator 0,7, conforme critério da ABNT NBR 7190-1 (2022). O experimento foi conduzido em delineamento inteiramente casualizado, em esquema fatorial 5 × 4, correspondente a cinco espécies e quatro posições longitudinais do fuste. Os dados foram inicialmente submetidos aos testes de normalidade dos resíduos e homogeneidade das variâncias. Posteriormente, realizou-se análise de variância (ANOVA) para verificar os efeitos de espécie, posição longitudinal e da interação entre esses fatores. Quando observadas diferenças significativas, as médias foram comparadas pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.

3. Resultados e discussão

Na Tabela 1 estão apresentadas as médias dos valores característicos das 10 árvores e 5 espécies, à compressão paralela as fibras, avaliadas, considerando as posições da altura comercial do fuste, além da média geral de cada espécie. A normalidade dos resíduos do modelo foi atestada pelo teste de Shapiro-Wilk (p-valor = 0,4651). A homocedasticidade (homogeneidade das variâncias) foi confirmada pelo teste de Levene (p-valor = 0,1132). A ANOVA indicou que houve interação significativa entre os fatores espécie e posição longitudinal para a resistência à compressão paralela às fibras (p-valor < 0,001), a existência de interação significativa demonstrou que o efeito da posição longitudinal ao longo do tronco sobre a resistência à compressão varia de acordo com a espécie analisada.

Tabela 1: Resultados de resistência mecânica (MPa) corrigidos ao valor característico de cada posição ao longo do fuste de todas as espécies analisadas.

Posição	Boleira (*Joannesia princeps*)	Ipê-felpudo (*Zeyheria tuberculosa)*	Jacarandá-da-bahia (*Dalbergia nigra)*	Jenipapo (*Genipa americana)*	Jequitibá-rosa (*Cariniana legalis)*
0%	12,8 dA*	37,2 aA	33,0 abA	32,0 bB	22,3 cC
25%	13,8 cA	36,8 aA	31,0 bA	38,0 aA	29,6 bA
50%	14,0 cA	36,6 aA	29,5 bA	40,1 aA	27,3 bAB
75%	11,2 dA	34,7 bA	20,9 bA	41,2 aA	23,5 cBC
Média	13,3 d	36,6 a	31,4 b	37,3 a	25,9 c

*Médias seguidas por letras distintas maiúsculas na coluna e minúsculas na linha, diferem a 5% pelo teste de Tukey.

Ao avaliar o comportamento das espécies de forma geral, observou-se uma nítida diferença na qualidade da madeira. O jenipapo (37,3 MPa) e o ipê-felpudo (36,3 MPa) destacaram-se com os maiores desempenhos mecânicos. No sentido oposto, a boleira apresentou o menor desempenho mecânico de forma unânime em todas as condições avaliadas, com um valor médio de 13,3 MPa, indicando limitações para o uso estrutural direto em compressão. O jacarandá-da-bahia (31,4 MPa) e o jequitibá-rosa (25,9 MPa) posicionaram-se como materiais de resistência intermediária.

Essa ampla amplitude de valores entre espécies nativas da Mata Atlântica corrobora a tese de Goulart et al. (2012) sobre a necessidade do conhecimento tecnológico prévio. Espécies como o jenipapo e o ipê felpudo apresentam alto potencial para balizar o enquadramento em classes de resistência mais elevadas da norma ABNT NBR 7190, viabilizando seu uso em estruturas e peças que exigem maior robustez.

Para três espécies (ipê-felpudo, jacarandá-da-bahia e boleira), a variação da posição de amostragem (0%, 25%, 50% e 75%) não resultou em diferenças significativas, mantendo a homogeneidade da resistência. Do ponto de vista tecnológico e industrial, essa estabilidade é altamente desejável, pois garante que a madeira retirada da base (0%) terá o mesmo comportamento mecânico daquela retirada do topo (75%), facilitando o desdobro e a padronização das peças estruturais (Carvalho et al., 2018).

O jenipapo exibiu um comportamento atípico e ascendente, em que a resistência na base (32,0 MPa) foi significativamente inferior às posições superiores, que estabilizaram a partir de 25% (38 MPa) da altura comercial, alcançando até 41,2 MPa na posição 75%. Esse incremento em direção ao topo pode estar associado a variações na densidade básica ou na proporção de lenho juvenil e tardio ao longo do tronco (Vidaurre et al., 2011).

O jequitibá-rosa foi a espécie que apresentou a maior dinâmica de variação longitudinal. A resistência mecânica aumentou significativamente da base (22,3 MPa) para a posição de 25% (29,6 Mpa), sofrendo decréscimo gradual nas posições subsequentes de 50% (27,3 Mpa) e 75% (23,5 Mpa) .

Esta interação significativa demonstra que o mapeamento da altura comercial não pode ser negligenciado no dimensionamento de estruturas de madeiras nativas tropicais. Enquanto, lotes de ipê felpudo ou jacarandá-da-bahia podem ser comercializados de forma mista em termos de posição no tronco, o uso do jequitibá-rosa e do jenipapo exige uma classificação prévia. No caso do jequitibá-rosa, por exemplo, preterir a seção correspondente a 25% da altura em favor da base (0%) significaria uma perda substancial de desempenho em resistência mecânica a compressão paralela às fibras.

4. Conclusões

O jenipapo e o ipê-felpudo apresentaram os maiores valores de resistência à compressão paralela às fibras, destacando-se como as espécies de maior potencial para aplicações estruturais, enquanto a boleira apresentou o menor desempenho, não sendo recomendada para esse fim. Além disso, o efeito da posição longitudinal ao longo do fuste mostrou-se dependente da espécie, de modo que o ipê-felpudo, jacarandá-da-bahia e boleira apresentaram comportamento homogêneo ao longo da altura comercial, enquanto jenipapo e jequitibá-rosa apresentaram variações significativas, indicando a necessidade de classificação e segregação das peças para uso estrutural.

5. Agradecimentos

A EMBRAPII Unidade Fibras Florestais, à Universidade Federal de Viçosa (UFV), ao Departamento de Engenharia Florestal (DEF/UFV), e a empresa Symbiosis Investimentos.

6. Referências bibliográficas

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 7190-1: Projeto de estruturas de madeira. Parte 1: Critérios de dimensionamento. Rio de Janeiro, 2022. 81 p.

Brancalion, P. H. S., Guillemot, J., César, R. G., Andrade, H. S., Mendes, A., Sorrini, T. B., Piccolo, M. C., Peluci, M. C., Moreno, V. S., Colletta, G., & Chazdon, R. L. (2021). The cost of restoring carbon stocks in Brazil's Atlantic Forest. Land Degradation & Development, 32(2), 830–841. https://doi.org/10.1002/ldr.3764.

Carvalho, A. M., Latorraca, J. V. F., Reis, C. A., Silva, C. E. S., Carvalho, P. C. L., Maciel, N. S. R., Pace, J. H. C., Castro, J. P., Santos, G. C. V., Souza, J., Siqueira, G. S., Ferreira, M. E. S., & Sakai, E. S. (2018). Avaliações de qualidade da madeira em espécies nativas de plantios florestais. In S. G. Rolim & D. Piotto (Orgs.), Silvicultura e tecnologia de espécies da Mata Atlântica (pp. 135–137). Editora Rona.

Cerqueira, R. et al. Fragmentação: alguns conceitos. In: Rambaldi, D. M.; Oliveira, D. D. Fragmentação de ecossistemas: causas, efeitos sobre a biodiversidade e recomendações de políticas públicas. Brasília: Ministério do Meio Ambiente; Secretaria de Biodiversidade e Florestas, 2003. p. 23-40.

Chazdon, R. L., & Brancalion, P. H. S. (2019). Restoring forests as a means to many ends. Science, 365*(*6448), p. 24–25. https://doi.org/10.1126/science.aax9539.

CQNUMC (Convenção Quadro Das Nações Unidas Para Mudanças Climáticas). Decision 17/CP. 7. Modalities and procedures for a clean development mechanism as defined in Article 12 of the Kyoto Protocol. Report of the Conference of the Parties on its seventh session, held at Marrakesh from 29 October to 10 November 2001. Document FCCC/CP/2001/13/Add.2.

Goulart, S.L.; Mori, F.A.; Ribeiro, A.O.; Couto; A.M.; Arantes, M.D.C.; & Mendes, L.M. (2012). Análises químicas e densidade básica da madeira de raiz, fuste e galho de barbatimão [(stryphnodendron adstringens) coville] de bioma cerrado. Cerne, 18(1), 59-66. https://doi.org/10.1590/S0104-77602012000100008.

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES (IBÁ). Relatório Anual 2025. São Paulo: Ibá, 2025. Disponível em: https://iba.org/publicacoes/relatorios. Acesso em: 20 jun. 2026.

Janishevski, L., Santamaria, C., Gidda, S. B., Cooper, H. D., & Brancalion, P. H. S. (2015) Ecosystem restoration, protected areas and biodiversity conservation. Unasylva, 245(66), 19–28.

Ogunkunle, T. J.; Adewumi, A.; & Adepoju, A. O. (2019). Biodiversity: Overexploited but underutilized natural resource for human existence and economic development. Environment & Ecosystem Science (EES), 3(1), 26-34.

Pietrobon, L. M.; Santos Junior, A. J.; Simião, L. G. S.; Lahr, F. A. R.; Bertolini, M. S.; & Christoforo, A. L. (2025) Estimativa da resistência e da rigidez à compressão paralela às fibras de madeiras nativas a partir da dureza e densidade aparente. Revista Matéria, 30. https://doi.org/10.1590/1517-7076-RMAT-2025-0810.

Possingham, H. P., Bode, M., & Klein, C. J. (2015) Optimal conservation outcomes require both restoration and protection. PLoS Biology, 13(1), e1002052. https://doi.org/10.1371/journal.pbio.1002052.

Santos, C. A. G., Pontes, M. V. A., Silva, R. C. da, Silva, V. F. da, Pereira, F. B., Eccard, A. F. C., & Duque, R. R. (2026). Reflorestamento e sustentabilidade: Territórios agroecológicos comunitários como práticas de resistência, justiça ambiental e regeneração socioecossistêmica. Veredas do Direito, 23, e235146. https://doi.org/10.18623/rvd.v23.5146.

Stangerlin, D. M., Melo, R. R., Domingues, J. M. X. Determinação da resistência ao impacto para as madeiras de Eucalyptus dunnii, Corymbia citriodora e Pouteria pachycarpa. In: Anais do XI Encontro Brasileiro em Madeira e Estruturas de Madeira; 2008; Londrina. CD-ROM.

Strassburg, B. B. N., Iribarrem, A., Beyer, H. L., Cordeiro, C. L., Crouzeilles, R., Jakovac, C. C., Braga Junqueira, A., Lacerda, E., Latawiec, A. E., Balmford, A., Brooks, T. M., Butchart, S. H. M., Chazdon, R. L., Erb, K.-H., Brancalion, P. H. S., Buchanan, G., Cooper, D., Díaz, S., Donald, P. F., & Visconti, P. (2020) Global priority areas for ecosystem restoration. Nature, 586, 724–729. https://doi.org/10.1038/s41586-020-2784-9.

Torres, C. M. M. E., Gonçalves Jacovine, L. A, Oliveira Neto, S. N., Brianezi, D., & Alves, E. B. B. M. (2014). Sistemas agroflorestais no Brasil: uma abordagem sobre a estocagem de carbono. Pesquisa Florestal Brasileira, 34, 235-44. https://doi.org/10.4336/2014.pfb.34.79.633.

Vidaurre, G. B., Lombardi, L. R., Oliveira, J. T. S., Arantes, M. D. C. Lenho Juvenil e Adulto e as Propriedades da Madeira. Floresta e Ambiente, 18(4), 469-480, 2011. https://doi.org/10.4322/floram.2011.066.

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Variação longitudinal do teor de umidade e da densidade básica da madeira de *Avicennia marina* (Forssk.) Vierh.

Nédia Pereira Correia Mendes Correia[1,2]; Correia Hermenegildo Correia[2]; Rodolpho Stephan Santos Braga[1]; Glaucileide Ferreira[1]; Felipe da Silva Gomes[1]; Kamilly da Silva Pereira[1]; Andrade Fernando Egas[3]; Juarez Benigno Paes[1]

[1] Universidade Federal do Espírito Santo
[2] Universidade Licungo
[3] Universidade Eduardo Mondlane

Resumo: A madeira de *Avicennia marina* apresenta potencial para diferentes aplicações tecnológicas, sendo amplamente utilizada por comunidades costeiras. Neste estudo, objetivou-se analisar a variação do teor de umidade após a secagem natural da madeira ao ar e da densidade básica entre a base e o topo do fuste da espécie. Cinco árvores foram coletadas em um manguezal de Quelimane, Moçambique, sendo avaliados o teor de umidade e a densidade básica conforme as normas ISO 13061-1:2014 e ISO 13061-2:2014, respectivamente. Os dados foram submetidos aos testes F e t de Student ($p < 0,05$). O teor de umidade não diferiu significativamente entre a base (16,19%) e o topo (16,54%) do fuste. Por outro lado, a densidade básica foi significativamente maior no topo (0,57 g cm^{-3}) do que na base (0,52 g cm^{-3}), classificando a espécie como madeira de densidade média. Conclui-se que a posição longitudinal influencia a densidade básica, mas não o teor de umidade da madeira após a secagem natural ao ar, fornecendo informações relevantes para o aproveitamento tecnológico da espécie.

Palavras-chave: Manguezal; Caracterização tecnológica; Propriedades físicas.

Longitudinal variation in moisture content and basic density of *Avicennia marina* (Forssk.) Vierh. wood

Abstract: *Avicennia marina* wood shows potential for various technological applications and is widely used by coastal communities. This study aimed to analyze the variation in moisture content following natural air-drying and basic density between the base and the top of the species' stem. Five trees were sampled from a mangrove forest in Quelimane, Mozambique, and evaluated for moisture content and basic density in accordance with ISO 13061-1:2014 and ISO 13061-2:2014 standards, respectively. Data were subjected to F-tests and Student's t-tests ($p < 0.05$). Moisture content did not differ significantly between the base (16.19%) and the top (16.54%) of the stem. Conversely, basic density was significantly higher at the top (0.57 g cm^{-3}) than at the base (0.52 g cm^{-3}), classifying the species as having medium-density wood. It is concluded that longitudinal position influences basic density but not the moisture content of the wood after natural air-drying, providing relevant information for the technological utilization of the species.

Keywords: Mangrove; Technological characterization; Physical properties.

1. Introdução

As florestas de manguezal estão entre os ecossistemas mais produtivos da Terra (Giri, 2021) e constituem um importante componente dos ecossistemas costeiros tropicais e subtropicais (Santini et al., 2012). Esses ambientes fornecem uma ampla gama de bens e serviços ecossistêmicos, incluindo madeira, produtos florestais não madeireiros, proteção costeira, conservação da biodiversidade e regulação climática (Barbier et al., 2011; Huxham et al., 2017; Kamau et al., 2024).

Dentre as espécies arbóreas desse ecossistema, *Avicennia marina* destaca-se por apresentar a mais ampla distribuição geográfica entre os manguezais (Malekmohammadi et al., 2023; Martínez-Díaz & Reef, 2023), ocorrendo ao longo do Oceano Índico, Austrália, África, Sudeste Asiático e na costa sul do Irã (Zahedinour et al., 2026). Além disso, é considerada uma das espécies dominantes dos manguezais do Oceano Índico (Aziz & Khan, 2000), apresentando elevada tolerância à salinidade, diferentes regimes de inundação, substratos compactos, arenosos e sedimentos recentemente depositados. Segundo Ministério da Terra, Ambiente e Desenvolvimento Rural (MITADER), em Moçambique, é amplamente distribuída e pode ocorrer desde a borda terrestre até a porção voltada para o mar, incluindo a região intermediária da floresta (Mitader, 2015).

A madeira constitui uma importante matéria-prima para a construção civil devido às suas características estéticas, econômicas e tecnológicas (Costa et al., 2017). Quando explorada de forma legal e sustentável, contribui para o atendimento das demandas do setor e para a conservação dos recursos florestais. A qualidade da madeira está diretamente relacionada ao conjunto de suas propriedades químicas, físicas, anatômicas e mecânicas, que determinam sua aptidão para diferentes aplicações. Entre essas propriedades, destacam-se aquelas de natureza física, mecânica e química, consideradas essenciais para o emprego da madeira em construções e estruturas (Souza et al., 2020).

O teor de umidade e a densidade básica da madeira são propriedades físicas que se evidenciam, por influenciarem diretamente suas propriedades tecnológicas e mecânicas (Carneiro et al., 2020). Além de constituírem parâmetros de fácil determinação e amplamente empregados na sua caracterização (Barros & Calil Junior, 2002; Glass et al., 2021; Silveira et al., 2013), madeiras de maior densidade tendem a apresentar maior resistência a danos físicos e

ao ataque de patógenos (Augspurger & Kelly, 1984; Niklas, 1992; Hillis, 2012). Entretanto, a densidade da madeira não é uniforme, variando em função das condições ambientais, da posição na árvore e da localização geográfica. Santini et al. (2012) e Santini, Hua, et al. (2013), verificaram que árvores de *Avicennia marina* estabelecidas em regiões mais áridas e próximas à frente marinha apresentaram densidade significativamente superior àquelas localizadas em áreas menos salinas, evidenciando a variabilidade dessa propriedade e a importância de sua caracterização em diferentes condições de crescimento.

Diante da importância tecnológica da madeira de *Avicennia marina* e da influência das propriedades físicas sobre sua utilização, este estudo teve como objetivo analisar a variação do teor de umidade e da densidade básica da madeira entre a base e o topo do fuste da espécie.

2. Material e métodos

2.1 Coleta e preparo do material

A espécie *Avicennia marina* (Forssk.) Vierh. foi coletada em uma floresta de manguezal localizada na cidade de Quelimane, província da Zambézia, Moçambique. Foram selecionadas cinco árvores com boa fitossanidade, diâmetros variáveis e altura entre 8 e 15 m, conforme as características descritas no Inventário Florestal Nacional de Moçambique (Marzoli, 2007).

Após o abate, os fustes foram seccionados em toras de 2,0 m de comprimento e permaneceram empilhados por aproximadamente 10 meses para secagem natural ao ar. Em seguida, foram retiradas toras de 50 cm das regiões da base e do topo do fuste, as quais foram desdobradas para obtenção dos corpos de prova. Após a confecção, os corpos de prova provenientes das cinco árvores foram agrupados de acordo com a posição longitudinal de origem, sem manutenção da identificação individual das árvores, constituindo dois grupos: base e topo. Dentre os corpos de prova isentos de defeitos e que atendiam aos requisitos das normas, foram selecionadas aleatoriamente oito unidades de cada grupo para cada propriedade avaliada. Assim, para o processamento dos dados, foram consideradas as duas posições longitudinais do fuste (base e topo).

Os ensaios foram realizados no Laboratório de Tecnologia da Madeira da Faculdade de Agronomia e Engenharia Florestal da Universidade Eduardo Mondlane, em Maputo, Moçambique.

2.2 Determinação das propriedades físicas

O teor de umidade (TU) e a densidade básica (DB) foram determinados de acordo com as normas ISO 13061-1:2014 e ISO 13061-2:2014, respectivamente. Para cada propriedade, os corpos de prova de cada tratamento foram homogeneizados e, dentre aqueles isentos de defeitos e adequados aos requisitos das normas, foram selecionadas aleatoriamente oito corpos de prova da base e oito do topo. Assim, para o processamento dos dados, foram consideradas as duas posições longitudinais do fuste (base e topo), com oito corpos de prova por tratamento para cada propriedade avaliada.

2.3 Análise estatística

Os dados de teor de umidade e densidade básica foram submetidos ao teste F para verificação da homogeneidade das variâncias e, posteriormente, ao teste *t* de Student ($p < 0,05$) para comparação entre as posições da base e do topo do fuste. Os resultados foram expressos como média ± desvio-padrão e apresentados graficamente no Microsoft Excel.

3. Resultados e discussão

A média do teor de umidade da madeira foi de 16,19% na base e 16,54% no topo do fuste (Figura 1A), não havendo diferença significativa entre as posições avaliadas ($p > 0,05$). Esses resultados indicam uma distribuição relativamente uniforme do teor de umidade ao longo do fuste e refletem a condição higroscópica da madeira no momento da determinação.

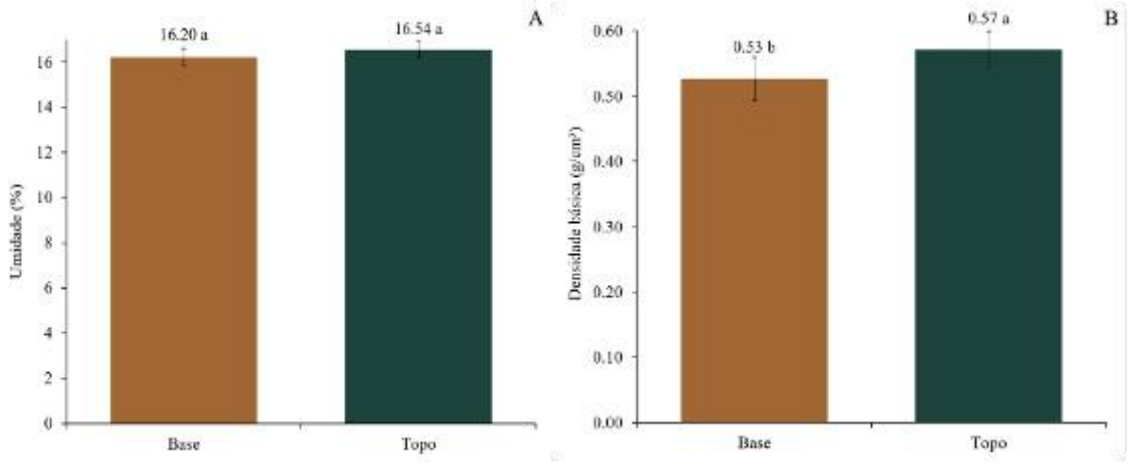


Figura 1 – Umidade da Madeira (A) e Densidade da Madeira (B) de *Avicennia marina*.

Umidade média e Densidade básica média (± desvio-padrão) da madeira de *Avicennia marina* na base e no topo do fuste. *Médias identificadas por letras diferentes diferem entre si pelo teste t de Student ($p < 0,05$).

Os valores observados são compatíveis com a condição da madeira destinada à caracterização tecnológica e aproximam-se dos relatados por Manguriu et al. (2013), que encontraram teor médio de umidade de 11,03% em madeira de mangue. Esses autores destacam que teores de umidade próximos de 12% são adequados para ensaios em pequenos corpos de prova, proporcionando maior confiabilidade às propriedades mecânicas. Em contraste, Nuryawan et al. (2021) registraram teores de umidade superiores a 50% em galhos de *Avicennia marina*, evidenciando que diferenças na porção da árvore avaliada (galhos versus tronco), bem como nas condições de preparo das amostras, influenciam significativamente o teor de umidade da madeira.

A densidade básica média da madeira foi significativamente maior no topo (0,57 g cm^{-3}) do que na base (0,52 g cm^{-3}) do fuste (Figura 1B), conforme indicado pelo teste t de Student ($p < 0,05$). De acordo com o Serviço Florestal Brasileiro (SBF, 2026), esses valores classificam *Avicennia marina* como uma madeira de densidade média.

Os resultados obtidos estão de acordo com a literatura, que demonstra que a densidade da madeira é influenciada por fatores ambientais, pelo sítio de crescimento e pela estrutura anatômica da madeira. Em *Avicennia marina*, Santini et al. (2012), Santini, Schmitz et al. (2013) e Santini, Hua et al. (2013) demonstraram que a densidade é influenciada pelo gradiente intertidal, pelas condições climáticas e pela anatomia da madeira, refletindo também em seu desempenho mecânico. Além disso, (Njana et al., 2016) verificaram diferenças significativas na densidade entre espécies, indivíduos, componentes da árvore e locais de ocorrência. De forma complementar, (Nuryawan et al., 2021, 2023) atribuíram essas diferenças à proporção de fibras e vasos, bem como ao teor de umidade e às características anatômicas da madeira.

Além das propriedades tecnológicas observadas neste estudo, *Avicennia marina* apresenta importância socioeconômica para comunidades costeiras. Em Moçambique, os manguezais constituem importante fonte de madeira para pilares de construção, postes e outros produtos florestais, contribuindo para a geração de renda e a subsistência das populações locais (Machava-António et al., 2020). Em Gana, aproximadamente 98% da madeira de mangue é utilizada como lenha e 88% na construção civil (Asante et al., 2023). De forma semelhante, no Sri Lanka, madeiras de mangue, incluindo espécies do gênero Avicennia, são tradicionalmente

empregadas em construções, cercas e outras estruturas (Mafaziya et al., 2023), reforçando o potencial de *A. marina* como matéria-prima para edificações tradicionais e outras aplicações estruturais.

4. Conclusões

A madeira de *Avicennia marina* apresentou distribuição uniforme do teor de umidade entre a base e o topo do fuste, enquanto a densidade básica variou significativamente entre essas posições, com maiores valores no topo. Esses resultados demonstram que a posição longitudinal influencia a densidade básica da madeira, mas não o teor de umidade nas condições avaliadas. Além de ampliar o conhecimento sobre as propriedades físicas da espécie, o estudo fornece informações que podem subsidiar seu aproveitamento tecnológico em aplicações estruturais e na construção civil.

5. Agradecimentos

Os autores expressam sua gratidão à Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação do Espírito Santo (FAPES), à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), ao Programa de Mobilidade Internacional do GCUB (GCUB), à Universidade Federal do Espírito Santo (UFES), à Universidade Licungo (Unilicungo) e à Universidade Eduardo Mondlane (UEM), pelo apoio institucional e financeiro.

6. Referências bibliográficas

Asante, F., Hugé, J., Asare, N. K., & Dahdouh-Guebas, F. (2023). Does mangrove vegetation structure reflect human utilization of ecosystem goods and services? IScience, 26(6). https://doi.org/10.1016/j.isci.2023.106858

Augspurger, C. K., & Kelly, C. K. (1984). Pathogen mortality of tropical tree seedlings: experimental studies of the effects of dispersal distance, seedling density, and light conditions. Oecologia, 61, 211–217.

Aziz, I., & Khan, M. A. (2000). Physiological adaptations of *Avicennia marina* to seawater concentrations in the Indus Delta, Pakistan. Vision Edito, 32, 151–169.

Barbier, E. B., Hacker, S. D., Kennedy, C., Koch, E. W., Stier, A. C., & Silliman, B. R. (2011). The value of estuarine and coastal ecosystem services. In Ecological Monographs, 81(2), 169–193. https://doi.org/10.1890/10-1510.1

Barros Logsdon, N., & Calil Junior, C. (2002). Influência da Umidade nas Propriedades De Resistência E Rigidez Da Madeira,18.

Carneiro, F. S., Ruschel, A. R., Freitas, L. J. M. de, Pinheiro, K. A. O., Santos, J. C. dos D'Arace, L. M. B., & Coelho, F. de A. (2020). Densidade da madeira de espécies florestais de quatro áreas experimentais da Amazônia Oriental Brasileira (A. C. de Oliveira, Ed.). Atena Editora.

Costa, L. J., Lopes, C. B. S., Reis, M. F. de C., Cândido, W. L., de Faria, B. de F. H., & de Paula, M. O. (2017). Caracterização anatômica e descrição físico-química e mecânica da madeira de *Mimosa schomburgkii*. Floresta, 47(4), 383–390. https://doi.org/10.5380/rf.v47i4.54471

Giri, C. (2021). Recent advancement in mangrove forests mapping and monitoring of the world using earth observation satellite data. Remote Sensing, 13(4), 1–6. https://doi.org/10.3390/rs13040563

Glass, Samuel V, Zelinka, & Samuel L. (2021). Moisture Relations and Physical Properties of Wood.

Hillis, W. E. (2012). Heartwood and Tree Exudates. In T. E. Timell (Ed.), Springer Science & Business Media. Springer Science & Business Media.

Huxham, M., Dencer-Brown, A., Diele, K., Kathiresan, K., Nagelkerken, I., & Wanjiru, C. (2017). Mangroves and people: Local ecosystem services in a changing climate. In Mangrove Ecosystems: A Global Biogeographic Perspective: Structure, Function, and Services (pp. 245–274). Springer.

Kamau, A. W., Shauri, H., Hugé, J., Van Puyvelde, K., Koedam, N., & Kairo, J. G. (2024). Patterns of Mangrove Resource Uses within the Transboundary Conservation Area of Kenya and Tanzania. Sustainability (Switzerland), 16(11). https://doi.org/10.3390/su16114623

Machava-António, V., Bandeira, S. O., Macamo, C. C., & Mahanzule, R. (2020). Value chain analysis of mangrove forests in central Mozambique: Uses, stakeholders and income. Western Indian Ocean Journal of Marine Science, 19(1), 1–17. https://doi.org/10.4314/wiojms.v19i1.1

Mafaziya Nijamdeen, T. W. G. F., Ephrem, N., Hugé, J., Kodikara, K. A. S., & Dahdouh-Guebas, F. (2023). Understanding the ethnobiological importance of mangroves to coastal communities: A case study from Southern and North-western Sri Lanka. Marine Policy, 147. https://doi.org/10.1016/j.marpol.2022.105391

Malekmohammadi, L., Sheidai, M., Ghahremaninejad, F., Danehkar, A., & Koohdar, F. (2023). Studies on genetic diversity, gene flow and landscape genetic in *Avicennia marina*: Spatial PCA, Random Forest, and phylogeography approaches. BMC Plant Biology, 23(1). https://doi.org/10.1186/s12870-023-04475-6

Manguriu, G. N., Oyawa, W. O., & Abuodha, S. O. (2013). Physical and mechanical properties of mangrove from Kilifi in Kenya. Global Engineers & Technologists Review, 3(3). www.getview.org

Martínez-Díaz, M. G., & Reef, R. (2023). A biogeographical approach to characterizing the climatic, physical and geomorphic niche of the most widely distributed mangrove species, *Avicennia marina*. Diversity and Distributions, 29(1), 89–108. https://doi.org/10.1111/ddi.13643

Marzoli, A. (2007). Inventário Florestal Nacional, Maputo, 41.

MITADER. (2015). Ministério da Terra, Ambiente e Desenvolvimento Rural. Estratégia e plano de acção nacional para restauração de mangal 2015-2020. https://iucn.org/pt/content/estrategia-e-plano-de-accao-nacional-para-restauracao-de-mangal-2015-2020-draft

Niklas, K. J. (1992). Plant biomechanics: an engineering approach to plant form and function.

Njana, M. A., Meilby, H., Eid, T., Zahabu, E., & Malimbwi, R. E. (2016). Importance of tree basic density in biomass estimation and associated uncertainties: a case of three mangrove species in Tanzania. Annals of Forest Science, 73(4), 1073–1087. https://doi.org/10.1007/s13595-016-0583-0

Nuryawan, A., Syahputra, R. S., Azhar, I., & Risnasari, I. (2021). Basic properties of the mangrove tree branches as a raw material of wood pellets and briquettes. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 891(1). https://doi.org/10.1088/1755-1315/891/1/012005

Nuryawan, A., Syahputra, R. S., & Risnasari, I. (2023). Physical properties of five species of twigs from mangrove forest. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 1241(1). https://doi.org/10.1088/1755-1315/1241/1/012113

Santini, N. S., Hua, Q., Schmitz, N., & Lovelock, C. E. (2013). Radiocarbon dating and wood density chronologies of mangrove trees in arid Western Australia. PLoS ONE, 8(11). https://doi.org/10.1371/journal.pone.0080116

Santini, N. S., Schmitz, N., Bennion, V., & Lovelock, C. E. (2013). The anatomical basis of the link between density and mechanical strength in mangrove branches. Functional Plant Biology, 40(4), 400–408. https://doi.org/10.1071/FP12204

Santini, N. S., Schmitz, N., & Lovelock, C. E. (2012). Variation in wood density and anatomy in a widespread mangrove species. Trees - Structure and Function, 26(5), 1555–1563. https://doi.org/10.1007/s00468-012-0729-0

SBF. (2026). Serviço Florestal Brasileiro. Laboratório de Produtos Florestais. Banco de dados de madeiras brasileiras. https://lpf.florestal.gov.br/pt-br/madeiras-brasileiras

Silveira, L. H. C., Rezende, A. V., & Vale, A. T. (2013). Teor de umidade e densidade básica da madeira de nove espécies comerciais amazônicas. 43(2), 179–184.

Souza, E. S. C., Hurtado de Mendoza, Z. M. dos S., Borges, P. H. de M., & França, G. S. (2020). Propriedades químicas de madeiras nativas comerciais. Multitemas, 113–126. https://doi.org/10.20435/multi.v21i59.2803

Zahedinour, F., Moradi, H., & Ahmadi, K. (2026). Comparative Study of Cross-Sectional Wood Anatomy in *Avicennia marina* and *Rhizophora mucronata*. Iranian Journal of Wood and Paper Industries, 515–531. https://doi.org/10.22034/ijwp.2025.2070016.1723

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

AmazonWoodAI: Aplicação para Classificação de Espécies de Madeiras Amazônicas

Isabela R. B. Silva[1]; Pablo L. S. Rabelo[1]; Marcus de B. Braga[1]; Igor W. S. Falcão[1]; Fabricio A. Araujo[1]; Saly T. Yamaguti[1]; Gilberto N. S. Junior[1]

isabela.baia@discente.ufra.edu.br; pablolailson3@gmail.com; marcus.braga@ufra.edu.br; igor.falcao@ufra.edu.br; fabricio.araujo@ufra.edu.br; saly.takeshita@ufra.edu.br; gilbertojr@ufra.edu.br

[1] Universidade Federal Rural da Amazônia (UFRA) – Campus Paragominas, Paragominas – PA, Brasil

Resumo: A correta identificação das espécies de madeira é um desafio recorrente na comercialização e na fiscalização ambiental, uma vez que os métodos tradicionais exigem profissional especializado e estão sujeitos à subjetividade. Este trabalho tem como objetivo desenvolver e avaliar o AmazonWoodAI, uma aplicação web para classificação automatizada de espécies de madeiras amazônicas baseada na arquitetura de rede neural YOLOv11. Inicialmente foi construído um conjunto de 3.602 imagens macroscópicas da face transversal de três espécies comerciais (Cedrinho, Maçaranduba e Guajará-Bolacha), captadas com uma lupa conta-fios de 10× de aumento acoplada a smartphone. A classificação foi disponibilizada em uma aplicação web (React no frontend e Flask no backend), permitindo a inferência sob demanda no campo. O modelo alcançou acurácia de 99,33% no conjunto de teste, com F1-Score médio de 0,9933. Conclui-se que a abordagem é tecnicamente viável e pode servir como ferramenta de apoio à fiscalização, contribuindo para evitar o comércio ilegal de madeiras.

Palavras-chave: Visão computacional; Redes neurais convolucionais; Fiscalização ambiental.

AmazonWoodAI: A Web Application for the Classification of Amazonian Wood Species

Abstract: The correct identification of wood species is a recurring challenge in timber commercialization and environmental inspection, since traditional methods require trained specialists and are subject to subjectivity. This work aims to develop and evaluate AmazonWoodAI, a web application for the automated classification of Amazonian wood species based on the YOLOv11 neural network architecture. A dataset of 3,602 macroscopic transverse face images from three commercial species (Cedrinho, Maçaranduba, and Guajará-Bolacha) was built using a 10× magnification linen tester attached to a smartphone. The classification was deployed in a web application (React frontend and Flask backend), enabling on-demand inference in the field. The model achieved 99.33% accuracy on the test set, with an average F1-Score of 0.9933. We conclude that the approach is technically viable and can serve as a decision-support tool for environmental enforcement, contributing to preventing illegal timber trade.

Keywords: Computer vision; Convolutional neural networks; Environmental enforcement.

1. Introdução

Historicamente, a madeira consolidou-se como um dos recursos biológicos mais antigos e versáteis, fundamental na produção de ferramentas, abrigos e meios de transporte devido à sua trabalhabilidade e disponibilidade (CASTRO, 2018). Na região amazônica, que abriga uma das maiores biodiversidades florestais do mundo, a indústria madeireira desempenha um papel significativo, mas ainda enfrenta sérios desafios devido à exploração ilegal e ao comércio clandestino de espécies nativas. A falta de precisão na identificação das madeiras é um fator crucial que contribui para o aumento dessas práticas fraudulentas. Os métodos tradicionais de classificação, como a identificação macroscópica, exigem conhecimento especializado ou contratação de serviço técnicos que podem ser demorados e onerosos, o que torna a fiscalização ambiental mais complexa e menos eficaz.

A identificação científica da madeira é fundamental para garantir o uso adequado, a comercialização correta e o manejo sustentável das espécies florestais. No setor madeireiro, é comum que as espécies sejam reconhecidas por seus nomes comerciais; contudo, esses nomes não apresentam padronização e podem se referir a diferentes espécies ou, inversamente, uma mesma espécie pode possuir diversos nomes comerciais, o que leva a erros na comercialização e na aplicação da madeira (SOUZA et al., 2022). A identificação tradicional, baseada somente em características organolépticas, é subjetiva e geralmente insuficiente para uma identificação precisa (BOTOSSO, 2011; ZENID; CECCANTINI, 2012), comprometendo a fiscalização em grande escala. Nesse contexto, a computação, por meio de visão computacional e inteligência artificial, surge como solução inovadora, oferecendo alternativas ágeis para a triagem e identificação precisa das espécies, com baixa latência e em campo (SOUZA et al., 2020).

A ausência de identificação precisa das espécies de madeira nos processos de compras representa um problema significativo para a gestão adequada dos recursos florestais. Em aquisições governamentais, por exemplo, processos licitatórios apresentam apenas nomes populares ou listas de espécies possíveis, sem especificar qual delas foi efetivamente fornecida, indicando fragilidade na identificação correta e diminuindo a confiabilidade das informações (LENTINI et al., 2022). Gama et al. (2025) destacam que essas falhas são recorrentes em Planos de Manejo Florestal Sustentável (PMFS).

Em resposta a essas limitações, Souza et al. (2020) desenvolveram um sistema de reconhecimento automático para 46 espécies da flora brasileira utilizando descritores Local Binary Patterns (LBP) com SVM, Redes Neurais Artificiais (RNA) e Random Forest, restrito, contudo, à classificação estatística sem interface em tempo real. Silva (2023) propôs o Wood Capture, plataforma colaborativa para envio de imagens por smartphones, mas que atua como

infraestrutura de gestão e armazenamento, sem módulo nativo de IA para identificação instantânea. Já Gama et al. (2025) aplicaram Transfer Learning (ResNet50 e MobileNetV2) a imagens de cascas para 16 espécies amazônicas; entretanto, a identificação baseada em cascas restringe-se a árvores em pé ou toras com casca íntegra, limitando sua aplicação prática.

Este trabalho propõe o AmazonWoodAI, uma aplicação web de classificação automatizada das espécies Cedrinho, Maçaranduba e Guajará-Bolacha, utilizando a arquitetura de redes neurais convolucionais YOLOv11 sobre imagens macroscópicas capturadas com dispositivos móveis e lentes de aumento de baixo custo. O sistema visa potencializar a capacidade fiscalizatória, contribuindo para a preservação da biodiversidade amazônica.

2. Material e métodos

2.1 Coleta das amostras

A coleta das amostras foi realizada nas dependências de uma empresa parceira localizada em Benevides (PA), abrangendo o ciclo de transformação da madeira, desde a recepção das toras até o beneficiamento final, o que permitiu obter amostras representativas das diversas fases da matéria-prima. As amostras foram processadas e lixadas no Laboratório de Ciências Florestais da Universidade Federal Rural da Amazônia (UFRA), Campus Paragominas, com uma lixadeira manual elétrica utilizando lixas de grãos 60, 80, 100, 120, 180 e 220, para a visualização das estruturas anatômicas macroscópicas. As espécies foram identificadas pela Embrapa Amazônia Oriental, por meio de comparação com exemplares depositados em xilotecas de referência.

Foram selecionadas três espécies para este estudo: Cedrinho (*Erisma uncinatum*, Família Vochysiaceae), Maçaranduba (*Manilkara* sp., Família Sapotaceae) e Guajará-Bolacha (*Pouteria* sp., Família Sapotaceae). A escolha foi baseada na importância comercial na região amazônica e na ocorrência em ações de fiscalização contra o comércio ilegal, conforme ilustrado na Figura 1.



Figura 1 – Espécies coletadas

2.2 Construção do dataset e pré-processamento

Foi realizada a captura de aproximadamente 1.500 imagens brutas das amostras de madeira utilizando um smartphone Samsung A14 acoplado a uma lupa conta-fios de aumento de 10×, conforme apresentado na Figura 2.



Figura 2 – Smartphone Samsung A14 acoplado a uma lupa de 10×, posicionado sobre a amostra de madeira lixada

A captação foi realizada na face transversal da madeira para visualização dos elementos anatômicos; vasos, raios e parênquima axial utilizados na identificação de cada espécie. O pré-processamento foi realizado na plataforma Roboflow, que centralizou as etapas de anotação, redimensionamento das imagens para 224 × 224 pixels e correção automática da rotação (auto-orient). A técnica de aumento de dados foi aplicada para aumentar a robustez do modelo, simulando variações de ângulo, iluminação e enquadramento, por meio de: rotação entre -15° e +15°; inversão horizontal; ajuste de brilho entre -15% e +15%; e zoom com aproximações de até 20%. Com essas transformações, o conjunto final foi expandido para 3.602 imagens, divididas em: treinamento (3.153 imagens, 87%); validação (300 imagens, 8%); e teste (149 imagens, 4%).

2.3 Arquitetura do modelo

A família YOLO, originalmente proposta por Redmon et al. (2016) para detecção de objetos em tempo real, ganhou ao longo das versões uma variante específica de classificação de imagens (YOLOv11-cls). Essa variante foi escolhida neste trabalho pelo equilíbrio entre acurácia e velocidade de inferência, adequado a cenários de uso em campo. Diferentemente de arquiteturas clássicas de classificação, como CNN, ResNet, VGG ou EfficientNet, que frequentemente priorizam acurácia em ambientes computacionais mais robustos, a YOLOv11-cls apresenta uma estrutura otimizada para processamento rápido, com menor custo computacional e fácil integração em aplicações web.

Atualmente, a arquitetura YOLOv11 é amplamente utilizada em aplicações ambientais e de agricultura digital, com exemplos recentes na detecção e segmentação de viveiros de camarão em imagens de satélite (FERREIRA et al., 2026), na segmentação de frutos para a fruticultura 4.0 (SANTOS & GUEDES, 2026) e no monitoramento de pragas em armadilhas inteligentes (BEHLING & AGUIAR, 2026), reforçando sua versatilidade para variabilidades ambientais e respostas rápidas em campo.

Foi utilizada a variante YOLOv11s-cls (Small), com aproximadamente 5,4 milhões de parâmetros. O treinamento foi implementado em Python, utilizando o ecossistema da Ultralytics (JOCHER et al., 2024), e executado na plataforma Google Colab com GPUs em nuvem. Após vários testes de treinamento do modelo, os hiperparâmetros adotados foram: 50 épocas; tamanho de lote igual a 16 imagens por iteração; e resolução de entrada de 224 × 224 pixels.

O conjunto de dados foi dividido em treinamento (3.153 imagens, 87%), validação (300 imagens, 8%) e teste (149 imagens, 4%). O conjunto de treinamento foi utilizado para o ajuste dos pesos da rede, enquanto o conjunto de validação foi empregado para monitorar o desempenho durante as épocas e auxiliar na seleção do melhor modelo. Ao final do treinamento, o modelo selecionado foi aquele que apresentou melhor desempenho no conjunto de validação. A avaliação final foi realizada exclusivamente sobre o conjunto de teste, que permaneceu separado durante todo o processo de treinamento. As métricas analisadas incluíram acurácia global, precisão, revocação (recall), F1-score e matriz de confusão.

2.4 Desenvolvimento da aplicação de identificação

O sistema AmazonWoodAI foi desenvolvido com dois componentes principais: o Frontend, construído em React para garantir uma interface responsiva, e o Backend, composto

por um servidor com a lógica de IA implementada em Python e Flask, responsável por processar as imagens e realizar a classificação utilizando o modelo YOLOv11 treinado. O sistema é estruturado em quatro páginas: “Nossa História” (detalhes sobre o projeto), “Classificação” (upload de imagens para identificação em tempo real), “Espécies Amazônicas” (catálogo informativo das espécies estudadas) e "Como Preparar as Espécies" (guia prático para fiscais sobre coleta, lixamento e captura das imagens). Além disso, o software foi registrado junto aos órgãos de propriedade intelectual competentes, garantindo a proteção da inovação desenvolvida.

3. Resultados e discussão

Os dados obtidos confirmam a viabilidade técnica do uso do modelo YOLOv11 para a identificação macroscópica de espécies de madeira, alcançando acurácia global de 99,33% no conjunto de testes (149 imagens). Esse resultado valida a hipótese inicial de que Redes Neurais Convolucionais, especialmente a arquitetura YOLOv11, são eficientes para a identificação de espécies de madeira com base em características macroscópicas. A Matriz de Confusão, apresentada na Figura 3, foi gerada para analisar os erros e acertos do modelo.

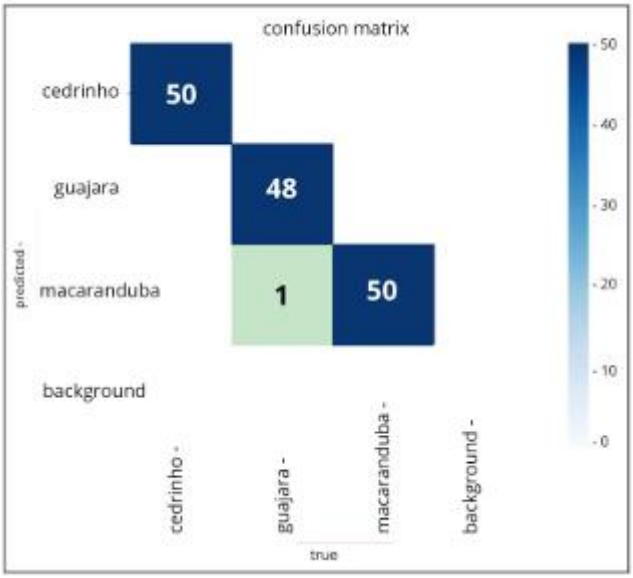


Figura 3 – Matriz de confusão (valores absolutos)

Os resultados por classe mostraram que o modelo classificou corretamente todas as 50 amostras de Cedrinho e todas as 50 amostras de Maçaranduba presentes no conjunto de teste, enquanto, das 49 amostras de Guajará-Bolacha, 48 foram atribuídas à classe correta e 1 foi

classificada como Maçaranduba único erro do modelo. É importante destacar que a acurácia de 99,33% foi obtida em ambiente experimental controlado, com iluminação estável e um único modelo de sensor (smartphone Samsung A14); em cenários reais de fiscalização, variáveis como poeira, mudanças de iluminação e o uso de dispositivos diferentes podem reduzir o desempenho. A Tabela 1 apresenta as métricas detalhadas (precisão, revocação e F1-score) do modelo para cada espécie.

Tabela 1 – Desempenho do modelo YOLOv11 por espécie no conjunto de teste

Espécie	Precisão	Revocação (Recall)	F1-Score
Cedrinho	1,0000	1,0000	1,0000
Guajará-Bolacha	1,0000	0,9796	0,9897
Maçaranduba	0,9804	1,0000	0,9901
Média aritmética	**0,9935**	**0,9932**	**0,9933**

O modelo apresentou F1-Score médio de 0,9933. O Guajará-Bolacha teve ligeira variação na revocação (0,9796) — uma amostra dessa classe foi atribuída à Maçaranduba e, por simetria, a Maçaranduba apresentou leve variação na precisão (0,9804). Zenid (2009) explica que essa confusão é compreensível, uma vez que espécies da mesma família (Sapotaceae) compartilham características anatômicas semelhantes, organização dos vasos e parênquima axial. A taxa de erro de 0,67% (1 erro em 149 imagens) é pouco significativa para a triagem em fiscalização e pode ser tolerada, pois ambas as espécies confundidas possuem propriedades mecânicas e durabilidade semelhantes, minimizando riscos em projetos estruturais. Em comparação com a literatura — Souza et al. (2020), que utilizou descritores LBP combinados com SVM, RNA e Random Forest para 46 espécies, e Gama et al. (2025), que aplicou Transfer Learning (ResNet50, MobileNetV2) sobre imagens de cascas para 16 espécies — o AmazonWoodAI alcança acurácia competitiva no conjunto de teste, ainda que com número reduzido de classes e em ambiente controlado, indicando que a abordagem por imagens macroscópicas do plano transversal aliada a CNNs modernas é operacionalmente viável.

Embora a acurácia obtida tenha sido elevada (99,33%), os resultados devem ser interpretados no contexto do escopo deste estudo. O AmazonWoodAI foi concebido como uma prova de conceito para investigar a viabilidade da utilização de técnicas modernas de visão computacional na identificação automatizada de madeiras amazônicas. Por esse motivo, os experimentos contemplaram inicialmente três espécies comerciais de elevada relevância econômica, utilizando um conjunto de teste composto por 149 imagens independentes.

Apesar dessas limitações, os resultados obtidos estão em consonância com a literatura. Souza et al. (2020) demonstraram que imagens macroscópicas da face transversal da madeira possuem elevado poder discriminativo para identificação automática de espécies, alcançando resultados promissores para 46 espécies brasileiras por meio de descritores texturais e algoritmos de aprendizado de máquina. De forma semelhante, Gama et al. (2025) obtiveram elevado desempenho utilizando redes neurais profundas aplicadas à classificação de espécies amazônicas a partir de imagens de cascas. Esses estudos corroboram que características anatômicas da madeira podem ser exploradas com sucesso por técnicas de inteligência artificial.

No nível de software, o AmazonWoodAI foi desenvolvido como uma aplicação web interativa, intuitiva e fácil de usar por fiscais e técnicos em campo. A interface, apresentada na Figura 4, permite que o usuário envie uma imagem da amostra de madeira e receba rapidamente a identificação da espécie, juntamente com a probabilidade de acerto.

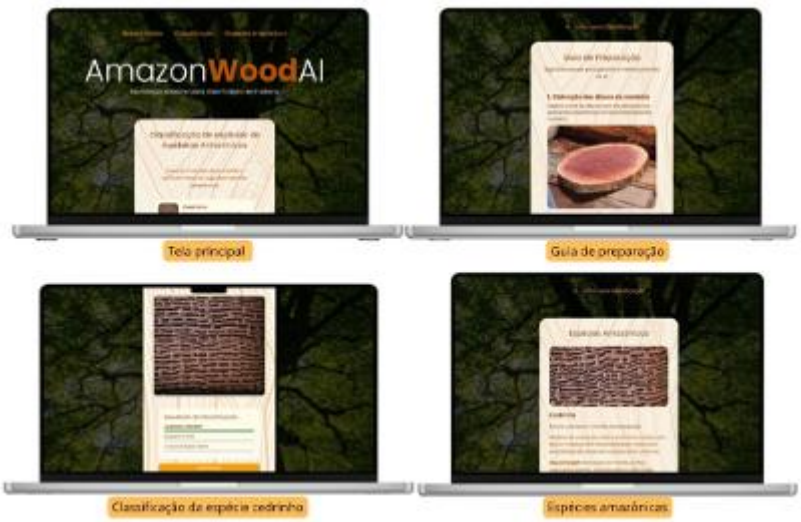


Figura 4 – Tela principal, guia de preparação, classificação da espécie e espécies amazônicas

A solução foi projetada para uso em campo, sem necessidade de especialistas em tempo real, agilizando a triagem inicial de madeiras em barreiras fiscais, pátios de madeireiras ou locais de inspeção.

4. Conclusões

O AmazonWoodAI cumpriu seu objetivo ao validar a identificação automatizada de madeiras amazônicas com 99,33% de acurácia. O uso da arquitetura YOLOv11 integrada a smartphones e lentes de baixo custo demonstra que a visão computacional pode ser democratizada, oferecendo diagnósticos rápidos sem dependência de infraestruturas laboratoriais caras; a solução full-stack (Flask/React) estabelece um modelo funcional de apoio

à decisão em campo. Contudo, o sistema é atualmente uma prova de conceito, com limitações que incluem o catálogo restrito a três espécies, a validação em ambiente controlado e a ausência de testes com usuários finais. Para o futuro, prevê-se a expansão do catálogo botânico, uma versão móvel offline para áreas remotas e parcerias com órgãos governamentais para integrar a ferramenta aos protocolos de inspeção reais. Visando a reprodutibilidade, o código-fonte da aplicação e o conjunto de imagens estão disponíveis mediante solicitação aos autores.

5. Agradecimentos

Os autores agradecem à empresa Benevides Madeira, à Universidade Federal Rural da Amazônia (UFRA) – Campus Paragominas, ao Núcleo de Pesquisas em Computação Aplicada, eao Laboratório de Ciências Florestais pela parceria científica e infraestrutura disponibilizada para esta pesquisa.

6. Referências bibliográficas

Behling, E. M., & Aguiar, M. S. (2026). Exploring YOLO Algorithm application in Smart Traps for Fruit Pest Detection. Anais do XVII Workshop de Computação Aplicada à Gestão do Meio Ambiente e Recursos Naturais (WCAMA). SBC.

Botosso, P. C. (2011). Identificação macroscópica de madeiras: guia prático e noções básicas para o seu reconhecimento. Embrapa Florestas.

Castro, V. G. de (Org.). (2018). Deterioração e preservação da madeira. EdUFERSA.
Ferreira, A. C., et al. (2026). Aplicando o Modelo YOLOv11 para Detectar e Segmentar Viveiros de Camarão em Imagens Georreferenciadas. Anais do XVII Workshop de Computação Aplicada à Gestão do Meio Ambiente e Recursos Naturais (WCAMA). SBC.

Gama, N. C., et al. (2025). Automatic recognition of commercial tree species from the Amazon flora using bark images and transfer learning. Forests, 16(9), 1–15. https://doi.org/10.3390/f16091374

Jocher, G., et al. (2024). Ultralytics YOLO11 (Versão 11.0.0) [Software]. https://github.com/ultralytics/ultralytics

Lentini, M. W., Marcelo, H. M., Dias, A. S., Bernardes, A. T., & Erdmann, A. A. (2022). Acertando o alvo 4: panorama atual e tendências para mercados sustentáveis de madeira da Amazônia. Imaflora.

Redmon, J., Divvala, S., Girshick, R., & Farhadi, A. (2016). You Only Look Once: Unified, Real-Time Object Detection. In Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR) (pp. 779–788). IEEE.

Santos, V. R., & Guedes, E. B. (2026). Segmentação de Objetos em Tempo Real na Fruticultura: Contribuições para Agricultura 4.0. Anais do XVII Workshop de Computação Aplicada à Gestão do Meio Ambiente e Recursos Naturais (WCAMA). SBC.

Silva, R. V. (2023). Wood Capture: uma ferramenta para coleta de informações de espécies de madeira (Trabalho de Conclusão de Curso). Instituto Federal de Ciência e Tecnologia de Pernambuco, Recife.

Souza, D. V., Santos, J. X., Vieira, H. C., Naide, T. L., Nisgoski, S., & Oliveira, L. E. S. (2020). An automatic recognition system of Brazilian flora species based on textural features of macroscopic images of wood. Wood Science and Technology, 54, 1065–1090. https://doi.org/10.1007/s00226-020-01196-z

Souza, F. I. B., et al. (2022). Identificação anatômica de madeiras na xiloteca da Embrapa Amazônia Oriental, Belém, Pará, Brasil (Documentos, 473). Embrapa Amazônia Oriental.

Zenid, G. J. (2009). Madeira: uso sustentável na construção civil (2. ed., Publicação IPT n. 3010). IPT.

Zenid, G. J., & Ceccantini, G. C. T. (2012). Identificação macroscópica de madeiras. Instituto Florestal.

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Análise comparativa da densidade da madeira de cajuaçu (*Anacardium giganteum*) e virola (*Virola* spp.)

José Cícero Pereira Júnior[1]; Thâmara dos Santos Osaki[1]; Rodrigo Schmitz[1]; Antônio Rabelo e Silva[2]; Elaine Cristina Campos Pereira[2]; Elder Iarllen Chaves Elias[2]; Raissa da Costa Marques[2]; Iêdo Souza Santos[3]

[1] Pós-graduando do Programa de Engenharia Florestal, Universidade do Estado de Santa Catarina - UDESC
[2] Estudante de Engenharia Florestal, Programa Forma Pará, Universidade do Estado do Pará – UEPA
[3] Departamento de Ciências e Tecnologia

Resumo: A densidade aparente da madeira constitui uma das principais propriedades físicas utilizadas na caracterização tecnológica de espécies florestais, por influenciar características relacionadas ao processamento e ao uso final da madeira. Este trabalho teve como objetivo determinar e comparar a densidade aparente da madeira de cajuaçu (*Anacardium giganteum*) e virola (*Virola* spp.). Foram utilizados 20 corpos de prova, sendo 10 de cada espécie. As dimensões das amostras foram determinadas com auxílio de paquímetro e as massas obtidas em balança de precisão após secagem em estufa, permitindo o cálculo da densidade aparente. Os dados foram submetidos à análise estatística e comparados por meio do teste de Mann-Whitney ($\alpha = 0,05$). O cajuaçu apresentou densidade aparente média de 0,47 g cm³, enquanto a virola apresentou média de 0,40 g cm³, sendo observada diferença significativa entre as espécies ($p = 0,003$). O cajuaçu apresentou maior variabilidade entre as amostras, com coeficiente de variação de 14,73%, enquanto a virola apresentou maior uniformidade, com coeficiente de variação de 3,14%. De acordo com a classificação do Laboratório de Produtos Florestais (LPF), ambas as espécies se enquadram na categoria de madeiras de baixa densidade. Os resultados indicam potencial de utilização dessas espécies em aplicações que demandem madeiras leves e de fácil processamento, contribuindo para a ampliação do conhecimento tecnológico sobre espécies florestais amazônicas.

Palavras-chave: Propriedades físicas; Espécies amazônicas; Tecnologia da madeira.

Comparative Analysis of Wood Density of Cajuaçu (*Anacardium giganteum*) and Virola (*Virola* spp.)

Abstract: Wood apparent density is one of the main physical properties used in the technological characterization of forest species, as it influences characteristics related to wood processing and end-use performance. This study aimed to determine and compare the apparent density of cajuaçu (*Anacardium giganteum*) and virola (*Virola* spp.) wood. A total of 20 defect-free specimens were evaluated, comprising 10 samples from each species. Specimen dimensions were measured using a digital caliper, and mass was determined with a precision balance after oven-drying, allowing the calculation of apparent density. Data were subjected to statistical analysis and compared using the Mann-Whitney test ($\alpha = 0.05$). Cajuaçu showed a mean apparent density of 0.47 g cm³, whereas virola presented a mean value of 0.40 g cm³, with a significant difference observed between the species ($p = 0.003$). Cajuaçu exhibited greater variability among samples, with a coefficient of variation of 14.73%, while virola showed greater uniformity, with a coefficient of variation of 3.14%. According to the classification

criteria adopted by the Forest Products Laboratory (LPF), both species are classified as low-density woods. The results indicate the potential use of these species in applications requiring lightweight wood and ease of processing, contributing to the expansion of technological knowledge regarding Amazonian forest species.

Keywords: Physical properties; Amazonian species; Wood technology.

1. Introdução

A madeira é um material renovável amplamente empregado na construção civil, na indústria moveleira e na fabricação de diversos produtos madeireiros, em razão de suas propriedades físico-mecânicas e trabalhabilidade (Eloy et al.,2024). Além de seu uso tradicional, a madeira tem ganhado destaque em estratégias de uso sustentável dos recursos florestais, especialmente em regiões tropicais, onde a diversidade de espécies oferece grande potencial tecnológico. (Goodman et al., 2024). No entanto, as propriedades da madeira apresentam elevada variabilidade entre espécies e mesmo dentro de uma mesma árvore, o que torna indispensável a realização de estudos de caracterização tecnológica para garantir seu uso adequado e eficiente (Fischer et al., 2026).

Entre as propriedades físicas da madeira, a densidade ganha destaque por sua forte relação com a resistência mecânica, estabilidade dimensional e comportamento nos processos de secagem e usinagem. Conforme Ramos et al. (2024) e Mo et al. (2024), madeiras mais densas apresentam maiores resistências no processamento, enquanto aquelas com menor densidade tendem a ser mais fáceis.

A obtenção de valores confiáveis de densidade é fundamental para a caracterização tecnológica da madeira e para a adequada indicação de usos das diferentes espécies florestais. Nesse sentido, o estudo de espécies amazônicas como o cajuaçu e a virola torna-se relevante, uma vez que ambas apresentam potencial madeireiro e importância econômica para a região Norte do Brasil. O cajuaçu destaca-se pela boa adaptação às condições edafoclimáticas amazônicas e pela disponibilidade regional, enquanto a virola é amplamente utilizada pela indústria madeireira em razão de sua boa trabalhabilidade, homogeneidade e facilidade de processamento mecânico. Contudo, apesar do potencial econômico dessas espécies, ainda são limitados os estudos que abordam de forma sistemática e comparativa suas propriedades físicas, especialmente a densidade, parâmetro essencial para a adequada indicação tecnológica da madeira (Araújo et al., 2022).

Assim, a caracterização física do cajuaçu e da virola é fundamental para recomendações de processamento, promovendo o uso racional dos recursos florestais amazônicos e contribuição para a valorização de espécies nativas em cadeias produtivas sustentáveis (Fischer et al., 2026). Sendo assim, o presente trabalho teve como objetivo determinar e comparar a densidade aparente das madeiras de cajuaçu (*Anacardium giganteum*) e de virola (*Virola* spp.), por meio da análise de corpos de prova submetidos à secagem em estufa.

2. Material e métodos

O experimento foi conduzido no município de Curuá, localizado na região Norte do Brasil, situado a 01º53′17″ de latitude sul e 55º07′00″ de longitude oeste, a aproximadamente 1.100 km da capital do estado do Pará, Belém. De acordo com dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2024), o município possui uma população estimada de 14.834 habitantes e área territorial de 1.431 km², inserindo-se em uma região de elevada diversidade florestal e expressivo potencial madeireiro.

O estudo teve como objetivo determinar a densidade da madeira de duas espécies florestais amazônicas: cajuaçu (*Anacardium giganteum*) e virola (*Virola* spp.). Para isso, foram utilizados 20 corpos de prova, sendo 10 de cada espécie, com dimensões nominais de 2 × 3 × 3 cm, obtidos a partir de um lote aleatório de madeira comercializada em um estabelecimento local no município de Curuá, Pará (Figura 1). As amostras foram previamente selecionadas de modo a não apresentarem defeitos visíveis, como rachaduras, nós excessivos, empenamentos ou sinais de ataque biológico, a fim de reduzir possíveis interferências nos resultados.

As dimensões dos corpos de prova foram determinadas com auxílio de paquímetro, e os valores obtidos foram utilizados para o cálculo do volume geométrico das amostras. Posteriormente, os corpos de prova foram submetidos à secagem em estufa até a obtenção de massa constante.



Figura 1 - Esquema de retirada dos corpos de provas para a determinação da densidade
Fonte: Os autores, 2026.

As massas dos corpos de prova foram determinadas com o auxílio de uma balança de precisão. No primeiro dia de secagem, foram realizadas duas pesagens, com o objetivo de acompanhar a

perda inicial de massa associada à remoção da umidade. Nos dias subsequentes, foi realizada uma pesagem diária, totalizando seis medições ao longo do período experimental, até a estabilização dos valores registrados e a obtenção da massa seca dos corpos de prova.

A densidade aparente da madeira foi determinada individualmente para cada corpo de prova, conforme procedimentos descritos na ABNT NBR 7190: (Associação Brasileira de Normas Técnicas [ABNT], 2022), considerando a seguinte equação:

$$\rho = \frac{m}{V}$$

$\rho =$ Densidade aparente (g/cm³); m = massa seca (g) e V = volume do corpo de prova (cm^3).

Os valores obtidos foram organizados em tabelas e submetidos à análise estatística no software R (V 4.5.3), sendo calculados a média, o desvio padrão e o coeficiente de variação. A normalidade dos dados foi avaliada pelo teste de Shapiro-Wilk. Como pelo menos um dos grupos não apresentou distribuição normal ($p < 0,05$), a comparação entre as espécies foi realizada por meio do teste não paramétrico de Mann-Whitney, adotando-se nível de significância de 5%.

3. Resultados e discussão

Os valores médios de densidade obtidos para as espécies avaliadas são apresentados na Tabela 1. A madeira de cajuaçu apresentou densidade média de 0,47a g/cm³, enquanto a virola apresentou valor médio de 0,40 g/cm³, indicando que o cajuaçu possui madeira ligeiramente mais densa. O teste de Mann-Whitney evidenciou diferença significativa entre as espécies ($p = 0,003$). De acordo com os critérios de classificação do Laboratório de Produtos Florestais (LPF), madeiras com densidade inferior a 0,50 g cm³ são classificadas como de baixa densidade, ou seja, tanto o cajuaçu quanto a virola enquadram-se nessa categoria. Essa característica está associada à maior facilidade de processamento e ao potencial de utilização em diversos segmentos da indústria madeireira.

Tabela 1 – Densidade média, desvio padrão e coeficiente de variação da madeira de cajuaçu (*Anacardium giganteum*) e virola (*Virola* spp.)

	CAJUAÇU	VIROLA
Densidade média (g/cm³)	0,47a	0,40b
Desvio Padrão	0,07	0,01
Coeficiente de variação (%)	14,73	3,14

Médias seguidas por letras distintas diferem entre si pelo teste de Mann-Whitney ($p < 0,05$).

Fonte: Os autores, 2026.

As diferenças de densidade entre as espécies refletem variações anatômicas e estruturais inerentes ao material lenhoso, influenciadas por fatores ambientais, genéticos e silviculturais, que contribuem para a heterogeneidade da madeira (Mo et al., 2024).

O cajuaçu apresentou desvio padrão de 0,07 e coeficiente de variação de 14,73%, indicando maior variabilidade entre os corpos de prova analisados quando comparado à virola, cujo coeficiente de variação foi de 3,14%. Essa diferença evidencia a heterogeneidade dos valores de densidade aparente observados para o cajuaçu. Embora fatores como idade das árvores, condições de crescimento, características anatômicas e posição de amostragem possam influenciar a variabilidade da madeira, tais aspectos não foram avaliados neste estudo. Dessa forma, os resultados indicam apenas uma maior dispersão dos valores obtidos para o cajuaçu em relação à virola, corroborando a variabilidade frequentemente observada em espécies florestais nativas (Silva et al., 2019).

Já a virola apresentou desvio padrão de 0,01 e coeficiente de variação de 3,14%, mostrando maior homogeneidade entre as amostras avaliadas. Valores menores de coeficiente de variação indicam maior uniformidade das propriedades físicas, pois contribui para maior previsibilidade do comportamento da madeira durante processos como secagem, usinagem e fabricação de produtos sólidos, reduzindo perdas por defeitos e retrabalhos (Ramos et al., 2024).

Outras espécies amazônicas com essa característica, como o paricá (*Schizolobium amazonicum*), apresentam ampla utilização na indústria de compensados e painéis de lâminas, sendo a baixa densidade uma das propriedades associadas à sua aceitação comercial. Assim, os resultados obtidos sugerem que o cajuaçu e a virola possuem potencial para aplicações que demandem madeiras leves e de fácil processamento (Limas et al., 2022). Contudo, a confirmação de sua aptidão para a produção de lâminas e painéis requer estudos complementares envolvendo propriedades de usinagem, laminação e desempenho dos produtos obtidos.

4. Conclusões

Conclui-se que a madeira de cajuaçu (*Anacardium giganteum*) apresenta densidade superior à da virola (*Virola spp.*), com diferenças físicas relevantes entre as espécies avaliadas. Apesar disso, ambas se enquadram na classe de madeiras de baixa densidade.

A virola apresentou maior uniformidade entre as amostras analisadas, enquanto o cajuaçu demonstrou maior variação nos valores de densidade, evidenciando diferenças na variabilidade entre as espécies avaliadas.

De forma geral, a determinação da densidade permitiu compreender melhor o comportamento tecnológico dessas madeiras e suas possíveis aplicações. Os resultados obtidos indicam potencial para utilização do cajuaçu e da virola em aplicações que demandem madeiras leves e de fácil processamento, contribuindo para a ampliação do conhecimento tecnológico sobre espécies florestais amazônicas.

5. Agradecimentos

Os autores agradecem ao Programa Forma Pará, do Governo do Estado do Pará, e à Prefeitura Municipal de Curuçá pelo apoio concedido para a realização deste trabalho.

6. Referências bibliográficas

Araújo, C. S. F. de, Moraes, G. S. D. S., Diniz, J. R. de S., Protásio, T. de P., & Goulart, S. L. (2022). PROPRIEDADES FÍSICAS E COLORIMÉTRICAS DA MADEIRA DE ESPÉCIES AMAZÔNICAS. *Biofix Scientific Journal*, *7*(2), 150–159. https://doi.org/10.5380/biofix.v7i2.85707.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2022). *ABNT NBR 7190-3:2022: Projeto de estruturas de madeira: Parte 3: Métodos de ensaio para corpos de prova isentos de defeitos para madeiras de florestas nativas*. ABNT.

Barbosa, R. A. G. S., Castro, V. R. de ., Surdi, P. G., Oliveira, W. M. de ., Martins, C. C. N., Zanuncio, A. J. V., Zanuncio, J. C., Carneiro, A. de C. O., & Araújo, S. de O.. (2024). Apparent density of eucalyptus wood evaluated by digital X-ray images after storage in the field during 365 days. *CERNE, 30,* e–103367. https://doi.org/10.1590/01047760202330013367.

Dos Santos, L. E. dos, Dias, C. T. dos S., Araújo , E. J. G. de, Cândido, A. C. T. F., Fernandes, P. C. C., Silva, A. R., Oliveira , A. H. M., Moutinho, V. H. P., & Martorano, L. G. (2025). Wood density of forest species in integrated crop-livestock-forest system in the Brazilian Amazon: challenges and opportunities for Bertholletia excelsa, Dipteryx odorata, and Khaya

grandifoliola. *Revista Brasileira De Ciências Ambientais*, *60*, e2370. https://doi.org/10.5327/Z2176-94782370.

Eloy, E., Mangini, T. de S., Nardini, C., Caron, B. O., Trevisan, R., & Santos, A. D. dos. (2024). Correlação da anatomia com as propriedades físicas da madeira de espécies de um sistema agroflorestal. *Revista Árvore*, *48*(1). https://doi.org/10.53661/1806-9088202448263657.

Fischer, F. J., Chave, J., Zanne, A., Jucker, T., Fajardo, A., Fayolle, A., ... & Zieminska, K. (2026). Beyond species means–the intraspecific contribution to global wood density variation. *New Phytologist*. https://doi.org/10.1111/nph.70860.

Goodman, R. C., van Hensbergen, H. J., Bengtsson, K., Kaplan, A., & Persson, M. (2024). Transforming the tropical timber industry could be the key to realizing the potential of forests and forest products. *One Earth*, *7*(7), 1142-1146. https://doi.org/10.1016/j.oneear.2024.06.016.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (2024). Curuá (PA): Cidades e Estados. Rio de Janeiro: IBGE, 2024. Disponível em: https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/pa/curua.html. Acesso em: 21 jul. 2024.

Lima, V.S., Nascimento, S. L., Santos, M. C., Nascimento, B. L. M., César, S. F., & Dias, J. M. S. (2022). Avaliação das propriedades físicas e mecânicas da madeira de paricá (Schizolobium amazonicum) utilizada na indústria de compensados no Estado do Maranhão. *Research, Society and Development*, *11*(9), e46911932065-e46911932065. https://doi.org/10.33448/rsd-v11i9.32065.

Mo, L., Crowther, T.W., Maynard, D.S. et al. The global distribution and drivers of wood density and their impact on forest carbon stocks. *Nat Ecol Evol* **8**, 2195–2212 (2024). https://doi.org/10.1038/s41559-024-02564-9.

Ramos, R. D., Longue Júnior, D., Gomes, F. J. B., & Medeiros, NatiellyC.G.de. (2024). Influência da densidade básica e da composição química da madeira para a indústria de polpa celulósica: um estudo de caso. *Ciência Florestal*, *34*(3), e85566. https://doi.org/10.5902/1980509885566.

Serviço Florestal Brasileiro. (n.d.). *Banco de dados madeiras brasileiras*. Laboratório de Produtos Florestais (LPF). https://lpf.florestal.gov.br/pt-br/bd-madeiras-brasileiras.

Silva, J. P. M., Fernandes, M. R. de M., Gonçalves, A. F. A., Lopes, I. L. e ., Silva, G. F. da ., & Cabacinha, C. D.. (2019). Estimation of the Basic Wood Density of Native Species Using Mixed Linear Models. *Floresta E Ambiente*, *26*(spe1), e20180387. https://doi.org/10.1590/2179-8087.038718.

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Análise histoquímica e Espectroscopia Raman da lignina guaiacil e siringil em madeiras amazônicas

Josy Tainara Silva Silva[1]; Uasmim Lira Zidanes[2]; Silvino Intra Moreira[3]; Tatiana de Fátima Martins Pires[1]; Marcela Pires de Oliveira[1]; Jordão Cabral Moulin[1]

[1] Universidade Federal do Espirito Santo (UFES)
[2] Universidade Federal de Lavras (UFV)
[3] Universidade Federal de Uberlândia (UFU)

Resumo: A distribuição da lignina em paredes celulares de madeiras amazônicas foi avaliada qualitativa e quantitativamente em sete espécies nativas comercializadas na Amazônia. Cortes histológicos transversais foram submetidos à reação de Mäule para diferenciação entre lignina guaiacil e siringil e analisados por espectroscopia Raman para quantificação relativa dessas unidades químicas em fibras e vasos. A lignina do tipo guaiacil predominou nas paredes dos vasos e na lamela média em todas as espécies analisadas. Nas fibras, observou-se maior variabilidade química, com predominância de lignina siringil em angelim-saia e melancieira e maior proporção de lignina guaiacil em angelim-pedra, angelim-vermelho, freijó, guaruba e pequiá. Os resultados obtidos por espectroscopia Raman corroboraram as observações histoquímicas da reação de Mäule, evidenciando diferenças na composição química da lignina entre espécies e tipos celulares. A predominância de lignina guaiacil em vasos e lamela média indica associação com funções estruturais relacionadas à rigidez e resistência mecânica, enquanto maiores proporções de lignina siringil nas fibras sugerem paredes celulares menos condensadas e potencialmente mais flexíveis.

Palavras-chave: Espectroscopia; Parede Celular; Reação de Mäule.

Histochemical and Raman Analysis of Guaiacyl and Syringyl Lignin in Amazonian Woods

Abstract: Lignin distribution in the cell walls of Amazonian woods was qualitatively and quantitatively evaluated in seven native species commercially traded in the Amazon region. Transverse histological sections were subjected to the Mäule reaction to differentiate guaiacyl and syringyl lignin and analyzed by Raman spectroscopy for the relative quantification of these chemical units in fibers and vessels. Guaiacyl-type lignin predominated in vessel walls and the middle lamella in all analyzed species. In fibers, greater chemical variability was observed, with predominance of syringyl lignin in angelim-saia and melancieira, and higher proportions of guaiacyl lignin in angelim-pedra, angelim-vermelho, freijó, guaruba, and pequiá. The results obtained by Raman spectroscopy corroborated the histochemical observations from the Mäule reaction, revealing differences in lignin chemical composition among species and cell types. The predominance of guaiacyl lignin in vessels and the middle lamella indicates its association with structural functions related to rigidity and mechanical resistance, whereas higher proportions of syringyl lignin in fibers suggest less condensed and potentially more flexible cell walls.

Keywords: Spectroscopy; Cell Wall; Mäule Reaction.

1. Introdução

Entre os constituintes da parede celular, a lignina destaca-se como um polímero fenólico tridimensional responsável pela rigidez da parede, impermeabilização dos tecidos e resistência mecânica da madeira, além de atuar como barreira contra degradação biológica e ataque de patógenos (Boerjan et al., 2003; Ralph et al., 2019). A distribuição da lignina na parede celular não ocorre de maneira homogênea, variando entre as diferentes camadas celulares e entre tipos celulares especializados. A lamela média, altamente lignificada, atua como cimento intercelular (Donaldson 2001; Saka e Goring 1985), enquanto a lignina nas paredes das fibras e dos vasos contribui para o suporte mecânico e reforço estrutural dos elementos condutores (Donaldson 2001).

Além da distribuição espacial, a composição química da lignina também varia significativamente entre espécies e tecidos. Em angiospermas, a lignina é composta predominantemente por unidades guaiacil (G) e siringil (S), cuja proporção influencia diretamente propriedades químicas e mecânicas da madeira (Ralph et al., 2019). As unidades guaiacil apresentam maior condensação estrutural devido à elevada proporção de ligações carbono-carbono, conferindo maior rigidez, resistência mecânica e menor susceptibilidade à degradação química. Em contrapartida, unidades siringil apresentam maior proporção de ligações β-O-4, menos condensadas e mais suscetíveis à clivagem química, estando frequentemente associadas a paredes celulares mais flexíveis (Boerjan et al., 2003; Ralph et al., 2019).

A diferenciação entre lignina guaiacil e siringil pode ser realizada por métodos histoquímicos e espectroscópicos. A reação de Mäule é amplamente utilizada para avaliação qualitativa da distribuição dos tipos de lignina em tecidos vegetais (Yamashita et al., 2016), enquanto a espectroscopia Raman permite caracterizar e quantificar diferenças químicas diretamente na parede celular, preservando a integridade anatômica das amostras (Agarwal et al., 2019). A combinação dessas técnicas possibilita compreender a organização química da lignina em diferentes tipos celulares e sua relação com a função estrutural da madeira. Diante disso, o presente estudo teve como objetivo analisar qualitativa e quantitativamente a distribuição das ligninas guaiacil e siringil em fibras, vasos e lamela média de sete espécies nativas comercializadas na Amazônia, utilizando a reação histoquímica de Mäule e espectroscopia Raman.

2. Material e métodos

A madeira foi coletada em serrarias e marcenarias localizadas na área urbana do município de Altamira, Pará, Brasil. Foram selecionadas amostras de sete espécies comercializadas na região: melancieira (*Alexa grandiflora Ducke*, Fabaceae), angelim-saia (*Parkia pendula* (Willd.) Benth. ex Walp., Fabaceae), guaruba (*Vochysia maxima* Ducke, Vochysiaceae), angelim-pedra (*Hymenolobium petraeum* Ducke, Fabaceae), freijó (*Cordia sagotii* I.M. Johnst., Boraginaceae), pequiá (*Caryocar villosum* (Aubl.) Pers., Caryocaraceae) e angelim-vermelho (*Dinizia excelsa* Ducke, Fabaceae).

Amostras de madeira com dimensões de 1,0 × 1,5 × 2,0 cm, orientadas nas direções radial, tangencial e longitudinal, respectivamente, foram previamente amolecidas em água em ebulição. Em seguida, foram seccionadas em micrótomo de deslizamento Leica SM 2000R, obtendo-se cortes no plano transversal com espessura média de 20 µm.

2.1 Distribuição espacial da lignina guaiacil e siringil na madeira

A distribuição dos tipos de lignina foi avaliada por meio da reação de Mäule, conforme descrito por Yamashita et al. (2016). Esse método permite a distinção qualitativa entre lignina siringil (coloração avermelhada) e lignina guaiacil (coloração amarelada), conforme Nakagawa et al. (2012).

Os cortes transversais foram submetidos à solução de permanganato de potássio ($KMnO_4$) a 1% (m/v) por 5 minutos, seguidos de três lavagens com água destilada. Em seguida, foram tratados com ácido clorídrico (HCl) 1 N por 30 minutos e novamente lavados. A reação foi desenvolvida com adição de tampão Tris-HCl 1 M (pH 8), sendo os cortes montados em lâminas e cobertos com lamínulas. As observações foram realizadas em microscópio de fluorescência Zeiss Axio Scope A.1, com fonte HBO 50, utilizando excitação entre 440–490 nm e emissão entre 600–650 nm.

2.2 Composição química da madeira

A remoção dos extrativos foi realizada segundo a TAPPI T 204 cm-17 (2017), utilizando extração em Soxhlet com acetona por 6 h, seguida de extração em água quente. Após a remoção dos solventes, as amostras foram secas em estufa até peso constante. O teor de lignina foi determinado pelo método Klason, conforme a TAPPI T 222 om-22 (2022), com modificações propostas por Gomide e Demuner (1986). As amostras isentas de extrativos foram tratadas com ácido sulfúrico a 72%, submetidas à autoclavagem e posteriormente filtradas para obtenção da lignina insolúvel. A lignina solúvel foi determinada por espectrometria, segundo

Goldschimid (1971), e o teor total de lignina foi obtido pela soma das frações solúvel e insolúvel.

2.3 Teor de lignina guaiacil e siringil em fibras e vasos estimado por espectroscopia Raman

Para a análise por espectroscopia Raman, os cortes histológicos previamente obtidos foram acondicionados em lâminas de vidro e submetidos a uma bateria alcoólica crescente de etanol e água deionizada (20%, 40%, 60%, 80% e 100%), permanecendo aproximadamente cinco minutos em cada solução. Esse procedimento teve como objetivo reduzir a autofluorescência causada por extrativos e outros compostos químicos, que podem interferir na qualidade do sinal Raman e comprometer a identificação dos picos espectrais. Após a desidratação, os cortes foram secos ao ar e analisados diretamente nas lâminas.

A caracterização química foi realizada em um microscópio Raman Alpha300 (WITec, 2022), utilizando laser de 633 nm, potência de 100 mW e objetiva de 50×. Os espectros foram obtidos na faixa de 100 a 4000 cm^{-1} e processados no software Origin 2026. As leituras foram realizadas na parede celular de fibras e vasos, com cinco replicatas por elemento celular. Também foram obtidos espectros de *Pinus* sp. para identificação dos picos de lignina guaiacil e posterior subtração dos espectros das folhosas, visando estimar a lignina siringil (Agarwal et al., 2019).

Inicialmente, os espectros foram normalizados de 0 a 1 e utilizada a média dos cinco espectros, seguindo Agarwal et al. (2019). Em seguida, foi realizada a correção da linha de base (*baseline*) e a normalização com base no pico de 1096 cm^{-1}. Posteriormente, os espectros de *Pinus* sp. foram subtraídos para destacar a lignina siringil, identificada pelo pico em 370 cm^{-1}, cuja área foi utilizada na Equação 1. Como as espécies apresentaram diferentes teores de holocelulose, foi aplicada a Equação 2 para ajuste da relação entre os carboidratos da folhosa e do *Pinus*.

$$\text{Intensidade corrigida I} = (\text{área do pico em 370 } cm^{-1} \times 100) / \text{teor de lignina} \quad (1)$$

$$\text{Intensidade corrigida II} = (\text{Intensidade corrigida I}) \times (\text{relação de holocelulose}) \quad (2)$$

Posteriormente, a Equação 3 foi utilizada para estimar o teor de lignina siringil com base na intensidade corrigida II e na área do pico em 370 cm^{-1} (I370-area). A porcentagem de lignina guaiacil foi obtida pela subtração do resultado da Eq. 3 de 100.

%SRaman = (I370-area + 10,542) / 0,4768 (3)

3. Resultados e discussão

A reação de Mäule distingue unidades de lignina com base no número de grupos metoxila presentes no anel aromático. Unidades siringil possuem dois grupos metoxila e, durante o processo da reação de Mäule, que envolve oxidação com permanganato de potássio, tratamento ácido com HCl e posterior reação em meio alcalino, formam cromóforos que emitem coloração vermelha (Yamashita et al. 2016). Já as unidades guaiacil, por possuírem apenas um grupo metoxila, não conseguem emitir essa coloração, resultando na tonalidade amarela a amarelado-esverdeada (Meshitsuka e Nakano, 1977; Yamashita et al. 2016). Essa diferenciação mostra que a distribuição da lignina não é homogênea entre os tipos celulares, a lignina do tipo guaiacil tende a se concentrar em vasos e lamela média, conferindo resistência à compressão, enquanto a lignina siringil predomina nas fibras, favorecendo flexibilidade e resistência à tração (Zhou et al. 2011).

A coloração da reação de Mäule permitiu a distinção qualitativa e a visualização da distribuição diferencial dos dois tipos de lignina na parede celular das sete espécies estudadas (Figura 1). A lignina do tipo siringil, identificada pela coloração vermelha, foi predominantemente observada nas paredes das fibras de angelim-saia e melancieira (Figura 1f, r). Em contraste, a lignina do tipo guaiacil, identificada pela coloração amarela, predominou nas paredes das fibras de angelim-pedra, angelim-vermelho, freijó, guaruba e pequiá (Figura 1c, i, l, o, u). Em todas as espécies analisadas, observou-se que a parede dos vasos apresentou maior concentração de lignina guaiacil. Além disso, em sua maioria, na lamela média foi registrada coloração amarela, também indicativa da presença de lignina guaiacil. A distinção entre a lamela média e a parede celular foi realizada com base na variação da coloração observada nas imagens, uma vez que a lamela média apresentou tonalidade distinta daquela registrada na parede das células adjacentes.

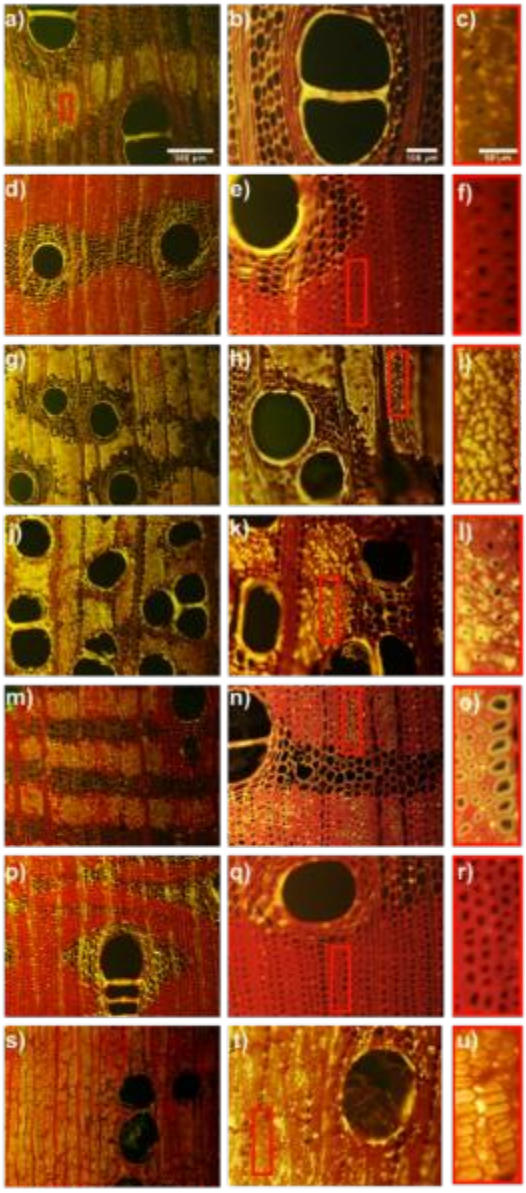


Figura 1 - Distribuição da lignina S (siringil) e G (guaiacil) em cortes transversais da madeira de sete espécies nativas da Amazônia, evidenciada pela reação de Mäule. Magnificação de 100× (primeira coluna), magnificação de 200× (segunda coluna) e magnificação de 500× (terceira coluna) detalhando a área selecionada em vermelho. (a–c) Angelim-pedra; (d–f) Angelim-saia; (g–i) Angelim-vermelho; (j–l) Freijó; (m–o) Guaruba; (p–r) Melancieira; (s–u) Pequiá.

Os resultados obtidos por espectroscopia Raman corroboram as observações qualitativas da reação de Mäule e permitiram estimar a proporção relativa de unidades guaiacil (G) e siringil (S) nas diferentes células. Os espectros Raman obtidos para as paredes dos vasos e fibras das espécies analisadas evidenciaram variações no perfil das bandas associadas às unidades guaiacil e siringil, permitindo a diferenciação química entre os tipos celulares e entre espécies (Figura 2).

A quantificação relativa dessas unidades está apresentada na Tabela 1. A concordância entre os resultados histoquímicos e espectroscópicos reforça a eficiência da espectroscopia Raman para a caracterização da lignina, conforme demonstrado por Agarwal et al. (2019), que utilizaram essa técnica para determinar a proporção relativa de unidades siringil e guaiacil em madeiras de angiospermas. Os autores observaram variações expressivas no teor de lignina, com valores de aproximadamente 49,3% S e 50,7% G em álamo, 84,2% S e 15,8% G em liquidâmbar e 83,9% S e 16,1% G em bétula branca.

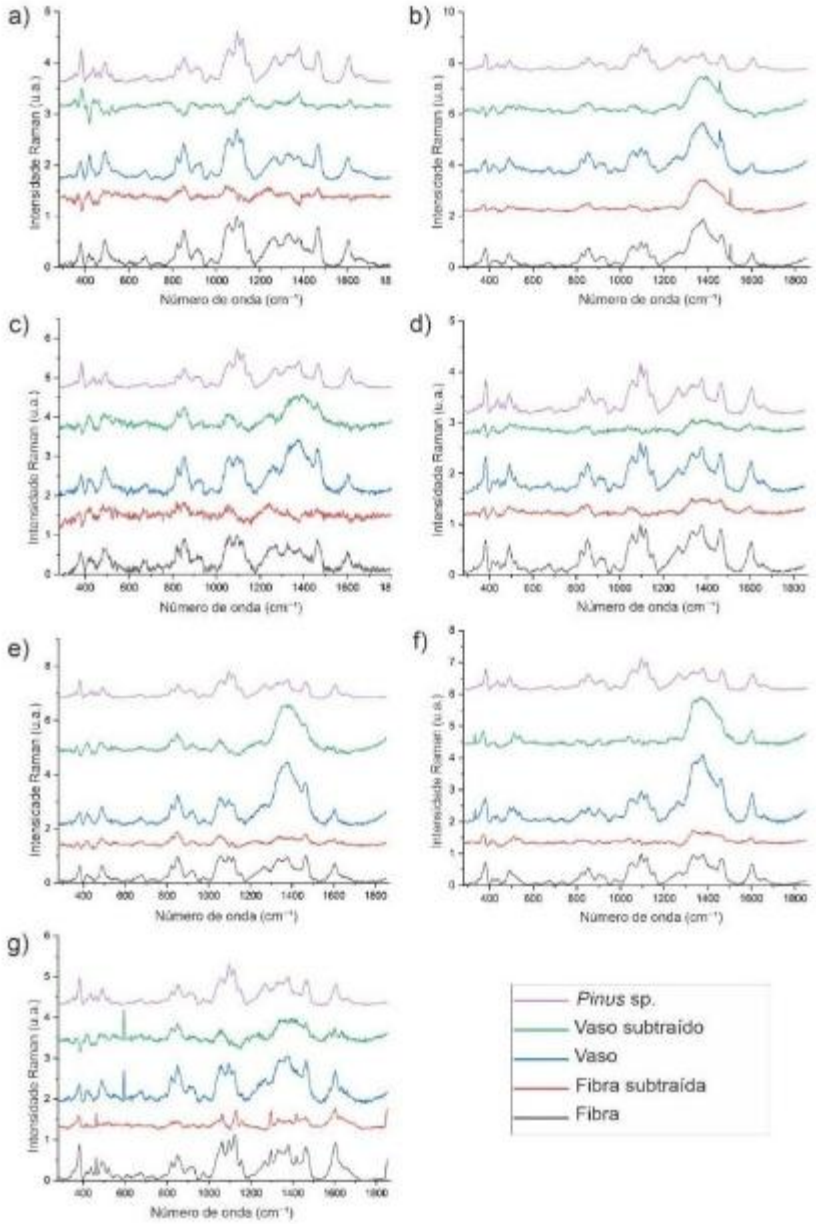


Figura 2 - Espectros Raman das paredes celulares de vasos e fibras das espécies estudadas, comparados ao espectro de referência de *Pinus* sp., utilizado como padrão de lignina do tipo guaiacil. a) Angelim-pedra; b) Angelim-saia; c) Angelim-vermelho; d) Freijó; e) Guaruba; f)

Melancieira; g) Pequiá. Vaso e fibra subtraídos representam os espectros resultantes da diferença entre os espectros de *Pinus* sp. e os das madeiras de folhosas.

Tabela 1 - Proporção relativa de lignina siringil (S) e guaiacil (G) (%) na parede celular de fibras e vasos, determinada por espectroscopia Raman.

Espécie	Mäule	Parede celular	Lignina por espectroscopia	
			Siringil (%)	Guaiacil (%)
Angelim-pedra		Fibra	24,69	75,31
		Vaso	22,88	77,12
Angelim-saia		Fibra	55,37	44,63
		Vaso	16,58	83,42
Angelim-vermelho		Fibra	32,95	67,05
		Vaso	24,86	75,14
Freijó		Fibra	30,19	69,81
		Vaso	28,15	71,85
Guaruba		Fibra	33,29	66,71
		Vaso	28,26	71,74
Melancieira		Fibra	50,44	49,56
		Vaso	26,82	73,18
Pequiá		Fibra	28,72	71,28
		Vaso	24,20	75,80

De forma geral, os vasos apresentaram predominância de lignina guaiacil em todas as espécies, enquanto as fibras exibiram maior variabilidade interespecífica. Angelim-saia e melancieira apresentaram maior proporção de unidades siringil nas fibras, ao passo que angelim-pedra, angelim-vermelho, freijó, guaruba e pequiá apresentaram predominância de lignina guaiacil, confirmando os resultados histoquímicos.

Os resultados obtidos por meio da reação de Mäule e pela espectroscopia Raman mostraram diferenças na composição da lignina entre e dentro das espécies analisadas, refletindo estratégias adaptativas e funcionais distintas. A predominância de unidades siringil nas fibras das espécies angelim-saia e melancieira sugere paredes celulares mais homogêneas e flexíveis, uma vez que esse tipo de lignina está associado a uma maior proporção de ligações β-O-4, menos condensadas. Essa característica favorece maior elasticidade das fibras e torna a lignina menos recalcitrante, portanto mais suscetível à degradação química e biológica (Sivan et al. 2021; Yang et al. 2020). Por outro lado, a maior proporção de unidades guaiacil nas paredes das fibras das espécies angelim-pedra, angelim-vermelho, freijó, guaruba e pequiá indicou

maior proporção de lignina guaiacil, geralmente associada à maior resistência mecânica e menor suscetibilidade à degradação química e biológica (Yang et al. 2020).

Esse resultado é relevante, pois o esperado seria maior proporção de lignina siringil nas fibras, padrão já descrito para diversas espécies lenhosas (Kim et al. 2014; Yang et al. 2020; Sivan et al. 2021). Deve-se considerar que a proximidade entre a parede secundária das fibras e a lamela média pode ter influenciado parcialmente os resultados obtidos por espectroscopia Raman, diferentemente dos vasos, cujas paredes podem ser amostradas com menor interferência devido ao maior lúmen e à melhor delimitação da parede celular. A lamela média é reconhecidamente uma região altamente lignificada e enriquecida em unidades guaiacil (Donaldson, 2001; Kim et al. 2014; Zhou et al. 2011). Dessa forma, uma eventual contribuição dessa região durante as análises pode ter aumentado a participação relativa de lignina guaiacil nos resultados obtidos para as fibras.

Já a predominância de unidades guaiacil nas paredes dos vasos em todas as espécies, reforça que a lignina guaiacil, por apresentar uma estrutura mais condensada e resistente, é particularmente adequada a regiões submetidas a maiores tensões mecânicas, como vasos condutores que enfrentam variações de pressão causadas pelo fluxo de seiva (Donaldson, 2001). A predominância de unidades guaiacil na lamela média das espécies, correspondente à junção entre paredes celulares adjacentes, corrobora estudos que apontam essa área como altamente lignificada. Esse predomínio está diretamente relacionado à função estrutural da lamela média, que atua como um cimento intercelular, promovendo a coesão dos tecidos e conferindo elevada resistência mecânica à madeira (Raven et al. 1999; Donaldson, 2001; Kim et al. 2014).

4. Conclusões

A composição e a distribuição da lignina variaram entre as espécies e os tipos celulares, com predominância de lignina guaiacil nos vasos e na lamela média e variações nas fibras, uma vez que as espécies angelim-saia e melancieira apresentaram unidades de lignina siringil na parede das fibras e as espécies angelim-pedra, angelim-vermelho, freijó, guaruba e pequiá apresentaram unidades de lignina guaiacil. Mostrando que a lignina atua de forma diferenciada conforme a função estrutural de cada célula.

5. Agradecimentos

Os autores agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio financeiro (Código de Financiamento 001).

6. Referências bibliográficas

Agarwal, U. P., Ralph, S. A., Padmakshan, D., Liu, S., & Foster, C. E. (2019). Estimation of syringyl units in wood lignins by FT-Raman spectroscopy. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, *67*(15), 4367–4374. https://doi.org/10.1021/acs.jafc.8b06707

Boerjan, W., Ralph, J., & Baucher, M. (2003). Lignin biosynthesis. *Annual Review of Plant Biology*, *54*, 519–546. https://doi.org/10.1146/annurev.arplant.54.031902.134938

Donaldson, L. A. (2001). Lignification and lignin topochemistry – An ultrastructural view. *Phytochemistry*, *57*(6), 859–873. https://doi.org/10.1016/S0031-9422(01)00049-8

Gomide, J. L.; Demuner, B. J. (1986). Determination of lignin content in woody material: modified Klason method. O Papel, 47, 36-38.

Goldschimid, O. (1971). Ultraviolet spectra. In: Sarkanen KV, Ludwig CH (eds) Lignins: Occurrence, formation, structure and reactions. Wiley, New York, 241–266

Kim, J. S., Gao, J., Terziev, N., Daniel, G., & Gellerstedt, G. (2014). Chemical and ultrastructural changes associated with the tension wood of ash wood (*Fraxinus excelsior* L.). *Holzforschung*, *68*(7), 771–779. https://doi.org/10.1515/hf-2014-0148

Meshitsuka, G., & Nakano, J. (1977). Mäule colour reaction and its application to lignin chemistry. *Mokuzai Gakkaishi*, *23*, 526–533.

Nakagawa, K., Yoshinaga, A., & Takabe, K. (2012). Anatomy and lignin distribution in reaction wood of angiosperms. *Annals of Botany*, *110*(4), 897–904. https://doi.org/10.1093/aob/mcs144

Ralph, J., Lapierre, C., & Boerjan, W. (2019). Lignin structure and engineering. *Current Opinion in Biotechnology*, *56*, 240–249. https://doi.org/10.1016/j.copbio.2019.02.019

Raven, P. H., Evert, R. F., & Eichhorn, S. E. (1999). *Biology of plants* (6th ed.). W.H. Freeman.

Saka, S., & Goring, D. A. I. (1985). Localization of lignins in wood cell walls. Em T. Higuchi (Ed.), *Biosynthesis and biodegradation of wood components* (pp. 51–62). Academic Press. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-347880-1.50007-6

Sivan, P., Rao, K. S., & Rajput, K. S. (2021). Tension wood anatomy and lignification patterns in angiosperms. *Bosque*, *42*(1), 99–110. https://doi.org/10.4067/S0717-92002021000100099

TAPPI – Technical Association of the Pulp and Paper Industry. (2017). T 204 cm-17: Solvent extractives of wood and pulp. TAPPI.

TAPPI – Technical Association of the Pulp and Paper Industry. (2022). T 222 om-22: Acid-insoluble lignin in wood and pulp. TAPPI.

WITec GmbH. (2022). *alpha300 Raman Imaging Microscope*. https://www.witec.de

Yamashita, D., Kimura, S., Wada, M., & Takabe, K. (2016). Improved Mäule color reaction for visualization of syringyl lignin distribution in hardwood. *Journal of Wood Science*, *62*(2), 131–137. https://doi.org/10.1007/s10086-016-1536-9

Yang, Y., He, Y., & Han, L. (2020). Histochemical stains for lignin and their applications in plant cell walls. *BioResources*, *15*(2), 3524–3533. https://doi.org/10.15376/biores.15.2.3524-3533https://doi.org/10.15376/biores.15.2.3524-3533https://doi.org/10.15376/biores.15.2.3524-3533https://doi.org/10.15376/biores.15.2.3524-3533

Zhou, C. Z., Li, Q., Chiang, V. L., Lucia, L. A., & Griffis, D. P. (2011). Differentiation of lignins in poplar tissues by Raman spectroscopy. *Analytical Chemistry*, *83*(18), 7020–7026. https://doi.org/10.1021/ac200903y

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Análise *in situ* das propriedades físicas da madeira de *Pinus* para produção de lápis via NIR

In situ analysis of the physical properties of *Pinus* wood for pencil production using Near Infrared Spectroscopy (NIR)

Brumaire, Jerry.[1]; Aquilles Piva Oliveira[1] ; Silva Marianê [1] ; Tavares Bonfim Mendonça luiza[1] ; Paulo Fernando Trugilho[1]; Paulo Ricardo Gherardi Hein[1]

[1]Universidade Federal de Lavras

Resumo: Durante o processo de secagem, as Tábuas de *Pinus* destinadas à fabricação de lápis apresentam variações em suas propriedades físicas. Essas variações influenciam a qualidade da madeira e afetam o produto final. Os métodos convencionais, empregados para determinar as propriedades físicas da madeira, embora precisos, implicam um tempo de execução elevado. Este estudo teve como objetivo aplicar a espectroscopia NIR (950-1650 nm) para monitorar in situ as variações de umidade e densidade em tábuas de *Pinus* durante a secagem e otimizar a qualidade da matéria-prima para produção de lápis. Duzentos e dezesseis corpos de prova de diferentes planos anatômicos foram saturados e deixados secando ao ar. As amostras foram pesadas e os espectros obtidos a cada 10% de perda de água até o estado anidro. Os espectros foram obtidos com o sensor MicroNIR. Modelos PLS-R foram desenvolvidos, obtendo-se para densidade básica R^2cv=0,84, RMSEcv=0,07 g/cm^3 e RDPcv=2,51 e para umidade, R^2cv=0.87, RMSEcv=15,72% e RDPcv=2,78. Os RPDs> 2,5 indicam capacidade preditiva satisfatória para triagem e controle industrial. A técnica se mostrou eficaz para o monitoramento contínuo durante a secagem, com potencial para substituir métodos convencionais, reduzindo custos e tempo na caracterização da madeira.

Palavras-chave: Monitoramento contínuo; Métodos não destrutivo; Controle da qualidade.

1. Introdução

As propriedades da madeira podem variar conforme a espécie, o local de plantio, o manejo, o espaçamento, a posição da peça na tora, entre outros (Braz, 2014). A compreensão da variação dessas propriedades nas espécies de rápidocrescimento, como o *Pinus*, é essencial para garantir a utilização industrial eficiente, seja na construçãocivil, na fabricação de móveis ou em outros produtos de alto valor agregado (Trianoski, 2013).

A densidadebásica, uma das propriedades físicas que podem ser influenciadas pelos fatores supracitados, é considerada como indicador de classificação da qualidade da madeira, capaz de influenciar os processos industriais dos produtos derivados desse material (Costa, 2018; Oliveira, 2005).Seja na produção de pasta celulósica, de carvão vegetal ou de outros produtos derivados, a densidade da matéria prima deve ser levada em consideração (Costa, 2018). As peças de um tronco que apresentam densidades aproximadamente homogêneas oferecem a possibilidade de obter outras características menos variáveis (Oliveira, 2005). Por

exemplo,as indústrias de fabricação de lápis, a matéria prima deve apresentarbaixa densidade básica, que indique uma madeira leve e facilitando assim a usinagem (Loiola, 2019).

A umidade da madeirapode influenciar fortemente o comportamento do material duranteo seu uso (Daher *et al*., 2023). Essa característica também varia de acordo com diversos fatores jámencionados anteriormente, afetando principalmente as propriedades mecânicas, físicas, dimensionais, bem como a resistência ao apodrecimento (Goulart, 2025). O conhecimento da variação dessa propriedade é primordial para reduzir os defeitos durante a secagem e para classificar as peças segundo a umidade aceitável para a sua utilização.

Historicamente, diversos métodos foram empregados para avaliar a densidade e a variação da umidade na madeira, sendo inicialmente utilizadas práticas tradicionais. No entanto, esses métodos são destrutivos, trabalhosos e dispendiosos, o que dificulta a caracterização rápida e eficaz (Donato *et al*., 2014). Todavia, embora esses métodos sejam confiáveis, apenas o resultado médio de densidade ou umidade é obtido.Ao se considerar a anisotropia da matéria-prima, sua heterogeneidade e a presença de lenho inicial/tardio e juvenil/adulto, é importante a utilização de método de avaliação pontual das propriedades em questão, permitindo obter dados pertinentes sobre toda a superfície integral da madeira. Por exemplo,nas tábuas que serão utilizadas na fabricação de lápis é importante conhecer como variam suas propriedades em toda a sua superfície.

De outro modo, métodos não destrutivos baseados propriedades elétricas da madeira (resistência elétrica, capacitivos ou resistivos) também foram empregados para prever a umidade pontual do material. Contudo, a aplicação dessas técnicas é confiável apenas para umidade inferior a 30%e quando estiveracimado PSFos resultados desses métodos tornam-se cada vez mais incertos. Além disso, essas técnicas detectam a umidade somente na área diretamente em contato com o eletrodo (Amaral, 2022).

Para contornar tais limitações, a espectroscopia no infravermelho próximo (NIR) é amplamente difundida e aplicada. Na área florestal, a espectroscopia no NIR é reconhecida como método confiável para o monitoramento e a predição das propriedades da madeira. Tal técnica tem sido objeto de numerosas pesquisas, algumas das quais se concentraram na estimativa da densidade básica (Amaral *et al*., 2022), na predição da umidade da madeira (Amaral, 2018), na estimativa dos ângulos microfibrilares (Hein *et al*., 2012), entre outras. Esses trabalhos, entre muitos outros, demonstram a confiabilidade e a relevância da metodologia para extrair informações precisas sobre as características da madeira. Nesse contexto, este estudo teve como objetivo aplicar a espectroscopia no NIR para monitorar *in situ*

as variações de umidade e densidade em tábuas de *Pinus* durante a secageme otimizar a qualidade da matéria-prima para produção de lápis.

2. Material e métodos

Coleta e preparo das amostras

Dezoito tábuas de *Pinus caribeae*, com dimensões de 185 mm × 84 mm × 5 mm, foram utilizadas como suporte experimental. As amostras foram retiradas em diferentes posições da tora, da medula à casca e da base ao topo do caule, contemplandodiferentes planos anatômicos (longitudinal radial, longitudinal tangencial interno e longitudinal tangencial externo). Essas tábuas foram cortadas em 216 corpos de prova. Um código de identificação único foi atribuído a cada corpo de prova para facilitar o acompanhamento individual durante todo o processo de secagem.

Determinação da umidade

A massa e os espectros foram registrados no estado de equilíbrio de umidade dos corpos de prova (12%). Após esta etapa as amostras foram saturadas em recipiente que permitiu a aplicação de vácuo para facilitar a obtenção da umidade máxima. As amostras foram secas ao ar em ambiente controlado, com temperatura de 22°C e umidade relativa de 60%, até atingirem nova umidade de equilíbrio.

A partir da massa inicial de saturação, a umidade de cada corpos de prova foi mensurada a medida que se observava perdas periódicas de 10% da massa de água. Paralelamente, para cada umidade medida, também foram realizadas medições espectrais. Após as amostras atingirem a umidade de equilíbrio, foram transferidas para uma estufa ajustada à temperatura de 105°C ± 2°C até a obtenção de massa constante, conforme a NBR 14929 (ABNT, 2003). Foram realizadas doze etapas de medição, totalizando 2.592 (dois mil quinhentos e noventa e dois) espectros registrados.

Determinação da densidade básica

Após a saturação, os volumesdos corpos de prova foram determinados pelo método de imersão. A densidade básica foi calculada conforme a norma NBR 11941 (ABNT, 2003).

Calibração dos modelos preditivos de umidade e densidade

Os espectros obtidos foram adquiridos com o espectrômetro portátil (MicroNIR, Viavi Solutions, USA) em faixa espectral compreendida entre 950 e 1650 nm. Os espectros foram analisados com o auxílio do software Chemoface. A análise de Componentes Principais (PCA)

foi realizada a fim de reduzir a multidimensionalidade dos dados espectrais em um conjunto de componentes principais interpretáveis. Essa análise permitiu visualizar os dados de forma mais simples, possibilitando identificar o eixo de variação dominante dos espectros de densidade e umidade. Os dados de laboratório e os espectros foram correlacionados entre si para desenvolver as Regressões por Mínimos Quadrados Parciais (PLS-R) para alcançar a densidade e a umidade das tábuas. Tratamentos matemáticos foram aplicados aos dados originais (Correção Multiplicativa de Espalhamento - MSC e derivada primeira - 1D).

3. Resultados e Discussão

Após a saturação, as amostras apresentaram umidade média de 128%. Após 8 dias de secagem, os corpos de prova atingiram umidade de equilíbrio de 18% no ambiente do laboratório. Os resultados relatados por Amaral (2022) sobre o processo de secagem de corpos de prova de *Eucalyptus* mostraram que estes levaram 14 dias para atingir a umidade de equilíbrio de 16% nas mesmas condições climáticas.

Essa diferença no tempo de secagem está particularmente relacionada às estruturas anatômicas dessas duas espécies, resultando em uma variação em sua densidade. De fato, os corpos de prova da madeira de *Eucalyptus* apresentaram densidade média de 0,465 g/cm³, enquanto os de *Pinus* exibiram densidade inferior de 0,445 g/cm³, o que favorece a cinética de secagem mais rápida dos corpos de prova.

Para a Análise de componentes principais (PCA), os dados espectrais se organizam em função da variação da umidade nas amostras, desde as condições de saturação até o estado anidro. Essa distribuição na PCA mostrou que 98,91% da variância dos dados se concentra na primeira componente principal (PC1), enquanto apenas 0,94% da variância dos dados se concentra na segunda componente (PC2).

Essa análise também foi efetuada por Medeiros (2018), comparando o desempenho do espectrômetro NIR portátil com o espectrômetro NIR de bancada. Em ambos os casos, o PC1 apresentou mais de 90% da variância dos dados espectrais. Contudo, o espectrômetro NIR portátil apresentou resultado mais elevado, com 96,97%, em comparação com 94,90% do espectrômetro NIR de bancada. Costa (2018), encontrou resultados semelhantes, em que a análise de componentes principais foi realizada para os planos transversal, longitudinal radial e longitudinal tangencial da madeira do híbrido *Eucalyptus urophylla* × *Eucalyptus grandis*. Nesses três planos distintos, o PC1 explicou 99% da variância dos dados.

Para os resultados da Regressão por mínimos quadrados parciais da densidade, o tratamento da Correção Multiplicativa de Espalhamento (MSC) nos dados espectrais permitiu estabelecer o melhor modelo de predição da densidade. Esse modelo apresentou coeficiente de determinação em validação cruzada (R^2cv) mais robusto, de 0,84, erro padrão de validação (RMSEcv) de 0,07g/cm^3 e relação de desempenho do desvio padrão da validação (RPD) mais elevada, de 2,51. Os modelos desenvolvidos a partir dos dados originais, assim como aquele obtido pelo tratamento com primeira derivada, apresentaram igualmente desempenhos preditivos satisfatórios, com valores respectivos de (R^2cv = 0,82; RMSEcv = 0,08; RPD = 2,36) e (R^2cv = 0,81; RMSEcv = 0,08; RPD = 2,26).Os resultados podem ser observados na Tabela 1.

Tabela 1–Modelos de calibração e validação cruzada estimativa da densidade básica da madeira a partir de espectros NIR

Modelo Trat	R^2c	RMSEc	RPDc	R^2cv	RMSEcv	RPDcv	LV
Dados originais	0,82	0,07	2,37	0,82	0,08	2,36	10
MSC	0,85	0,07	2,53	0,84	0,07	2,51	10
1d	0,81	0,08	2,27	0,81	0,08	2,26	8

Modelo Trat: tratamento matemático modelos; R^2c: coeficiente de determinação da calibração; RMSEc: erro padrão da calibração; RPDc: relação de desempenho do desvio padrão da calibração; R^2cv: coeficiente de determinação da validação cruzada; RMSEcv: erro padrão da validação; RPDcv: relação de desempenho do desvio padrão da validação; 1d:primeira derivada; MSC: Correção Multiplicativa de Espalhamento; LV: variável latente.

No estudo conduzido por Amaral (2021), a densidade básica foi avaliada em diferentes planos anatômicos da madeira de *Eucalyptus*, utilizando o captor NIR de bancada. Os melhores modelos foram desenvolvidos no plano transversal, com os seguintes valores: R^2cv = 0,85; RMSEcv = 0,0255 g/cm^3; RPDcv = 2,68. Os modelos estabelecidos a partir dos dados espectrais obtidos no plano radial mostraram-se também satisfatórios, mas com desempenho relativamente maisbaixo do que os do plano transversal, com coeficiente de determinação de 0,70 e erro padrão de validação de 0,0373 g/cm³. Por outro lado, o plano tangencial apresentou os modelos menos satisfatórios, com os seguintes resultados: R^2cv = 0,53 e RMSEcv = 46,8kg/m³. Foram aplicados tratamentos derivada primeira(1d), normalização padrão (SNV) e derivada segunda(2l) aos dados originais do plano transversal. Como consequência, observou-se que os dois primeiros tratamentos (1d e SNV) forneceram melhores resultados, com R^2cv mais elevado (0,86) e RMSEcv mais baixo (0,0254 g/cm³).

Para os modelos de calibração e validação cruzada em PLS da umidade, os modelos ajustados por PLS-R com dados originais para prever a umidade da madeira apresentaram coeficiente de determinação em validação cruzada de 0,87, com erro quadrático médio de

validação cruzada mais baixo (RMSEcv = 15,72%) e o valor mais elevado da relação de desempenho do desvio padrão em validação (RPD = 2,78). Os resultados destes modelos indicaram uma performance preditiva superior àquela obtida após os tratamentos matemáticos. Contudo, estes últimos permitiram desenvolver modelos igualmente satisfatórios. O tratamento Correção Multiplicativa de Espalhamento apresentou melhores resultados do que a derivada primeira. Os valores obtidos foram, respectivamente, R^2cv = 0,86; RMSEcv = 16,17%; RPDcv = 2,7, contra R^2cv = 0,79; RMSEcv = 20,55%; RPDcv = 2,13 para a derivada primeira. Os resultados encontram-se na Tabela 2 a seguir.

Tabela 2–Modelos de calibração e validação cruzada estimativa da umidade da madeira a partir de espectros NIR

Modelo Trat	R^2c	RMSEc	RPDc	R^2cv	RMSEcv	RPDcv	LV
Dados originais	0,88	15,37	2,84	0,87	15,72	2,78	10
MSC	0,88	14,86	2,94	0,86	16,17	2,70	9
Id	0,89	14,74	2,96	0,79	20,55	2,13	9

Modelo Trat: tratamento matemático modelos; R^2c: coeficiente de determinação da calibração; RMSEc: erro padrão da calibração; RPDc: relação de desempenho do desvio padrão da calibração; R^2cv: coeficiente de determinação da validação cruzada; RMSEcv: erro padrão da validação; RPDcv: relação de desempenho do desvio padrão da validação; 1d:primeira derivada; MSC: Correção Multiplicativa de Espalhamento; LV: variável latente.

Resultados semelhantes foram apresentados em Clinton (2025). O autor estudou a influência da espessura da madeira sobre o desempenho preditivo da umidade, em que os diferentes modelos desenvolvidos a partir dos espectros originais NIR apresentaram coeficientes de determinação cruzada variando entre 0,79 e 0,85, e erros padrão da validação cruzada variando entre 8,53 e 10,52%. A espessura da matéria-prima não exerceu influência proporcional sobre o desempenho dos modelos. Independentemente da espessura de cada amostra, os valores de RPD obtidos para cada espessura permaneceram bastante semelhantes.

4. Conclusões

- A espectroscopia no NIR demonstrou seu desempenho e sua eficácia no monitoramento contínuo da madeira de Pinus durante a secagem, permitindo discriminar as variações das propriedades da matéria-prima.

- Os coeficientes de determinação da validação cruzada, assim como o desempenho do desvio padrão da validação, tanto para a densidade quanto para a umidade, apresentaram uma robustez satisfatória para os modelos estabelecidos.
- Os modelos obtidos permitirão facilitar a triagem e o controle industrial das tábuas de *Pinus*, contudo, o desempenho desses modelos está limitado a uma validação cruzada dos dados.
- Uma validação por predição independente é necessária para avaliar sua capacidade de generalização e sua robustez em amostras externas.

5. Agradecimentos

Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código Financeiro 001, pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq: bolsas n. 409701/2024–6), pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG, APQ-00742-23) e TO 032/2026 – INOV@ÇÃO UFLA (Processo 23090.000734/2026-70). P.R.G. Hein foi apoiado por bolsas do CNPq (processo n. 304353/2024-8).

6. Referências Bibliográficas

Amaral, E. A. (2018). Estimativa da umidade em cavacos de madeira por espectroscopia no infravermelho próximo (Dissertação de mestrado) Universidade Federal de Lavras.

Amaral, E. A. (2022). Comportamento hidromecânico da madeira de Eucalyptus durante a secagem por espectroscopia no NIR (Tese de doutorado), Universidade Federal de Lavras.

Amaral, E. A., Santos, L. M. dos, Hein, P. R. G., Costa, E. V. S., Rosado, S. C. S., & Trugilho, P. F. (2021). Evaluating basic density calibrations based on NIR spectra recorded on the three wood faces and subject to different mathematical treatments. New Zealand journal of Forestryscience, 51(2), 1-12. https://doi.org/10.33494/nzjfs512021x100x.

Braz, R. L., Oliveira, J. T. S., Rosado, A. M., Vidaurre, G. B., Paes, J. B., Tomazello Filho, M., & Loiola, P. L. (2014). Caracterização anatômica, física e química da madeira de clones de Eucalyptus cultivados em áreas sujeitas à ação de ventos. Ciência da Madeira (Brazilian Journal of Wood Science), 5(2), 127–137. https://doi.org/10.12953/2177-6830.v05n02a07.

Clinton, H. A. (2025). Mensuração in situ da variação espacial e cinética da dessorção de água na madeira de *Eucalyptus sp.* por meio da espectroscopia NIR (Dissertação de mestrado) Universidade Federal de Lavras.

Costa, E. V. S., Rocha, M. F. V., Hein, P. R. G., Amaral, E. A., Santos, L. M. dos, Brandão, L. E. V. S., & Trugilho, P. F. (2018). Influence of spectral acquisition technique and wood anisotropy on the statistics of predictive models of wood density based on near-infrared. Journal of Near Infrared Spectroscopy, 0(00), 1–11. https://doi.org/10.1177/0967033518757070.

Daher, H., Caré, S., Forêt, G., & Payet, L. (2023). Influence de la température sur l'adsorption d'eau du bois. Academic Journal of Civil Engineering, 41(1), 97–106. https://doi.org/10.26168/ajce.41.1.10.

Donato, D. B., Castro, R. V. O., Carneiro, A. C. O., Carvalho, A. M. M. L., Pereira, B. L. C., Oliveira, A. C., & Barbosa, C. J. (2014). Determinação da umidade da madeira em tora por diferentes métodos. Pesquisa Florestal Brasileira, 34(80), 449–453. https://doi.org/10.4336/2014.pfb.34.80.608.

Goulart, C. P. (2025). Análise de metodologia para determinação de umidade de toras de *Eucalyptus sp.* em pátio de secagem utilizando o NIR portátil (Dissertação de mestrado). Universidade Federal de Lavras.

Hein, P. R. G., Lima, J. T., Trugilho, P. F., & Chaix, G. (2012). Estimativa do ângulo microfibrilar em madeira de *Eucalyptus urophylla* × *E. grandis* por espectroscopia no infravermelho próximo. Floresta e Ambiente, 19(2), 194–199. https://doi.org/10.4322/floram.2012.023.

Medeiros, D. T. de, Gomes, J. N. N., Batista, F. G., Mascarenhas, A. R. P., Pimenta, E. M., Chaix, G., & Hein, P. R. G. (2024). Estimation of the basic density of Eucalyptus grandis wood chips at different moisture levels using benchtop and handheld NIR instruments. Industrial Crops & Products, 212, 118206. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2024.118206.

Loiola, P. L., Klitzke, R. J., Rocha, M. P., &Vidaurre, G. B. (2021). Physical properties of wood *Pinuscaribaea var. caribaea*, *Pinuscaribaea var. hondurensis* and *Pinusoocarpa* for pencil production. Floresta, 51(2), 354–362. https://doi.org/10.5380/rf.v51i2.68955.

Oliveira, J. T. S., Hellmeister, J. C., & Tomazello Filho, M. (2005). Variação do teor de umidade e da densidade básica na madeira de sete espécies de eucalipto. Revista Árvore, 29(1), 115–127. https://doi.org/10.1590/S0100-67622005000100013.

Trianoski, R., Matos, J. L. M., Iwakiri, S., & Prata, J. G. (2013). Avaliação da estabilidade dimensional de espécies de Pinus tropicais. Floresta e Ambiente, 20, 398–406. https://doi.org/10.4322/floram.2012.071.

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Anatomia da madeira de clones poliploides de eucalipto

Katherine Rodrigues Breder[1]; Wesley Munhoz Ribeiro[2]; Gabriel Valim Cardoso[2]; Ana Carolina de Oliveira Cruz[1]; Laíse Vergara Nörnberg[3]; Osmarino Pires dos Santos[3]; Jordão Cabral Moulin[1]

[1] Universidade Federal do Espírito Santo
[2] Universidade Federal de Pelotas
[3] CMPC Celulose Riograndense

Resumo: A indução da poliploidia tem sido explorada no melhoramento genético do eucalipto a fim de modificar a organização anatômica do lenho. O presente trabalho teve como objetivo avaliar a estrutura de vasos e fibras em híbridos de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*, contrastando material diploide com poliploides. Foram coletadas amostras de discos de madeira à altura do peito (DAP) para preparo dos corpos de prova. As mensurações microscópicas ao longo do sentido medula-casca incluíram comprimento, largura, diâmetro do lume e espessura da parede das fibras, além do diâmetro e da frequência dos vasos e do cálculo de índices tecnológicos das fibras. Clones poliploides apresentaram aumento nas dimensões dos elementos anatômicos, com maior comprimento e largura de fibras, maior espessura de parede e vasos de maior diâmetro e menor frequência. Tais resultados evidenciam que a poliploidização influencia significativamente a anatomia do lenho, com potencial de influenciar as propriedades tecnológicas da madeira.

Palavras-chave: Melhoramento genético; Tecnologia da madeira; Híbridos.

Wood anatomy of polyploid Eucalyptus clones

Abstract: Polyploidy induction has been explored in eucalyptus breeding to modify the anatomical organization of wood. The present study aimed to evaluate the vessel and fiber structure of *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* hybrids by comparing diploid and polyploid material. Wood disc samples were collected at breast height (DBH) for specimen preparation. Microscopic measurements along the pith-to-bark direction included fiber length, width, lumen diameter, and cell wall thickness, as well as vessel diameter and frequency, in addition to the calculation of fiber technological indices. Polyploid clones exhibited increased dimensions of the anatomical elements, including greater fiber length and width, thicker fiber cell walls, and vessels with larger diameters and lower frequency. These results demonstrate that polyploidization significantly influences wood anatomy and has the potential to affect the technological properties of wood.

Keywords: Genetic breeding; Wood technology; Hybrids.

1. Introdução

A estrutura anatômica da madeira de angiospermas é composta predominantemente por fibras, vasos e parênquimas, responsáveis, respectivamente, pela sustentação mecânica, pelo transporte e armazenamento de nutrientes (De Jesus *et al*., 2020). As dimensões e a distribuição desses elementos celulares do lenho exercem influência direta sobre as propriedades físicas e tecnológicas da madeira. Nesse contexto, essas propriedades não dependem exclusivamente de um único elemento anatômico, como as fibras, mas resultam da interação entre a proporção de todos os componentes presentes na estrutura anatômica da madeira (Monteiro *et al*., 2026).

Ao longo da ontogenia da árvore, o câmbio vascular produz novas células que promovem o crescimento secundário e o aumento da circunferência do fuste, durante esse processo de formação da madeira, modificações celulares podem ocorrer em decorrência do envelhecimento da planta. Exemplificando o aumento do comprimento das fibras, da espessura da parede celular e do diâmetro dos vasos, acompanhado de redução na frequência vascular, comportamento associado à transição do lenho juvenil para o lenho adulto (Baldin *et al*., 2015; Evangelista *et al*., 2010). Estudos demonstram que esse padrão reflete a maturação cambial e o aumento progressivo da proporção de lenho adulto, resultando em alterações significativas na qualidade tecnológica do material (Trevisan *et al*., 2024). Além disso, fatores genéticos também exercem influência direta sobre a formação e as dimensões dos elementos celulares, constituindo uma importante ferramenta para a modificação da qualidade da madeira.

A poliploidia constitui uma importante ferramenta no melhoramento genético vegetal, sendo caracterizada pelo aumento no número de conjuntos cromossômicos completos em uma espécie. Dessa forma, organismos poliploides apresentam mais de dois genomas em um único núcleo celular, diferenciando-se dos indivíduos diploides. Em espécies arbóreas, como o eucalipto, a poliploidia tem despertado interesse devido ao potencial de promover aumento da produtividade, além de maior tolerância a estresses abióticos e bióticos (Souza *et al*., 2022; Castillo *et al*., 2020). Para o eucalipto, a poliploidia também pode representar um potencial promissor na diferenciação das propriedades físicas e anatômicas da madeira (Souza *et al*., 2021).

A poliploidia pode ser induzida por diferentes métodos que atuam sobre o processo de divisão celular. Entre eles, destaca-se o uso de substâncias antimitóticas, como a colchicina, que interfere na formação do fuso mitótico e é amplamente utilizada na indução de poliploidia em

plantas (Castillo *et al*., 2020). Esse processo tem sido aplicado no melhoramento genético com o objetivo de obtenção de indivíduos superiores.

A alteração no nível de ploidia influencia diretamente a organização estrutural do lenho, promovendo mudanças em elementos anatômicos como vasos, fibras e raios. Segundo Longui *et al*. (2021), indivíduos triploides e tetraploides podem apresentar fibras mais longas e com maior espessura de parede, além de alterações no diâmetro dos vasos, evidenciando que diferentes níveis de ploidia resultam em variações significativas nas dimensões celulares. Dessa forma, a mutação induzida artificialmente representa uma importante ferramenta no contexto do melhoramento genético, permitindo o desenvolvimento de cultivares ou clones com características superiores, voltadas para o suprimento de demandas da indústria florestal. Diante disso, o presente trabalho teve como objetivo avaliar as dimensões de vasos e fibras em híbridos de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*, contrastando materiais diploides e poliploides.

2. Material e métodos

Os clones utilizados se tratavam de híbridos de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*, sendo eles diploides e poliploides. O diploide foi utilizado como testemunha para os demais tratamentos. A poliploidia se refere aos clones tetraploides, sendo avaliados sete tratamentos, com o tratamento T1 composto por um clone diploide, utilizado como testemunha, e os tratamentos T2, T3, T4, T5, T7 e T9 constituídos por clones poliploides. O plantio do material utilizado no estudo está localizado em Eldorado do Sul, Rio Grande do Sul, em áreas da empresa CMPC Celulose Riograndense, implantados no ano de 2016 e avaliados aos 8 anos de idade e espaçamento 3,75 x 2,00m.

As amostras foram coletadas na altura do diâmetro à altura do peito (DAP), na forma de discos de madeira. A partir desses discos, foram retirados corpos de prova com dimensões de 10 x 5 x 20 mm (R x T x L), em três posições no sentido medula-casca, denominadas: posição 1 (região do cerne, próximo da medula), posição 2 (região de transição entre cerne-alburno) e posição 3 (região no alburno, próximo da casca).

Os corpos-de-prova foram inseridos em água à ebulição para o amolecimento, posteriormente realizaram-se cortes transversais de 20 µm em micrótomo de deslize (Leica SM 2000R). Os cortes foram tratados com hipoclorito de sódio (NaClO) a 3,3% (v/v), à 30 °C, corados com safranina 1% (m/m) e lavados com álcool 80%. As lâminas foram montadas com glicerina e lamínula. Em seguida, obtiveram- se 50 fotomicrografias na objetiva 5x em

microscópio óptico ZEISS, analisadas no software ZEN conforme a norma IAWA (1989). As medidas de frequência e diâmetros de vasos foram feitas em 50 repetições.

Para a análise das fibras, seguiu-se o procedimento proposto por Nicholls e Dadswell e descrito por Ramalho (1987), onde foram retirados dos corpos de prova de dimensões de 10 x 5 x 20 mm (R x T x L), pequenos fragmentos do plano radial, os quais foram inseridos em frascos contendo 25 mL de solução composta por ácido acético e peróxido de hidrogênio na proporção 1:1. Em seguida, os frascos foram mantidos em estufa a 60 °C durante 48 horas. Após esse processo, o material foi corado com safranina 1% (m/m). As fibras foram medidas usando o microscópio óptico ZEISS em conjunto com o software ZEN, nos aumentos de 5x e 40x, realizando-se 50 repetições.

Os parâmetros analisados trata-se do comprimento da fibra, largura da fibra, diâmetro do lume e espessura da parede celular (µm). A espessura da parede celular é dada pela relação entre a largura da fibra e o diâmetro do lume, dividido por 2.

A partir das dimensões das fibras, calcularam-se os índices tecnológicos relacionados à qualidade da madeira para produção de celulose e papel: Índice de Runkel (IR) (Equação 1), fração parede (FP) (Equação 2), coeficiente de flexibilidade (CF) (Equação 3) e índice de enfeltramento (IE) (Equação 4).

$$IR = \frac{\backslash(2 \text{ x } EP\backslash)}{DL} \quad \text{(Equação 1)}$$

$$FP = \frac{\backslash(2 \text{ x } EP\backslash)}{L} \text{ x } 100 \quad \text{(Equação 2)}$$

$$CF = \frac{DL}{L} \text{ x } 100 \quad \text{(Equação 3)}$$

$$IE = \frac{C}{L \text{ x } 1000} \quad \text{(Equação 4)}$$

Em que: EP = Espessura da parede celular (µm); DL = Diâmetro do lume (µm); L = Largura da fibra (µm); C= Comprimento da fibra (mm).

A análise estatística foi realizada por meio de testes não paramétricos de Kruskal-Wallis para verificar diferenças significativas entre os tipos celulares, adotando-se o nível de significância de 5% ($\alpha = 0,05$), sendo também determinado o coeficiente de variação (CV%) para quantificar a variabilidade experimental.

3. Resultados e discussão

O clone diploide apresentou valores de comprimento das fibras cerca de 19,34% menores que os clones poliploides, com média de 845,00 µm (Tabela 1), enquanto os clones poliploides apresentaram variação entre 933,46 e 1047,94 µm. Esse mesmo padrão foi observado para o parâmetro de largura das fibras, no qual o clone diploide apresentou 15,64 µm, e clones poliploides registraram valores superiores a 19,85 µm.

Para o diâmetro do lume das fibras, os poliploides também apresentaram maiores valores, variando de 13,08 a 14,10 µm em comparação ao diploide, que apresentou uma média de 10,55 µm. Consequentemente, a espessura da parede celular também foi superior, variando de 3,05 a 3,63 µm nos poliploides, em relação a 2,55 µm no diploide.

Tabela 1 – Características de vasos e fibras dos clones diploides e poliploides.

Parâmetros mensurados	**T1**	**T2**	**T3**	**T4**	**T5**	**T7**	**T9**
Vasos							
Diâmetro (µm)	118,34 b (23,74)*	123,70a (28,08)	122,90a (25,95)	141,04 a (25,29)	124,29 a (26,89)	148,75 a (20,27)	130,16 a (24,62)
Frequência (nº/mm²)	8,40 b (22,53)	7,25 a (26,66)	7,64 a (26,14)	6,46 a (23,16)	7,42 a (25,08)	7,78 a (26,91)	7,63a (23,36)
Fibras							
Comprimento da fibra (µm)	845,00 b (11,92)	933,46a (13,46)	974,97a (10,62)	1029,79a (9,95)	1022,22a (9,00)	1021,47 a (9,40)	1047,94 a (8,65)
Largura (µm)	15,64 b (17,58)	20,11a (17,54)	19,85 a (14,36)	20,38 a (14,18)	20,59 a (13,64)	19,88 a (14,23)	20,70 a (12,55)
Diâmetro do lume (µm)	10,55 b (23,32)	14,00 a (23,18)	13,38 a (19,70)	13,08 a (19,48)	14,01 a (17,25)	13,42 a (19,52)	13,90 a (16,88)
Espessura da parede (µm)	2,55 b (22,69)	3,05 a (22,48)	3,24 a (23,23)	3,63 a (22,99)	3,25a (20,04)	3,23a (25,28)	3,39a (21,68)
Fração parede (%)	32,56 a (11,58)	30,35 a (12,72)	32,60 b (12,46)	35,66 a (24,26)	31,53 a (16,68)	32,47 a (18,85)	32,81 a (11,08)
Coeficiente flexibilidade(%)	67,44 a (5,60)	69,64 a (5,50)	67,39 b (6,01)	64,18 a (13,86)	68,47a (7,68)	67,53a (9,23)	67,18 a (5,38)
Índice de enfeltramento	54,03 a (3,71)	46,42 b (8,61)	49,12 a (15,97)	50,54 a (8,24)	49,64 a (10,28)	51,39 a (5,21)	50,64 a (7,13)
Índice de Runkel	0,48 a (17,30)	0,44 a (18,60)	0,48 b (18,72)	0,55 a (38,24)	0,46 a (25,13)	0,48 a (27,85)	0,49a (17,28)

Legenda: Os dados foram submetidos à análise estatística não paramétrica de Kruskal-Wallis para verificar diferenças significativas entre os tipos celulares, adotando-se o nível de significância de 5% ($\alpha = 0,05$), onde letras iguais em mesma característica indicam que não há diferença estatística entre os tratamentos. * Valores entre parênteses correspondem ao coeficiente de variação (CV%).

De modo geral, os valores obtidos para as características das fibras neste estudo estão de acordo com os relatados por Muniz *et al*. (2023), o comprimento médio das fibras em clones tetraploides (0,87–0,91 mm) foi cerca de 16% maior em relação ao clone diploide (0,77 mm). Resultado semelhante foi observado por Souza *et al.* (2021), que verificaram um aumento de aproximadamente 21% nesse parâmetro em clones tetraploides. Da mesma forma, a largura média das fibras nos clones poliploides (20,4–20,7 µm) foi cerca de 20% superior à observada no clone testemunha (17,2 µm), indicando um padrão de aumento das dimensões celulares associado à poliploidização.

Em relação ao parâmetro de vasos, observa-se que o clone diploide apresentou menor diâmetro de vaso, com aumento de 11,37% em relação aos poliploides. Em contrapartida, a frequência de vasos foi menor nos poliploides. Esse padrão está associado ao *trade-off* dos vasos, com a relação inversa entre diâmetro e frequência dos vasos, onde vasos de maiores dimensões passam a ocupar maior área transversal do lenho, reduzindo sua frequência por unidade de área.

De modo geral, o clone diploide apresentou células de dimensões menores que os poliploides, e consequentemente lumes menores, na Figura 1 pode ser visualizada a imagem do plano transversal do diploide e poliploide.

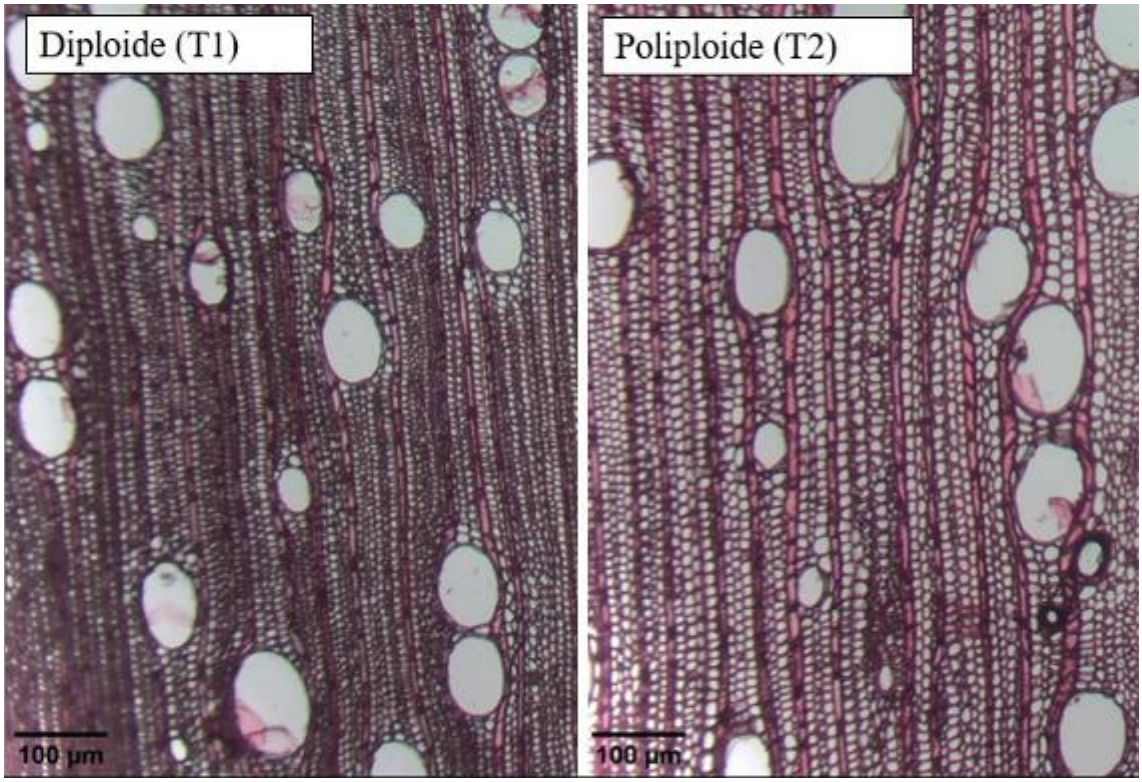


Figura 1- Variações anatômicas observadas no plano transversal para diferentes níveis de ploidia, na região do cerne. O tratamento T1 se refere a um indivíduo diploide, enquanto o tratamento T2 se refere a um indivíduo poliploide.

A fração parede apresentou valor de 32,56% no clone diploide, enquanto os materiais poliploides variaram entre 30,35% e 35,66%. Esse parâmetro possui relevância tecnológica por estar relacionado à rigidez das fibras. Segundo Muniz *et al.* (2023), valores elevados de fração parede indicam fibras menos flexíveis e com maior resistência ao colapso durante o processo de fabricação do papel, podendo reduzir a área de contato entre fibras e comprometer a formação da folha.

Os poliploides apresentaram valores de coeficiente de flexibilidade próximos aos diploides, considerados adequados para a produção de celulose e papel, segundo Foelkel (1978), valores adequados estão acima de 40%, uma vez que valores elevados indicam maior capacidade de deformação e colapso das fibras durante o cozimento e prensagem. Fibras mais flexíveis tendem a formar maior número de ligações interfibrilares, contribuindo para melhores propriedades físico-mecânicas do papel.

Em relação ao índice de enfeltramento, o diploide (T1) apresentou valor superior aos demais poliploides. Sousa Júnior *et al.* (2025) relataram que valores acima de 50 tornam os

materiais mais propensos a produzir papéis resistentes ao rasgo. Nesse sentido, todos os tratamentos avaliados apresentaram valores próximos a esse limite.

O índice de Runkel apresentou valores inferiores a 1 para todos os tratamentos, com o clone diploide apresentando valor de 0,48, enquanto os poliploides variaram de 0,44 a 0,55. Esse índice é considerado um dos principais parâmetros de avaliação da aptidão da madeira para produção de papel, pois é a relação entre a espessura da parede celular ao diâmetro do lume. Segundo Runkel (1952), materiais com índice de Runkel inferior a 0,50 são considerados bons para fabricação de papel devido à maior flexibilidade e melhor capacidade de colapso das fibras. Observa-se que praticamente todos os tratamentos se enquadraram nessa classificação, com exceção do tratamento T4, o que indica o potencial tecnológico dos materiais avaliados.

As características anatômicas das fibras apresentaram variações ao longo do sentido radial (medula-casca) da madeira, observadas na Figura 2. De modo geral, os poliploides apresentaram padrão de variação semelhante ao observado ao material diploide. Para o comprimento e espessura de parede das fibras, as características aumentaram no sentido medula-casca.

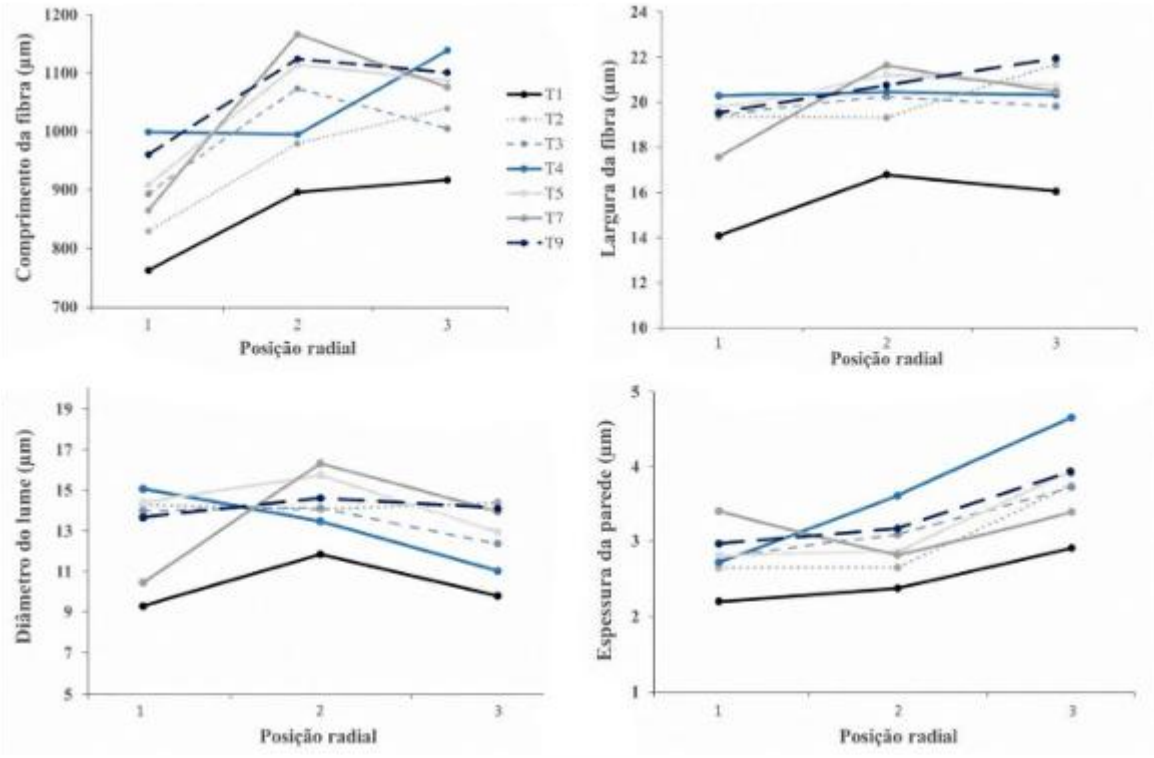


Figura 2- Variações anatômicas em áreas orientadas radialmente no sentido medula–casca (posição 1 como a região do cerne, a posição 2 correspondente a região de transição entre cerne-alburno e posição 3 como a região no alburno), para os parâmetros de comprimento da

fibra, largura da fibra, espessura da parede celular e diâmetro do lume (µm) para diferentes níveis de ploidia.

A largura das fibras apresentou aumento da posição 1 a 2, seguido de diminuição da posição 2 para 3, variando de 19,35 a 20,80µm para poliploides e 14,13 a 16,03µm para diploide. Em contraste, o diâmetro do lume observou-se menor variação ao longo do perfil radial, com aumento da posição 1 para a posição 2 e posterior redução na posição 3.

4. Conclusões

A poliploidização influenciou significativamente a anatomia da madeira dos híbridos de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*, promovendo aumento das dimensões das fibras e dos vasos em relação ao material diploide. Os clones poliploides apresentaram maiores valores de comprimento, largura, diâmetro do lume e espessura da parede das fibras, além de maior diâmetro dos vasos e menor frequência vascular, evidenciando o efeito da modificação cromossômica sobre a expansão celular e a organização do lenho.

5. Agradecimentos

Os autores agradecem à Universidade Federal do Espírito Santo (UFES), ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), à CAPES, à Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação do Espírito Santo (FAPES) e à CMPC Celulose Riograndense pelo apoio concedido para a realização deste trabalho.

6. Referências bibliográficas

Baldin, T., *et al*. (2015). Variação radial das propriedades físicas e anatômicas da madeira de *Eucalyptus benthamii* Maiden et Cambage. Enciclopédia Biosfera, 11, 1914–1922.

Castillo, A., *et al*. (2020). Polyploid induction of *Eucalyptus dunnii* Maiden to generate variability in breeding programs. Agrociencia Uruguay, 24, 381.

De Jesus, D. S., *et al*. (2020). Variação radial de propriedades anatômicas e físicas da madeira de eucalipto. Cadernos de Ciência & Tecnologia, 37(1), e26476.

Evangelista, W. V., *et al*. (2010). Propriedades físico-mecânicas da madeira de *Eucalyptus urophylla* S.T. Blake no sentido radial e longitudinal. Revista Ciência da Madeira, 1(2).

Foelkel, C. E. B. (1978). Madeira do eucalipto: Da floresta ao digestor. Boletim Informativo IPEF, 6, 72–87.

International Association of Wood Anatomists (IAWA) Committee. (1989). List of microscopic features for hardwood identification. IAWA Bulletin, 10(3), 234–332.

Longui, E. L., *et al*. (2021). Differences in wood properties among *Eucalyptus grandis* and *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* with different degrees of ploidy. Research, Society and Development, 10(16).

Monteiro, R. O., *et al*. (2026). Wood anatomy and its effects on physical properties in nineteen commercial species. Brazilian Journal of Botany, 49, 13.

Muniz, F. R., *et al*. (2023). Qualidade da madeira de clones poliploides de eucalipto. O Papel, 84(10), 58–65.

Ramalho, R. S. (1987). O uso do macerado no estudo anatômico de madeiras. Universidade Federal de Viçosa.

Runkel, R. O. H. (1952). Pulp from tropical wood. TAPPI, 35(4), 174–178.

Sousa Júnior, W. P., *et al*. (2025). Fiber quality indices of *Corymbia* spp. and *Eucalyptus* spp. wood for the selection of genetic materials for pulp production. Revista Árvore, 49, e4904.

Souza, T. S., *et al*. (2021). Polyploidy as a strategy to improve the industrial quality of eucalypt wood. Wood Science and Technology, *55*(1), 181–193.

Souza, T. S., *et al*. (2022). Potential use of polyploid eucalypt in forestry. Industrial Crops and Products, 177, 114464.

Trevisan, R., *et al*. (2024). Dimensões das fibras de *Eucalyptus grandis* em diferentes estratos e posição radial. Pesquisa Florestal Brasileira, 44.

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Anatomia da Madeira de *Jacaranda copaia* (Aubl.) D.Don (Bignoniaceae)

Rafael de Aguiar Rodrigues[1]; José Geraldo Lima de Oliveira [1]; Josy Tainara Silva Silva [1]; Victor Hugo Pereira Moutinho[2]; Bruno Monteiro Balboni[3]; José Nivaldo Garcia[3]; Jordão Cabral Moulin[1].

[1] Universidade Federal do Espírito Santo - UFES
[2] Universidade Federal do Oeste do Pará - UFOPA
[3] Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" - ESALQ - USP

Resumo: A exploração de impacto reduzido na Amazônia tem favorecido o aumento de espécies pioneiras de baixa densidade, tornando necessário ampliar o conhecimento anatômico e tecnológico dessas madeiras para agregação de valor. Este trabalho caracterizou a anatomia microscópica da madeira de *Jacaranda copaia* (Aubl.) D.Don a partir de amostras de três árvores, utilizando lâminas histológicas, material macerado e análises quantitativas via ImageJ, seguindo a lista de caracteres da IAWA. A madeira apresentou porosidade difusa, vasos predominantemente solitários com diâmetro tangencial médio de 159,31 µm e frequência de 2,00 vasos/mm², parênquima axial paratraqueal aliforme, raios multisseriados e fibras libriformes não septadas (866,99 µm de comprimento, 3,25 µm de espessura de parede). Observou-se variação morfológica entre elementos de vaso (mais longos com caudas curtas e mais curtos com caudas maiores), possivelmente relacionada à disponibilidade hídrica. O teste de Mäule indicou lignina guaiacil nas paredes dos vasos e siringil nas fibras, resultado condizente com padrões já descritos em outras angiospermas.

Palavras-chave: para-para; baixa densidade; identificação;

Wood Anatomy of *Jacaranda copaia* (Aubl.) D.Don (Bignoniaceae)

Abstract: Reduced-impact logging in the Amazon has promoted an increase in low-density pioneer species, highlighting the need to expand anatomical and technological knowledge of these woods to enhance their commercial value. This study characterized the microscopic wood anatomy of *Jacaranda copaia* (Aubl.) D.Don using samples from three trees, through histological sections, macerated material, and quantitative analyses performed with ImageJ, following the IAWA list of characters. The wood exhibited diffuse porosity, predominantly solitary vessels with a mean tangential diameter of 159.31 µm and a frequency of 2.00 vessels/mm², aliform paratracheal axial parenchyma, multiseriate rays, and non-septate libriform fibers (866.99 µm in length, 3.25 µm in wall thickness). Morphological variation was observed among vessel elements, with longer elements showing shorter tails and shorter elements showing longer tails, possibly associated with water availability. The Mäule test indicated guaiacyl lignin in vessel walls and syringyl lignin in fibers, a pattern consistent with findings previously reported for other angiosperm species.
Keywords: para-para; low density; identification.

1. Introdução

O Estado do Pará figura em primeiro lugar na lista dos estados brasileiros que mais comercializam madeira nativa em 2024. Relatórios do Timberflow/Imaflora (2026) indicam que cerca de 2,26 M de metros cúbicos de madeira nativa legal foram comercializados pelo estado do Pará entre 2023 e 2024. Esse montante representa a madeira que foi colhida em manejos com exploração de impacto reduzido (EIR), a mais sustentável forma de manejo madeireiro que atualmente consegue suprir as demandas nacionais e internacionais.

A EIR apresenta muitas vantagens para a flora nativa, sendo a principal a redução dos danos à floresta residual. Estudos desenvolvidos por Barros et al. (2024) indicam que a EIR garantiu uma perturbação mínima no dossel da floresta remanescente. No entanto, estudos como Naves et al. (2020) mostraram que mesmo com impacto extremamente reduzido, a floresta remanescente não se mantém intacta ao longo dos ciclos. Os autores demonstraram que áreas florestais manejadas com EIR que passam por ciclos de corte sucessivos concentrados em espécies de alta densidade, tem uma tendência de empobrecimento progressivo dessas espécies no estoque remanescente, com crescente dominância de espécies pioneiras de madeira leve na regeneração, de modo que plantas como *Cecropia obtusa*, *Vismia guianensis* e *Byrsonima aerugo* tiveram um grande aumento em abundância com o passar dos ciclos. O Estudo de DeArmond et al. (2022) corrobora o observado, visto que em seu trabalho, espécies madeireiras pioneiras não comerciais (usualmente de baixa a média densidade de madeira) e.g. Imbaúba *(Cecropia sciadophylla)* persistiram além do período de um ciclo de corte e continuaram competindo no próximo ciclo.

Considerando a diminuição do estoque de espécies madeireiras de alta densidade e o aumento das espécies com madeiras de média/baixa densidade, fazem-se necessários estudos acerca de possíveis utilizações para tais madeiras a fim de melhorar seu valor agregado e aumentar assim sua inserção no mercado madeireiro.

Pensando nisso, o para-para (*Jacaranda copaia* (Aubl.) D. Don), madeira leve, pouco resistente, utilizada em maior parte para caixotaria e produção de poucos móveis, apresenta-se como uma possível espécie para inserção no mercado tendo em vista que esta árvore tem rápido crescimento e sobrevivência e possui baixa densidade (Falesi et al., 2020).

Um ponto de partida importante para entender a utilização de uma madeira é entender sua anatomia, visto que a configuração anatômica do xilema secundário é excelente para a predição de suas propriedades tecnológicas. Considerando o exposto, o objetivo do presente trabalho é analisar a anatomia microscópica da madeira do Para-para (*J. copaia*), a fim de servir como base para futuros trabalhos referentes às propriedades e utilização desta madeira.

2. Material e métodos

O experimento de pesquisa foi realizado com madeira da espécie conhecida popularmente como para-para. Um lote de aproximadamente 0,3m³ de madeira da espécie em questão foi doado pela empresa Algimi Florestal Indústria De Pisos De Madeiras – LTDA. Segundo a empresa, o lote consiste em três árvores que foram derrubadas, desdobradas e posteriormente o material proveniente das árvores foi agrupado formando o lote em questão.

A madeira foi recebida em formato de sarrafos de aproximadamente 25mm x 50mm x 1600mm e 50mm x 50mm x 1600mm. Foram escolhidos aleatoriamente 3 sarrafos, dos quais pequenos corpos-de-prova com dimensões 2x2x2 cm foram retirados para os métodos de anatomia da madeira.

Os corpos-de-prova foram submetidos a cozimento em água buscando diminuir a resistência ao corte para produção de lâminas histológicas. Os cortes histológicos foram obtidos em micrótomo de deslize, como descrito por Kraus e Arduin (1997) em três orientações diferentes: transversal, tangencial e radial; todos os cortes passaram por série alcoólica e foram corados com safranina 1% (m/m) para confecção das lâminas histológicas temporárias.

A técnica de Franklin (1945) foi utilizada para produção de material macerado. A técnica consiste em imergir pequenas lascas de madeiras em ácido acético e peróxido de hidrogênio (2:1) em estufa a 60º por 48 horas para que as células sejam separadas. Ao fim do procedimento, a safranina foi inserida para coloração das células, posteriormente as fibras e comprimento dos vasos foram mensurados no microscópio óptico Zeiss e microscópio confocal Olympus respectivamente.

Cortes histológicos foram separados para realização do teste histoquímico de Mäule, metodologia para identificar lignina siringil e lignina guaiacil em cortes de madeira. A técnica consiste em imersão dos cortes em solução de permanganato de potássio ($KMnO_4$) a 1% (p/v) por cerca de 5 minutos, à temperatura ambiente, seguida de lavagem com HCl a 3% até a coloração passar de preto/marrom escuro para marrom claro. Os cortes então são submetidos à microscopia de fluorescência que revela a cor final : coloração marrom-amarelada para lignina guaiacil e vermelho-púrpura para lignina siringil (Nakano e Meshitsuka, 1992) .

A lista de caracteres da IAWA foi usada como base para descrever e avaliar as características anatômicas dos indivíduos amostrados. Para todas as variáveis anatômicas foram feitas 25 medições. Ressalta-se, entretanto, que a identificação sem material botânico reprodutivo normalmente alcança apenas o nível de gênero.

Para análise estatística dos dados foi realizada estatística descritiva informando média, desvio padrão e coeficiente de variação. Variáveis anatômicas foram mensuradas com auxílio do software Image J versão 1.54g (Schneider, Rasband e Eliceiri, 2012) e análises estatísticas foram realizadas no software R através da extensão R Studio versão 2023.06.0 (Posit Team, 2023)

3. Resultados e discussão

A madeira de para-para apresenta coloração esbranquiçada, ausência de gosto e odor, textura fina e grã reta, camadas de crescimento ausentes a olho nu ou com lente 10x. A Figura 1 apresenta fotos dos cortes histológicos nos planos transversal, tangencial e radial.

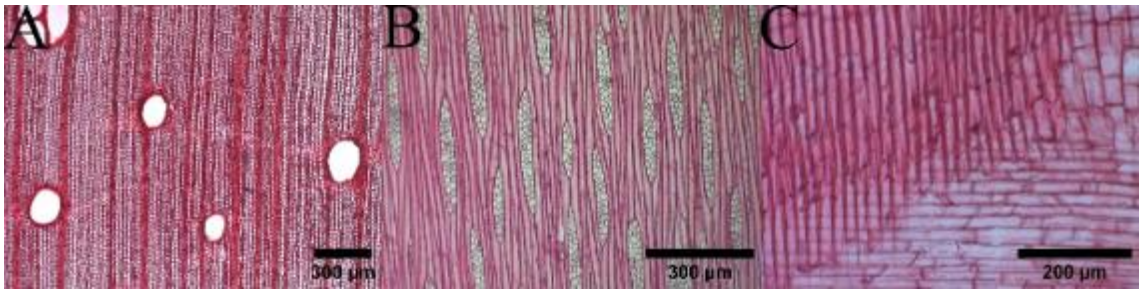


Figura 23 - (A) corte em plano transversal com aumento de 5×; (B) corte em plano tangencial com aumento de 10×; (C) corte em plano radial com aumento de 20×.

A partir da análise qualitativa e quantitativa dos caracteres microscópicos da madeira analisada foi possível identificar os seguintes traços anatômicos: anéis de crescimento indistintos tanto a olho nu quanto em microscopia, vasos com porosidade difusa, sem arranjo, solitários com ocorrência de múltiplos de até 6 vasos, placa de perfuração simples, pontoações intervasculares alternadas e minutas, vasos com diâmetro tangencial médio entre 100 e 200 µm, pouco frequentes (< 5 vasos por mm²), comprimento médio de vasos entre 350 e 800 µm; fibras com pontoação simples, não septadas, com parede celular muito delgada (≤ 900 µm); parênquima axial paratraqueal aliforme de extensão linear (Fig. 1 A) e parênquima em faixas marginal; raios multisseriados, menores que 1mm, sem estratificação (Fig. 1 B), com frequência de 4 a 12 raios por mm².

Pace et al. (2015) em seu trabalho envolvendo características anatômicas de espécies da família Bignoniaceae verificaram para a tribo Jacarandeae as seguintes características para sua identificação: combinação de parênquima aliforme de extensão linear com confluências variando de curtas a longas, ausência de estruturas estratificadas e fibras não septadas. Outras características como camadas de crescimento demarcadas por fibras com parede espessa

achatadas radialmente associadas a vasos estreitos não foram observadas em nosso material. De modo geral, o conjunto de caracteres diagnósticos da tribo coincide com o observado neste trabalho, com exceção das camadas de crescimento demarcadas.

Os resultados obtidos pelas mensurações dos caracteres anatômicos estão explanados na Tabela 1:

Tabela 16 - Dados quantitativos dos caracteres anatômicos da estrutura lenhosa do para-para

Característica	Valor Mínimo	Média	Valor Máximo	Desvio Padrão
Diâmetro Tangencial de vasos (µm)	92,14	159,31	227,95	29,68
Frequência de vasos (vasos/mm²)	1,00	2,00	6,00	1,03
Comprimento de vasos (µm)	333,58	527,65	753,08	103,66
Comprimento de fibras (µm)	574,30	866,99	1140,04	145,58
Espessura de parede de fibras (µm)	1,79	3,25	5,41	0,75
Largura de fibras (µm)	17,17	25,18	35,24	4,36
Diâmetro de lumen de fibras (µm)	10,46	18,68	31,59	4,14
Altura de raios (µm)	167,85	290,16	479,09	66,24
Largura dos raios (µm)	23,44	36,68	60,76	7,85
Frequência de raios (raios/mm)	2,00	4,88	8,00	1,17

Dos Santos e Miller (1997) analisando espécies do gênero Jacaranda, encontraram para *J. copaia* vasos com diâmetro de 159-261 µm, comprimento de 424-703 µm e frequência de 3-7 vasos por mm². Com exceção do valor de frequência, as demais características do material do presente trabalho se apresentaram similares à literatura em questão.

Quanto às informações qualitativas, a descrição anatômica da madeira do presente estudo coincide com as características descritas para *J. copaia* presentes no banco de dados Insidewood, a citar ausência de camadas de crescimento, vasos sem arranjo e com porosidade difusa e parênquima axial do tipo paratraqueal aliforme de extensão linear e em faixas marginal.

Observando os elementos de vaso da madeira *J. copaia* deste trabalho, percebem-se diferenças anatômicas contrastantes que são apresentadas na figura 2: vasos com maior comprimento e caudas (apêndices) pequenas (ou até mesmo ausentes) (figura 2 A), e vasos com menor comprimento e cauda maior (figura 2 B).

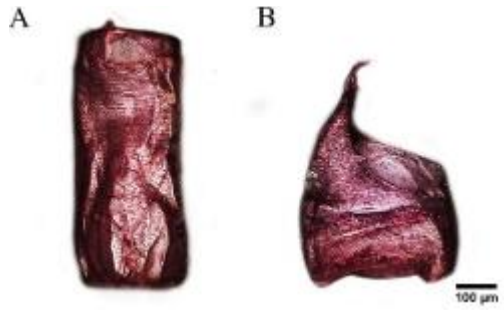


Figura 24: Elementos de vaso observados em microscopia confocal (a) sem apêndices e (b) com apêndices. Imagens obtidas por meio de microscopia confocal.

Variações no padrão anatômico dos elementos celulares são um fenômeno comum e estão ligadas à variação das condições ambientais nas quais os organismos estão inseridos. Feng et al. (2025), estudando indivíduos de videira plantados em condições de disponibilidade hídrica diferentes, encontraram variações similares: vasos mais longos e estreitos observados para baixa disponibilidade hídrica enquanto vasos curtos e de maior diâmetro estiveram presentes em condições de boa disponibilidade hídrica. O princípio de que a disponibilidade hídrica afeta a morfologia dos vasos aplica-se também na variação lenho inicial/ lenho tardio. Venegas-González et al. (2015) estudando a variação no lenho de *Tectona grandis*, observaram que as características apresentadas por vaso do lenho inicial (maior diâmetro e menor frequência) estão relacionadas à maior precipitação, além de temperaturas mais altas de verão.

Esse padrão permite inferir que a variação no comprimento e diâmetro dos vasos, além da presença (ou ausência) de caudas e o comprimento das mesmas possivelmente podem representar adaptações à disponibilidade hídrica. Feng et al. (2025) defendem que maiores áreas de contato entre vasos podem significar um aumento na resistência hidráulica, e consequentemente, aumento na segurança da condução de água. Os autores utilizam como exemplo a maior inclinação das paredes terminais de vasos e presença de mais de uma placa de perfuração por vaso em indivíduos de videira crescidos com limitação hídrica. As caudas além de representarem uma área de contato entre elementos de vaso de um mesmo vaso também podem possuir pontoações, estrutura que ajudam na condução hidráulica entre vasos adjacentes mas ao mesmo tempo garantem segurança na condução (Choat, Cobb e Jansen, 2007), o que reforça a ideia de presença de cauda como estratégia de segurança hidráulica.

Mais do que uma variação nas dimensões dos vasos, verificou-se também uma diferença no tipo de lignina da parede celular (PC) destas células em relação às outras. A partir do teste histoquímico de Mäule apresentado na Figura 3, observou-se coloração amarelada da PC dos vasos, enquanto nas fibras a coloração predominante foi avermelhada.

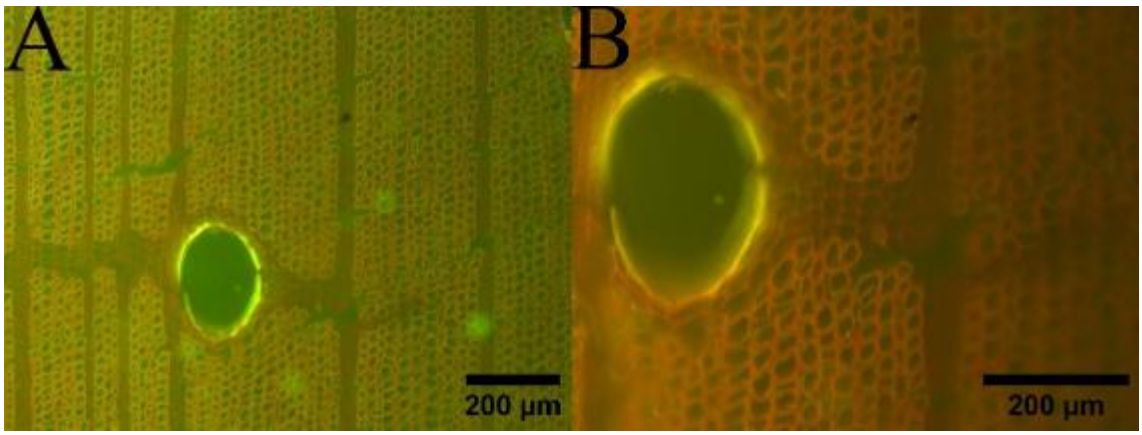


Figura 3: (A) corte transversal com aumento de 10x; (B) corte transversal com aumento de 20x.

Mäule é um método de coloração que identifica unidades de lignina a partir do número de grupos metoxila presentes em seus anéis aromáticos. Sua reação gera cromóforos a partir dos grupos metoxila, que em unidades siringil emitem coloração vermelha enquanto unidades guaiacil não são capazes de emitir a mesma coloração, adotando uma tonalidade amarela ou amarelado-esverdeada (Yamashita et al., 2016). De maneira semelhante ao observado por Wolter et al. (1974), que encontraram lignina do tipo guaiacil em vasos maduros de *Populus*, nosso experimento apresentou o mesmo padrão. Paredes celulares de vasos alteraram sua cor para amarelo em função da ausência de lignina siringil, indicando presença apenas de lignina guaiacil, enquanto fibras retornaram uma coloração vermelha pela presença de lignina siringil.

4. Conclusões

A caracterização anatômica da madeira de *J. copaia* confirmou os principais caracteres diagnósticos descritos para a espécie, incluindo porosidade difusa, vasos de grande diâmetro e baixa frequência, parênquima axial paratraqueal aliforme de extensão linear, raios multisseriados e fibras libriformes não septadas. As paredes dos vasos apresentaram lignina do tipo guaiacil e as fibras lignina siringil. Os vasos variaram anatomicamente, alguns apresentando menor comprimento e caudas maiores, enquanto outros apresentaram maior comprimento e caudas menores. Indicam-se análises anatômicas dentro de um único anel de crescimento a fim de identificar se tais variações poderiam ser provenientes da oscilação lenho inicial/lenho tardio.

5. Agradecimentos

Agradeço à empresa Algimi Florestal Indústria De Pisos De Madeiras – LTDA, pela doação da madeira utilizada neste trabalho; à UFES, ESALQ e UFOPA pela disponibilização

da infraestrutura e apoio técnico; e às agências de fomento CAPES e FAPES, respectivamente as agências que fomentaram o meu projeto de mestrado e atualmente meu Doutorado.

6. Referências bibliográficas

Barbosa, A.P. et al. (2003). O Crescimento de duas espécies florestais pioneiras, pau-de-balsa (Ochroma lagopus Sw.) e caroba (Jacaranda copaia D. Don), usadas para recuperação de áreas degradadas pela agricultura na Amazônia Central, Brasil. Acta Amazonica, v. 33, p. 447-482. https://doi.org/10.1590/S0044-59672003000300012

Barros, Q.S. et al. (2024). Indicators for monitoring reduced impact logging in the Brazilian amazon derived from airborne laser scanning technology. Ecological Informatics, v. 82, p. 102654. https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2024.102654

Choat, B.; Cobb, A.R.; Jansen, S. (2007). Structure and function of bordered pits: new discoveries and impacts on whole-plant hydraulic function. New phytologist, v. 177, n. 3, p. 608-626. https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2007.02317.x

Da Silva Ribeiro, R.F. et al. (2021). Experimental investigation on variability in properties of Amazonian wood species Muiracatiara (Astronium lecointei) and Maçaranduba (Manilkara huberi) focusing guitar fingerboards manufacturing. Journal of Bioresources and Bioproducts, v. 6, n. 1, p. 33-38. https://doi.org/10.1016/j.jobab.2021.02.006

Dearmond, D. et al. (2022). Logging intensity affects growth and lifespan trajectories for pioneer species in Central Amazonia. Forest ecology and Management, v. 522, p. 120450. https://doi.org/10.1016/j.foreco.2022.120450

Dos Santos, G.; Miller, R. B. (1997). Wood anatomy of Jacaranda (Bignoniaceae): systematic relationships in sections Monolobos and Dilobos as suggested by twig and stem wood rays. IAWA journal, v. 18, n. 4, p. 369-383.

Falesi, I. C.; Bittencourt, I.C.F.P. De M.; Brasil, E. C. (2020) Parapará (Jacaranda copaia Aublet D. Don). Embrapa Amazônia Oriental-Capítulo em livro técnico (INFOTECA-E).

Feng, W. Et Al. (2025) Structural and hydraulic changes in grape shoot xylem under different root zone volumes. OENO One, v. 59, n. 3. https://doi.org/10.20870/oeno-one.2025.59.3.8413

Franklin, G. L. (1945). Preparation of thin sections of synthetic resins and wood-resin composites, and a new macerating method for wood. Nature, v. 155, n. 3924, p. 51-51.

IMAFLORA (2026). Timberflow: Monitoramento da exploração e do comércio de madeira na Amazônia Legal. https://www.imaflora.org/.

Kollmann, F.F. P.; Kuenzi, E.W.; Stamm, A. J.(1975) Principles of wood science and technology: II Wood Based Materials. Springer.

Kraus, J.E.; Arduin, M. (1997). Manual básico de métodos em morfologia vegetal.

Naves, R.P. Et Al. (2020). Tropical forest management altered abundances of individual tree species but not diversity. Forest Ecology and Management, v. 475, p. 118399. https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118399

Pace, M. R. et al. (2015). Wood anatomy of major Bignoniaceae clades. Plant Systematics and Evolution, v. 301, n. 3, p. 967-995. DOI 10.1007/s00606-014-1129-2

POSIT TEAM. RStudio: Integrated Development Environment for R. Boston, MA: Posit Software, PBC, 2023. Disponível em: https://posit.co/. Acesso em: 16 jul. 2026.

Schneider, C. A., Rasband, W. S., & Eliceiri, K. W. (2012). NIH Image to ImageJ: 25 years of image analysis. Nature Methods, 9(7), 671-675.

Venegas-González, A. et al. (2015). Plasticity in xylem anatomical traits of two tropical species in response to intra-seasonal climate variability. Trees, v. 29, n. 2, p. 423-435. https://doi.org/10.1007/s00468-014-1121-z

Wolter, K. E.; Harkin, J.M.; Kirk, T. K. (1974). Guaiacyl lignin associated with vessels in aspen callus cultures. Physiologia Plantarum, v. 31, n. 2, p. 140-143.

Yamashita, D. Et Al. (2016) Improved Mäule color reaction provides more detailed information on syringyl lignin distribution in hardwood. Journal of Wood Science, v. 62, n. 2, p. 131-137. https://doi.org/10.1007/s10086-016-1536-9

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Anatomia macroscópica e densidade básica da madeira de *Avicennia germinans* (L.) L. em floresta anã

Beatriz Almeida Lima[1]; Madson Lucas Galvão de Brito[2]; Antonia Wiviane de Oliveira Mendes[1]; João Rodrigo Coimbra Nobre[1]; Alessandra Jackeline Guedes de Moraes[1]; Iedo Souza Santos[1]

[1] Universidade do Estado do Pará (UEPA), Castanhal/PA, Brasil
[2] Universidade Federal do Pará (UFPA), Bragança/PA, Brasil

Resumo: Os manguezais amazônicos apresentam florestas anãs formadas por indivíduos de pequeno porte sob condições restritivas, como elevada salinidade, deficiência nutricional e sulfetos no solo. *A. germinans* destaca-se pela plasticidade fenotípica e ocorrência em ambientes hipersalinos. Este estudo caracterizou a anatomia macroscópica e a densidade básica da madeira de *A. germinans* em uma floresta anã do litoral amazônico brasileiro. Foram analisados discos em três posições axiais do fuste (0, 50 e 100%) de indivíduos distribuídos em três estratos de altura (5 indivíduos/estrato). A anatomia foi semelhante entre os estratos, com porosidade difusa, vasos em múltiplos radiais e floema incluso concêntrico. A densidade básica diferiu entre estratos, mas não entre posições axiais, com média de 0,564 g/cm³ e maior valor no estrato 3 (0,642 g/cm³). Os resultados indicam maior densidade em indivíduos de maior porte. A caracterização da madeira amplia o conhecimento sobre respostas anatômicas e físicas da espécie em ambientes extremos e contribui para estudos tecnológicos futuros.

Palavras-chave: Manguezal; Ambientes hipersalinos; Plasticidade fenotípica.

Macroscopic anatomy and basic wood density of *Avicennia germinans* (L.) L. wood in dwarf forest

Abstract: Amazonian mangroves contain dwarf forests of small individuals under restrictive conditions, including high salinity, nutritional deficiency, and soil sulfides. *Avicennia germinans* shows phenotypic plasticity in hypersaline environments. This study characterized the macroscopic anatomy and basic wood density of *A. germinans* in a dwarf forest on the Brazilian Amazon coast. Discs from three stem positions were analyzed in individuals from three height strata. Anatomy was similar among strata, with diffuse porosity, radial vessel multiples, and concentric included phloem. Basic density differed among strata, but not axial positions, averaging 0.564 g/cm³ and reaching 0.642 g/cm³ in stratum 3. Higher density occurred in larger individuals, expanding knowledge of *A. germinans* responses under extreme conditions.

Keywords: Mangrove; Hypersaline environments; Phenotypic plasticity.

1. Introdução

As espécies vegetais que compõem o manguezal apresentam adaptações morfofisiológicas, que incluem sistemas radiculares mais desenvolvidos, estruturas para troca gasosa e mecanismos de exclusão ou excreção de sal (Parida & Jha, 2010). Assim, áreas mais

expostas à salinização tendem a apresentar indivíduos com menor diâmetro e altura, enquanto zonas com maior influência fluvial sustentam vegetação mais desenvolvida (Santos et al., 2021).

Nos manguezais amazônicos, *A. germinans* apresenta a capacidade de formar bosques anões em locais de estresse extremo, ocupando os sítios de maior salinidade associados a condições topográficas específicas e formando um gradiente estrutural que vai de indivíduos arbustivos a árvores baixas, padrão também descrito para manguezais arbustivos (*scrub*) na mesma região (Virgulino-Júnior et al., 2020). Os estudos anatômicos evidenciam que condições edáficas adversas influenciam a ocorrência de modificações estruturais no xilema de espécies do gênero *Avicennia*. Em *Avicennia marina*, as árvores de pequeno porte localizadas em zonas de entremarés, submetidas a intenso estresse ambiental, apresentaram menor densidade da madeira e maior proporção de tecido floemático incluso no lenho quando comparadas às árvores de maior porte situadas na franja marítima (Santini et al., 2012). De forma semelhante, em *A. germinans*, foram observadas modificações anatômicas, como a redução do diâmetro dos vasos e o aumento da espessura das paredes celulares, consideradas respostas adaptativas aos ambientes hipersalinos, que interferem diretamente na condutividade hidráulica e no comportamento mecânico da madeira (Madrid et al., 2014).

Estudos realizados com *A. germinans* na costa amazônica brasileira, demonstraram que a espécie apresenta densidade média e comportamento dimensional classificado como normal. Contudo, os autores ressaltam a necessidade de estudos complementares que considerem diferentes condições estruturais dos bosques, visando ampliar o conhecimento acerca da variabilidade tecnológica da madeira (Galvão et al., 2024).

Embora estudos recentes tenham ampliado o conhecimento sobre as propriedades tecnológicas de *A. germinans* na costa amazônica, ainda são limitadas as informações referentes a indivíduos provenientes de florestas anãs, principalmente quanto à influência das condições extremas de estresse ambiental sobre as propriedades da madeira.

Nesse contexto, a caracterização anatômica macroscópica e da densidade básica da madeira contribui para compreender a plasticidade estrutural da espécie e ampliar o conhecimento sobre seu potencial tecnológico em ambientes de elevada salinidade. Assim, o presente estudo teve como objetivo caracterizar a anatomia macroscópica e a densidade básica da madeira de *A. germinans* proveniente de uma floresta anã do litoral amazônico brasileiro.

2. Material e métodos

2.1 Área de Estudo

Neste trabalho foram utilizadas amostras de madeira de *A. germinans* provenientes de uma floresta anã localizada no litoral amazônico, no município de Bragança, estado do Pará. Nessa região, a heterogeneidade ambiental dos manguezais, associada às variações de inundação, salinidade e características do substrato, influencia o desenvolvimento e a estrutura da vegetação (Feller et al., 2010; Krauss et al., 2014). Essas condições podem restringir o crescimento dos indivíduos, favorecendo a ocorrência de vegetação de menor porte e a formação de florestas anãs.

As amostras foram organizadas em três estratos de altura, conforme apresentado na Figura 1. Cada um dos três estratos foi composto por cinco indivíduos (unidades amostrais), totalizando 15 indivíduos amostrados, dos quais foram extraídos discos nas três posições axiais do fuste (0%, 50% e 100%, sendo esta última definida até a primeira bifurcação do caule). Para a determinação da densidade básica, cada amostra foi analisada em triplicata.

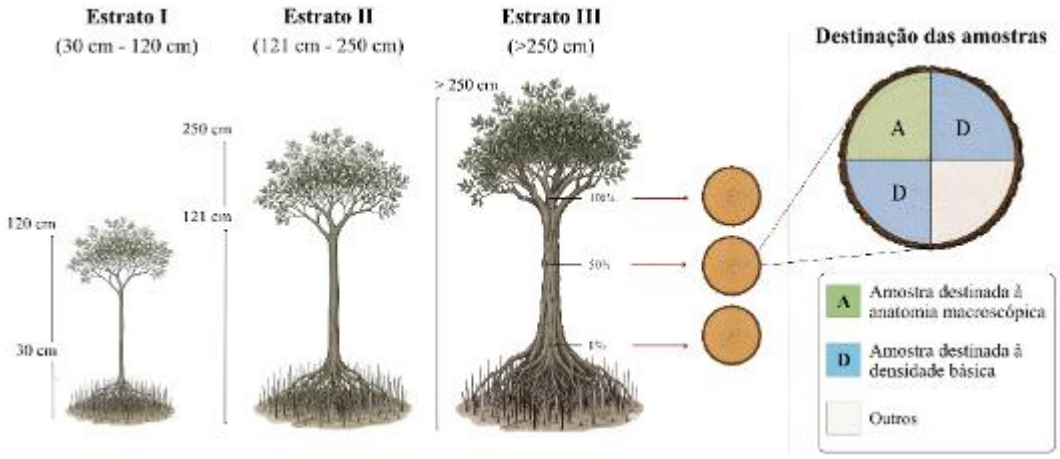


Figura 1 – Esquema de amostragem de *A. germinans*, indicando os estratos de altura, as posições de coleta dos discos ao longo do fuste e a destinação das amostras.

2.2 Análises Realizadas

A análise anatômica macroscópica foi realizada na xiloteca Joaquim Ivanir Gomes (JIGw), no Campus VIII, seguindo os procedimentos de caracterização anatômica descritos por Coradin e Muñiz (1991) e os critérios da IAWA Committee (White et al., 1991), com identificação confirmada por comparação com a base de dados InsideWood (2004). A densidade básica da madeira foi determinada no Laboratório Multiusuário de Biomateriais, no Campus XX, conforme apresentado na Figura 2, ambos os campi pertencentes à Universidade do Estado do Pará (UEPA).

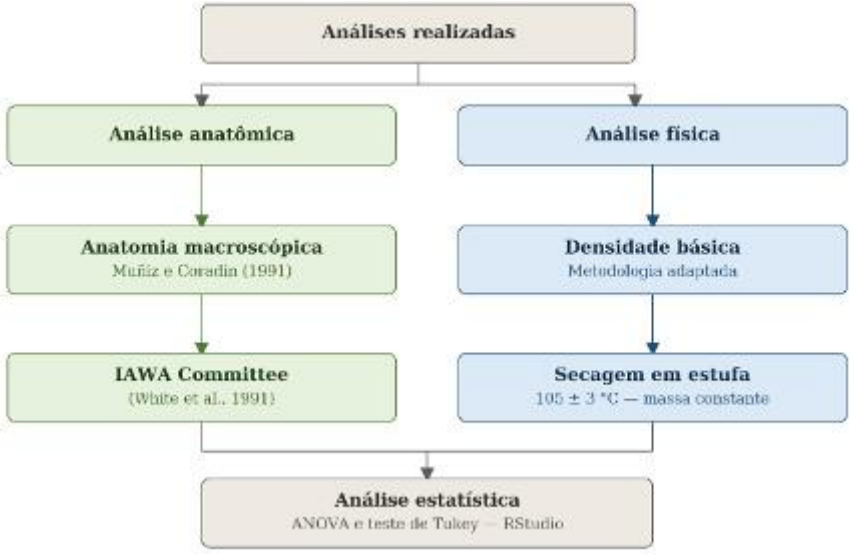


Figura 2 – As análises realizadas na madeira de *A. germinans*.

A caracterização física foi realizada por meio da determinação da densidade básica, conforme a ABNT NBR 11941:2003, com metodologia adaptada. Em razão das reduzidas dimensões dos indivíduos que compõem os bosques anões, não foi possível obter corpos de prova nas dimensões usualmente adotadas em estudos de densidade básica da madeira (aproximadamente 5 × 3 × 2 cm), sendo o valor calculado por meio da Equação 1.

$$DB = \frac{M}{V} \quad (1)$$

Sendo:

DB : Densidade básica (g/cm³);

M : Massa seca (g);

V : Volume saturado (cm³).

3. Resultados e discussão

3.1 Propriedade Anatômica

A caracterização macroscópica da madeira de *A. germinans* foi realizada em três estratos florestais no estrato 1 (classe I), estrato 2 (classe II) e estrato 3 (classe III) conforme apresentado na Figura 3.

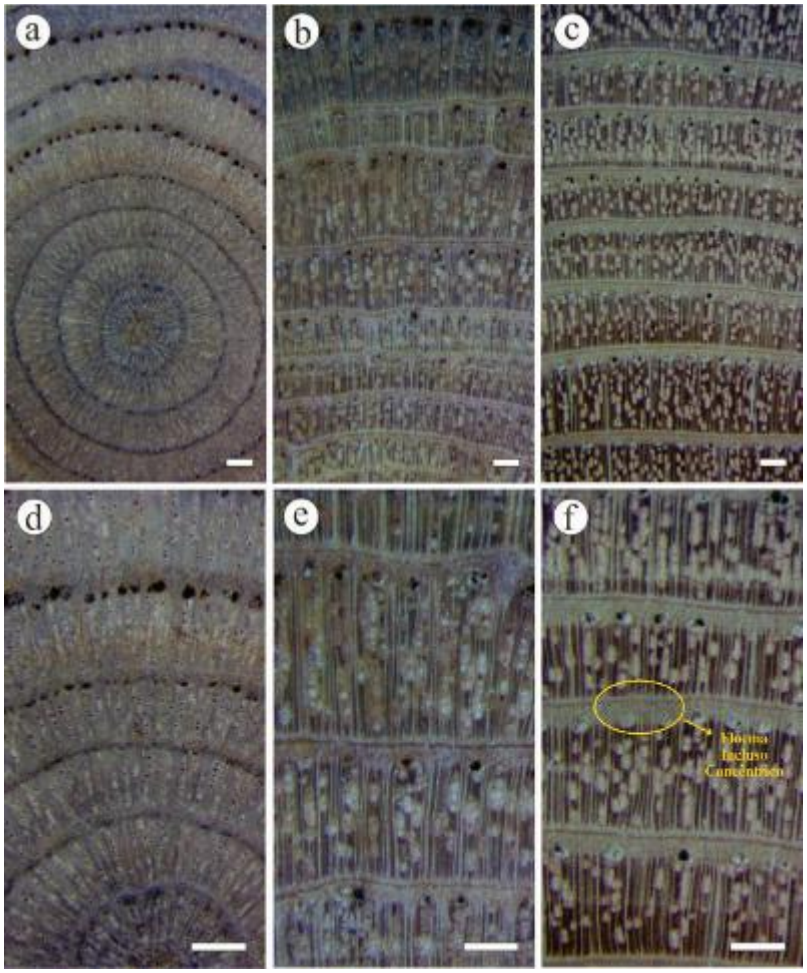


Figura 3 – Caracterização macroanatômica dos três estratos de *A. germinans*. Legenda: (a) e (d) estrato 1; (b) e (e) estrato 2; (c) e (f) estrato 3. Objetivas de 10x (a, b, c) e 20x (d, e, f). (barra = 1 mm). Em (f), seta indica floema incluso concêntrico.

A. germinans apresentou limites dos anéis de crescimento indistintos ou ausentes em corte transversal. Os poros são considerados difusos, com vasos dispostos em padrão diagonal e/ou radial, em múltiplos radiais de quatro ou mais, também possuem agrupamento de vasos. O parênquima axial é vasicêntrico e escasso paratraqueal, ocorrendo também em faixas de até três células de largura. Os raios são visíveis sob lente de 10 vezes, com largura de 1 a 3 células e frequência de 4 a mais de 12 por milímetro (Figura 3 a, b, c). Uma característica relevante dessa espécie é a presença de floema incluso concêntrico, disposto em faixas tangenciais que, em corte transversal, podem ser confundidas com limites de anéis de crescimento devido ao aspecto mais alargado e à textura fibrosa mais esponjosa dessas faixas. Essas faixas correspondem, no entanto, ao tecido floemático incluso, e não a lenho tardio ou juvenil. (Figura 3 d, e, f).

Os resultados confirmam que as descrições anatômicas da macroscopia da espécie estão de acordo com a base de dados de InsideWood (2004). A porosidade difusa e o arranjo radial dos vasos em múltiplos radiais são características adaptativas típicas da espécie, para auxiliar na condução hídrica em ambientes com variação de salinidade (Madrid et al., 2014). A presença de floema incluso concêntrico, resultante da atividade dos câmbios sucessivos, é uma estrutura característica do gênero *Avicennia* e de outras espécies do mangue, como as florestas anãs do manguezal estudado (Mondal et al., 2026).

3.2 Propriedade física

A densidade básica da madeira para a espécie estudada foi avaliada entre três estratos, dos quais os resultados estão apresentados na Figura 4.

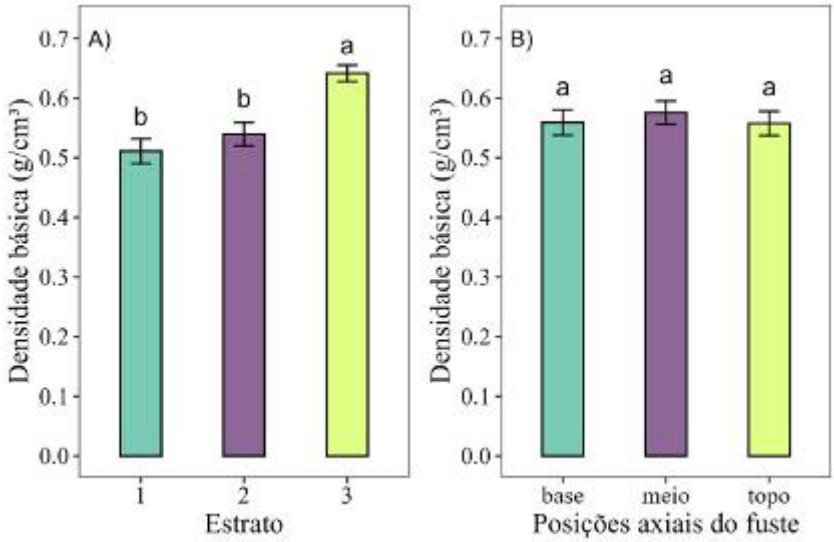


Figura 4 – Valores médios de densidade básica da madeira de *A. germinans* entre estratos (A) e entre posições axiais do fuste: base, meio e topo (B) em bosques anões. Letras iguais indicam ausência de diferença significativa pelo teste de Tukey ($p > 0,05$).

A densidade básica de *A. germinans* variou significativamente entre os estratos, mas não variou entre as posições axiais do fuste. Isso mostra que essa propriedade se manteve relativamente uniforme ao longo do tronco. Resultado semelhante foi encontrado por Virgulino-Júnior et al. (2020) para *Rhizophora mangle* na Península de Ajuruteua, espécie na qual os autores analisaram especificamente a variação axial, já que, para *A. germinans*, eles avaliaram apenas a variação entre zonas de salinidade. Ainda que sejam espécies diferentes, esse resultado semelhante indica que a densidade da madeira pode não variar muito ao longo do fuste em

espécies de mangue, embora sejam necessários mais estudos que avaliem esse eixo explicitamente em *A. germinans*.

Em relação à densidade média geral, Virgulino-Júnior et al. (2020) encontraram valor de 0,64 g/cm³ para a espécie, variando entre 0,54 e 0,85 g/cm³, além de observarem aumento da densidade com o incremento das classes de diâmetro. Esse valor, no entanto, reúne indivíduos das três zonas de salinidade estudadas pelos autores, sendo que os maiores valores de densidade foram registrados justamente na zona de maior salinidade, onde está localizada a floresta anã. Como o presente estudo trata apenas de indivíduos de floresta anã, a média geral obtida foi 0,564 g/cm³, valor inferior ao informado pelos autores. Ainda assim, o estrato 3 apresentou densidade média de 0,642 g/cm³, próxima ao valor de referência para a espécie, enquanto os estratos 1 e 2 resultaram nos menores valores. Esse padrão indica que indivíduos com maior desenvolvimento estrutural podem apresentar madeira com maior densidade básica.

A diferença entre as médias gerais dos dois estudos mostra que a densidade básica da madeira pode variar mesmo entre indivíduos da mesma espécie e de uma mesma região, o que pode estar relacionado às diferenças nos critérios de seleção e classificação estrutural adotados em cada estudo. Semelhantemente, essa variação foi parecida com as análises de Chowdhury et al. (2025) em manguezais dos Sundarbans, em Bangladesh, onde a densidade foi significativamente maior na zona de alta salinidade para a maioria das espécies estudadas, associando o estresse salino a um maior investimento na densidade da madeira.

Em *Avicennia marina*, Santini et al. (2012) mostraram que diferenças anatômicas do lenho também podem influenciar a densidade da madeira, o que reforça que essa propriedade é determinada por múltiplos fatores relacionados ao crescimento e à formação do lenho, e não apenas pelas condições de salinidade.

4. Conclusões

A anatomia macroscópica da madeira de *A. germinans* apresentou características semelhantes entre os três estratos avaliados, correspondendo aos elementos estruturais descritos para a espécie, indicando a manutenção dessas características mesmo sob condições de elevado estresse ambiental. A densidade básica foi maior no estrato composto por indivíduos de maior porte e inferior à média registrada para a espécie em bosques normais da costa amazônica, evidenciando a influência das condições ambientais e do desenvolvimento estrutural dos indivíduos sobre essa propriedade.

Os resultados obtidos contribuem para ampliar o conhecimento sobre a anatomia macroscópica e a densidade básica da madeira de *A. germinans* em florestas anãs do litoral amazônico brasileiro. Apesar dos avanços alcançados por estudos anteriores, novas pesquisas ainda são necessárias para ampliar a compreensão da influência das condições ambientais sobre as propriedades da madeira da espécie e contribuir para o conhecimento sobre esse ecossistema.

5. Agradecimentos

Agradecemos à Universidade do Estado do Pará (UEPA), especialmente ao Campus de Castanhal e ao Laboratório Multiusuário de Biomateriais (LMB), pelo apoio à realização desta pesquisa. Agradecemos também ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pelo apoio financeiro por meio da bolsa PIBITI.

6. Referências bibliográficas

Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2003). NBR 11941: Madeira - Determinação da densidade básica em madeira. ABNT.

Chowdhury, Md. Q., Sarker, S. K., Ali, Md. B., Imran, Md. I. H., Datta, A., & Leban, J.-M. (2025). Accounting intra-tree radial wood density variation estimates more accurate above ground mangrove biomass in the Sundarbans. https://doi.org/10.1007/s10342-025-01784-3

Coradin, V. T. R., & Muñiz, G. I. B. (1991). Normas de procedimentos em estudos de anatomia da madeira: I. Angiospermae; II. Gimnospermae (Série Técnica, Vol. 15). Laboratório de Produtos Florestais (LPF/IBAMA).

Feller, I. C., Lovelock, C. E., Berger, U., McKee, K. L., Joye, S. B., & Ball, M. C. (2010). Biocomplexity in mangrove ecosystems. *Annual Review of Marine Science, 2*, 395–417. https://doi.org/10.1146/annurev.marine.010908.163809

Galvão, M. L., Bessa-Silva, A., Batista, A. S., Balboni, B. M., Santos, I. S., & Fernandes, M. E. B. (2024). Effects of wood density on mechanical properties of mangrove wood from the Amazon coast. *PloS one*, *19*(11), e0313824. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0313824

InsideWood. (2004 onwards). *InsideWood database*. https://insidewood.lib.ncsu.edu

Krauss, K. W., McKee, K. L., Lovelock, C. E., Cahoon, D. R., Saintilan, N., Reef, R., & Chen, L. (2014). How mangrove forests adjust to rising sea level. *New Phytologist*, *202*(1), 19–34. https://doi.org/10.1111/nph.12605

Madrid, E. N., Armitage, A. R., & López-Portillo, J. (2014). *Avicennia germinans* (black mangrove) vessel architecture is linked to chilling and salinity tolerance in the Gulf of Mexico. *Frontiers in Plant Science, 5*, Article 503. https://doi.org/10.3389/fpls.2014.00503

Mondal, S., Santra, T., & Naskar, S. (2026). Structural and functional wood anatomical adaptations in the Mangrove genus *Avicennia* L. and their role in blue carbon storage. *Trees*, *40* (1). https://doi.org/10.1007/s00468-026-02737-y

Parida, A. K., & Jha, B. (2010). Salt tolerance mechanisms in mangroves: a review. *Springer-Verlag*. https://doi.org/10.1007/s00468-010-0417-x

Santini, N. S., Schmitz, N., & Lovelock, C. E. (2012). Variation in wood density and anatomy in a widespread mangrove species. *Trees*, *26*(5), 1555–1563. https://doi.org/10.1007/s00468-012-0729-0

Santos, N. M., Costa, D. F. S., & Cestaro, L. A. (2021). Identificação e mapeamento dos serviços ecossistêmicos de provisão no manguezal do Rio Tijupá, Ilha do Maranhão (Região Nordeste do Brasil). *Caminhos de Geografia*, *22*(79), 276–294. https://doi.org/10.14393/RCG227954259

Virgulino-Júnior, P. C. C., Gardunho, D. C. L., Silva, D. N. C., & Fernandes, M. E. B. (2020). Wood density in mangrove forests on the Brazilian Amazon coast. *Springer Berlin Heidelberg*. https://doi.org/10.1007/s00468-019-01896-5

White, D. J. B., Wheeler, E. A., Baas, P., & Gasson, P. (1991). IAWA List of Microscopic Features for Hardwood Identification by an IAWA Committee. *Kew Bulletin*, *46*(2), 376. https://doi.org/10.2307/4110625

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Aplicação da espectroscopia FT-NIR para classificação das madeiras de Angelim da Amazônia

Cristiano S. do Nascimento[1]; Claudia Eugenio da Silva[2]; Ana Julia de O. Godoy[1]; Raimunda Liege S. de Abreu[1]; Luiz Ramos de Oliveira[1]; Joaquim dos Santos[2]; Maíra Fasciotti[3]; Niro Higuchi[2]

[1] Laboratório de Anatomia da Madeira/Xiloteca, Coordenação de Tecnologia e Inovação, Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia
[2] Laboratório de Manejo Florestal, Coordenação de Dinâmica Ambiental, Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia
[3] Laboratório de Análises Orgânicas, Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia

Resumo: O estudo avaliou o potencial da espectroscopia no infravermelho próximo com transformada de Fourier (FT-NIR) como método alternativo para a classificação botânica de madeiras comercializadas sob a denominação comum "angelim" na Amazônia brasileira. Foram analisadas seis espécies da família Fabaceae pertencentes aos gêneros *Andira*, *Dinizia*, *Hymenolobium*, *Vatairea* e *Zygia*, com amostras da Xiloteca/INPA/MCTI/Brasil. Espectros NIR na faixa de 10.000–4.000 cm^{-1} foram coletados nas superfícies da madeira, e submetidos à análise discriminante linear baseada na distância de Mahalanobis, com diferentes pré-processamentos (SNV, derivadas, filtros Norris e Savitzky-Golay). Os modelos otimizados apresentaram alta acurácia (>88%), com índices de identificação >84%e erro máximo de <14% na discriminação. Mesmo em espécies filogeneticamente próximas (*Hymenolobium excelsum* vs. *H. pulcherrimum*), as assinaturas espectrais revelaram diferenças químicas sutis, porém consistentes, associadas a grupos funcionais da madeira, especialmente nas regiões de 9.320–9.200, 6.170–5.770 e 4.660–4.050 cm^{-1}. A espectroscopia FT-NIR demonstrou ser uma ferramenta rápida, não destrutiva e de baixo custo, capaz de capturar variações químicas intrínsecas de cada táxon. Seu uso é promissor como método complementar à anatomia da madeira e à taxonomia tradicional, com aplicações diretas na fiscalização, certificação florestal e sustentabilidade da cadeia produtiva da madeira na Amazônia.
Palavras-chave: Metodologia nãodestrutiva**;** Taxonomia botânica; Madeiras comerciais.

Application of FT-NIR spectroscopy for the classification of Amazonian Angelim woods

Abstract: The study evaluated the potential of Fourier transform near-infrared spectroscopy (FT-NIR) as an alternative method for the botanical classification of woods traded under the common denomination "angelim" in the Brazilian Amazon. Six species of the Fabaceae family belonging to the genera *Andira*, *Dinizia*, *Hymenolobium*, *Vatairea*, and *Zygia* were analyzed, using samples from the Xiloteca/INPA/MCTI/Brazil. NIR spectra in the range of 10,000–4,000 cm^{-1} were collected from the wood surfaces and subjected to linear discriminant analysis based on Mahalanobis distance, with different preprocessing techniques (SNV, derivatives, Norris and Savitzky-Golay filters). The optimized models achieved high accuracy (>88%), with identification rates >84% and a maximum classification error <14%. Even in phylogenetically close species (*Hymenolobium excelsum* vs. *H. pulcherrimum*), the spectral signatures revealed subtle, yet consistente, chemical differences associated with wood functional groups, especially in the regions of 9,320–9,200, 6,170–5,770, and 4,660–4,050 cm^{-1}. FT-NIR spectroscopy

proved to be a fast, non-destructive, and low-cost tool, capable of capturing the intrinsic chemical variations of each taxon. Its use is promising as a complementary method to wood anatomy and traditional taxonomy, with direct applications in inspection, forest certification, and sustainability of the wood production chain in the Amazon.
Keywords: Non-destructive methodology; Botanical taxonomy; Commercial wood.

1. Introdução

A Floresta Amazônica detém a maior diversidade de espécies arbóreas do planeta, com destaque para a família Fabaceae, de elevada relevância econômica e ecológica (Souza, 2023; Silva da Silva et al., 2025). No mercado madeireiro, nomes populares como “Angelim” agrupam erroneamente gêneros distintos (*Andira*, *Dinizia*, *Hymenolobium*, entre outros), causando problemas na cadeia produtiva, pois espécies diferentes apresentam propriedades tecnológicas variadas (densidade, resistência, durabilidade, composição química) (Ferreira et al., 2004; Wang, 2021; Nascimento et al., 2023). O uso de madeira com identidade incorreta gera heterogeneidade, desperdício, prejuízos econômicos e riscos à sustentabilidade (Fasciotti et al., 2015; Raobelina et al., 2023).

A identificação botânica clássica exige material fértil (flores, frutos, folhas) de difícil obtenção. A anatomia da madeira, embora precisa, demanda alta especialização e tempo; a falta de xilotecas e profissionais treinados limita sua aplicação em larga escala (Freitas & Vasconcellos, 2019; Florsheim et al., 2020). Técnicas avançadas (isótopos de carbono, espectrometria de raios-X, quimiotipagem) são eficazes, mas onerosas, demoradas e muitas vezes destrutivas (Nascimento et al. 2026; Monteiro et al., 2026). Isso motiva a busca por métodos rápidos, não destrutivos e de baixo custo.

A espectroscopia no infravermelho próximo (NIR) aliada à quimiometria surge como alternativa robusta, rápida, não destrutiva e de baixo custo, fornecendo uma impressão digital dos grupos funcionais (C–H, N–H, O–H) da madeira (Pasquini, 2018). Estudos recentes vêm consolidando essa ferramenta: Nisgoski et al. (2025) revisaram o estado da arte da espectroscopia NIR para identificação de espécies a partir de diferentes tecidos vegetais; Gomes et al. (2025) identificaram 11 espécies amazônicas independentemente do teor de umidade (acurácia > 91%) e Eugenio da Silva et al. (2024) aplicaram a técnica com sucesso em árvores caídas em decomposição na Amazônia Central. NIR tem sido bem-sucedido na identificação de espécies florestais (Lang et al., 2017; Nascimento et al., 2022), inclusive com equipamentos portáteis em serrarias e pontos de fiscalização (Soares et al., 2017; Tsuchikawa et al., 2023).

Contudo, a maioria dos estudos com espectroscopia focam em grupos com propri-

edades químicas muito contrastantes. O desafio é maior para discriminar espécies do mesmo gênero ou filogeneticamente próximas, como as madeiras comercializadas como "Angelim". Até o momento, nenhum estudo avaliou sistematicamente o poder discriminatório da radiação infravermelho para as espécies de angelim. Além da identificação, o espectro NIR correlaciona-se com propriedades tecnológicas da madeira (Wang, 2021; Eugenio da Silva et al., 2024), permitindo distinguir espécies e prever atributos de qualidade. Assim, este estudo objetivou avaliar o potencial do FT-NIR na discriminação de seis espécies de madeira denominadas "Angelim" na Amazônia brasileira, visando fornecer uma ferramenta rápida, não destrutiva e de baixo custo para classificação precisa no setor florestal, com implicações para controle de qualidade e sustentabilidade do manejo.

2. Material e métodos

2.1. Obtenção dos espectros NIR

O conjunto amostral foi composto por 54 peças de madeira, correspondendo a 3 árvores por espécie, oriundas de diferentes localidades da Amazônia brasileira, com amostras-testemunha depositadas na Xiloteca do INPA. As amostras pertencem à família Fabaceae e compreendem as seguintes espécies: Angelim-amargoso (*Vatairea guianensis* Aubl.), Angelim-da-mata (*Hymenolobium pulcherrimum* Ducke), Angelim-pedra (*Hymenolobium excelsum* Ducke), Angelim-rajado (*Zygia racemosa* (Ducke) Barneby & J.W. Grimes), Angelim-verdadeiro (*Dinizia excelsa* Ducke) e Angelim-vermelho (*Andira parviflora* Ducke). A identificação taxonômica das espécies foi previamente confirmada por especialistas, utilizando comparação anatômica com material de referência da coleção, garantindo a confiabilidade do conjunto amostral.

Antes das análises, as amostras foram aclimatadas por sete dias (20 ± 2 °C, 65 ± 5% UR) para minimizar desvios instrumentais, reduzindo interferências da umidade da madeira, uma das principais fontes de variabilidade no NIR (Pasquini, 2018). Os espectros foram coletados em espectrômetro FT-NIR (Antaris II, Thermo Fisher) equipado com detector InGaAs, operando em modo de refletância difusa, sem preparo destrutivo das amostras. As medições foram realizadas na faixa de 10.000 a 4.000 cm^{-1}, com resolução de 8 cm^{-1}, 96 varreduras e 16 scans por espectro. Para cada amostra, foram obtidos quatro espectros em cada um dos planos anatômicos (radial, tangencial e transversal), totalizando 648 espectros (6 espécies × 3 árvores ×3 réplicas x 3 planos × 4 leituras), os quais compuseram o conjunto amostral dos modelos multivariados. A aquisição em diferentes planos anatômicos visa capturar a heterogeneidade

estrutural da madeira, aumentando a representatividade espectral e a robustez dos modelos quimiométricos (Tsuchikawa et al., 2023). Além disso, múltiplas leituras por amostra foram realizadas para reduzir o efeito de ruído instrumental e variações locais da superfície.

2.2. Processamento de dados e análise multivariada

O software TQ Analyst™ foi utilizado para análises multivariadas, e o OMNIC™ para avaliação das bandas espectrais (9.882–4.119 cm^{-1}). Aplicou-se o pré-processamento de correção de dispersão multivariada (MSC) aos espectros brutos para reduzir efeitos de espalhamento da luz devido à rugosidade superficial, melhorando a comparabilidade entre espectros (Pasquini, 2018). Foram testados tratamentos com primeira e segunda derivadas (filtros Savitzky–Golay e Norris, polinômio 3ª ordem, janela de 5 pontos) para identificar o melhor modelo de discriminação. Derivadas eliminam variações de linha de base e resolvem bandas sobrepostas, destacando características químicas sutis entre espécies.

Na análise discriminante linear (LDA), as variáveis dependentes foram categóricas (espécie) e as independentes os valores de absorbância dos espectros NIR, estabelecendo relações entre a assinatura espectral e a identidade taxonômica (Lang et al., 2017; Eugenio da Silva et al., 2024). O modelo de classificação baseou-se na distância de Mahalanobis (DM), que mede a distância entre o vetor espectral da amostra e a distribuição de cada classe, considerando a correlação entre variáveis espectrais – mais robusta que distâncias euclidianas (Nascimento et al., 2022).

Os dados espectrais foram centrados na média, dividindo-se 80-20% (calibração-validação), garantindo representatividade das espécies. O desempenho foi avaliado pelos parâmetros IIC (Índice de identificação correto, Eq. 1), EMC (Erro máximo de classificação, Eq. 2) e ACV (Acurácia da validação cruzada, Eq. 3), conforme abaixo.

Índice de identificação correto, $IIC = \sum Acertos_{C/V} / CA \times 100$ (Eq. 1)

Erro Máximo de Classificação, $EMC = \sum Erro_{C+V} / CA \times 100$ (Eq. 2)

Acurácia do conjunto de validação cruzada (matriz de confusão),

$ACV = \sum Acertos_{V+C} / CA$ (Eq. 3)

Onde C = calibração, V= validação, CA = conjunto total de amostras.

A utilização da matriz de confusão permite avaliar o desempenho do modelo, identificando erros entre espécies, e fornecendo uma visão robusta da capacidade discriminante do modelo, este recurso matemático foi empregado como estratégia interna de avaliação,

permitindo estimar a estabilidade do modelo frente a diferentes subconjuntos de dados e reduzindo o risco de sobreajuste (*overfitting*).

3. Resultados e discussão

Os modelos NIR demonstraram elevada eficácia na discriminação das madeiras comercialmente agrupadas como "Angelim". O desempenho dos modelos esteve diretamente associado à escolha do pré-processamento espectral. Foram produzidas 540 combinações para nível de gênero e 648 para espécie, e o ranking dos oito melhores modelos são apresentados na Tabela 1, validando que o pré-tratamento SNV (Standard Normal Variate) combinado aos filtros Norris e Savitzky-Golay foi determinante para realçar bandas de absorção e reduzir ruídos, resultando em modelos robustos, conforme Schwanninger et al. (2011) e Pasquini (2018).

Para classificação em nível de gênero e espécie, os modelos 8 e 16 (2ª derivada com Norris) atingiram 100% de acerto na calibração e validação, confirmando assinatura espectral distintiva entre as seis espécies: *V. guianensis, H. pulcherrimum, H. excelsum, Z. racemosum, D. excelsa* e *A. parviflora*. Esse desempenho evidencia que variações químicas intrínsecas são suficientemente expressivas para discriminação taxonômica não destrutiva, mesmo em espécies filogeneticamente próximas. A Figura 1 (distância de Mahalanobis) corrobora agrupamentos nítidos.

Entretanto, os modelos 6, 7 e 14 apresentaram baixos parâmetros quimiométricos, enquanto os modelos 3, 4, 11, 12, 13 e 15 mostraram indícios de sobreajuste (*overfitting*) – desempenho superior na validação do que na calibração, indicando instabilidade. Esse comportamento reforça a necessidade de validação cruzada rigorosa e expansão do conjunto amostral, conforme Soares et al. (2017) e Gomes et al. (2025).

A matriz de confusão apresentada na Figura 2, indica os acertos e os baixos erros (confusões residuais com outras espécies de Fabaceae) entre espécies filogeneticamente próximas, como *H. excelsum* e *H. pulcherrimum*, sugerindo que, embora a técnica seja altamente discriminante, a similaridade química entre congêneres pode representar um desafio sutil. Esse padrão já foi observado em estudos com espécies tropicais, nos quais a proximidade filogenética resulta em perfis químicos parcialmente sobrepostos (Lang et al., 2016; Eugenio da Silva et al., 2024).

A base química para essa discriminação torna-se evidente na análise das assinatu-

ras espectrais (Figura 3). Embora visualmente semelhantes em primeira análise (espectros brutos), os espectros das seis espécies revelam diferenças sutis, porém consistentes, em regiões-chave: 9.320–9.200, 8.940–8.680, 7.810–6.880, 6.170–5.770, 5.520–5.280, 5.120–4.900 e 4.660–4.050 cm^{-1}. Essas bandas são reconhecidamente associadas a grupos funcionais de componentes majoritários da madeira como celulose, hemicelulose, lignina e extrativos (Schwanninger et al., 2011; Nascimento et al., 2022; Nascimento et al., 2025). A presença de variações nessas regiões espectrais indica diferenças quantitativas e qualitativas na composição da parede celular, refletindo adaptações ecológicas e funcionais das espécies.

Tabela 1 - Parâmetros de avaliação de modelos quimiométricos para discriminação em gênero e espécie de madeiras de Angelim

Taxón e modelos		Tratamento matemático	IIC (%)		EMC (%)
			Calibração	Validação	
Gênero	1	Espectro + SNV	95,65	84,61	6,78
	2	Espectro + SNV + SG	95,65	84,61	6,78
	3	Espectro 1ª derivada + SNV	89,13	100,00	8,47
	4	Espectro 1ª derivada + SNV + SG	86,95	100,00	10,17
	5	Espectro 1ª derivada + SNV + Norris	93,48	76,92	10,17
	6	Espectro 2ª derivada + SNV	50,00	61,54	47,46
	7	Espectro 2ª derivada + SNV + SG	43,47	76,92	49,15
	8	Espectro 2ª derivada + SNV + Norris	100,00	100,00	0,00
Espécie	9	Espectro + SNV	86,36	84,62	14,04
	10	Espectro + SNV + SG	88,64	84,62	12,28
	11	Espectro 1ª derivada + SNV	86,36	92,31	12,28
	12	Espectro 1ª derivada + SNV + SG	86,36	92,31	12,28
	13	Espectro 1ª derivada + SNV + Norris	88,64	92,31	10,53
	14	Espectro 2ª derivada + SNV	61,36	69,23	36,84
	15	Espectro 2ª derivada + SNV + SG	70,46	76,92	28,07
	16	Espectro 2ª derivada + SNV + Norris	100,00	100,00	0,00

SG = Savitzky-Golay; IIC = Índice de identificação correto; EMC = Erro Máximo de Classificação

O primeiro harmônico de estiramento O–H (relacionado à celulose e à água) e as combinações de deformações O–H, C–H e C–O (presentes na lignina e nos extrativos) compõem a assinatura química das espécies. Essas variações estão associadas não apenas à estrutura lignocelulósica, mas também à presença de metabólitos secundários, como compostos fenólicos, flavonoides e terpenos, que desempenham papel fundamental na resistência biológica e nas propriedades tecnológicas da madeira (Fasciotti et al., 2015; Raobelina et al., 2023).

A capacidade da técnica em captar essas variações químicas interespecíficas posiciona a FT-NIR como uma ferramenta poderosa não apenas para a taxonômica integrativa, mas também para estudos de quimiotaxonomia, ecofisiologia e tecnologia de madeira. Os agrupamentos

observados na Figura 1 não são aleatórios: gêneros como *Hymenolobium* e *Andira*, ambos pertencentes à subfamília Faboideae (antiga divisão botânica), mas com histórias evolutivas distintas, apresentaram assinaturas espectrais claramente separáveis. Esses resultados sugerem que a espectroscopia NIR é capaz de capturar sinais químicos associados à história evolutiva e às estratégias adaptativas das espécies, corroborando estudos recentes em quimiossistemática (Lang et al. 2017; Nascimento et al., 2026).

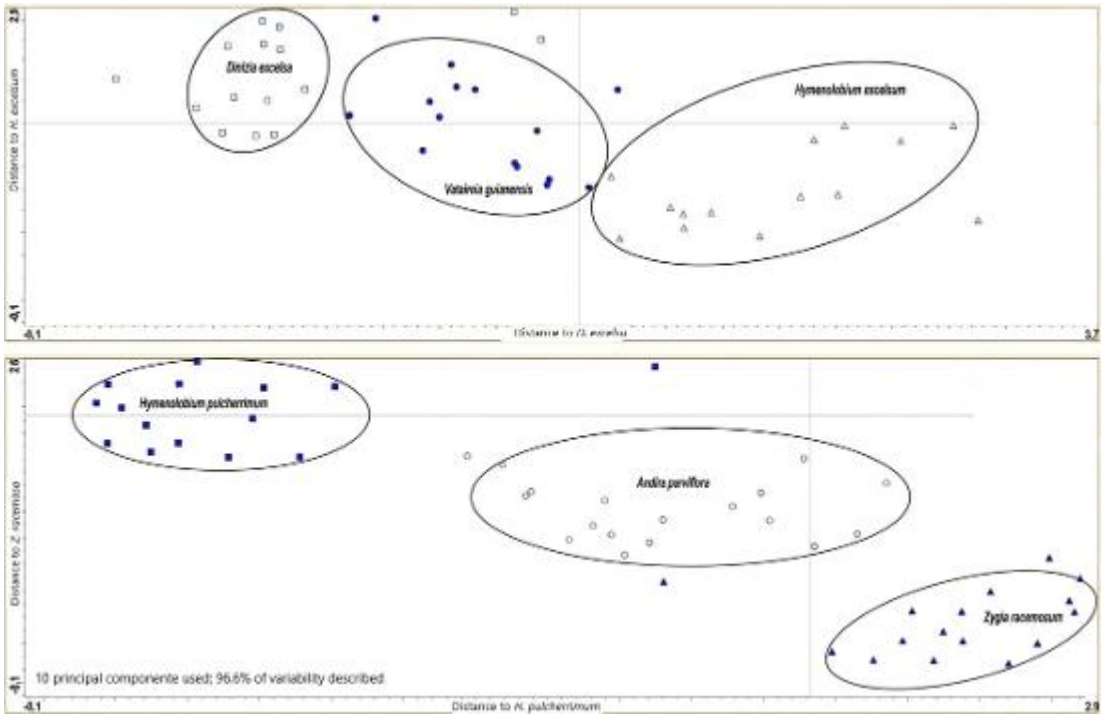


Figura 1 - Distribuição do conjunto de calibração das madeiras de “Angelim” a partir do algoritmo distância Mahalanobis.

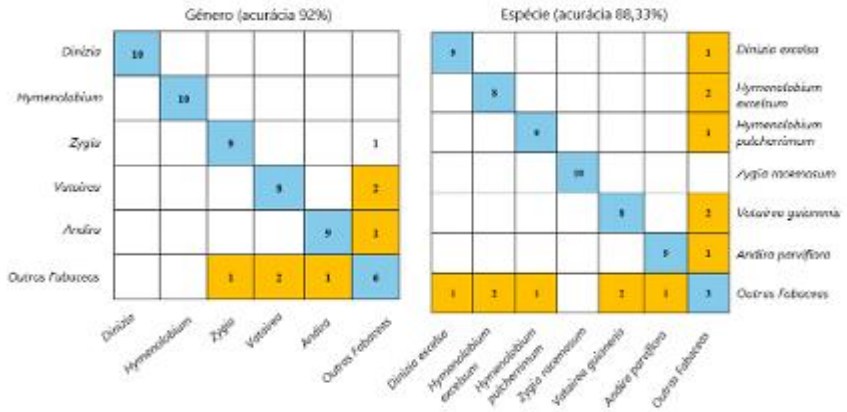


Figura 2 - Matriz de confusão a partir dos dados da validação cruzada (gênero e espécie).

Os achados no estudo estão em consonância com estudos prévios que validaram o uso do NIR para discriminação de espécies madeireiras (Pace et al., 2019; Raobelina et al., 2023), mas

avançam ao demonstrar a aplicabilidade da técnica em materiais de xiloteca. Além disso, o presente estudo contribui ao evidenciar que amostras de coleções científicas podem ser utilizadas como base para desenvolvimento de modelos preditivos, ampliando o potencial de uso de acervos biológicos em análises espectroscópicas.

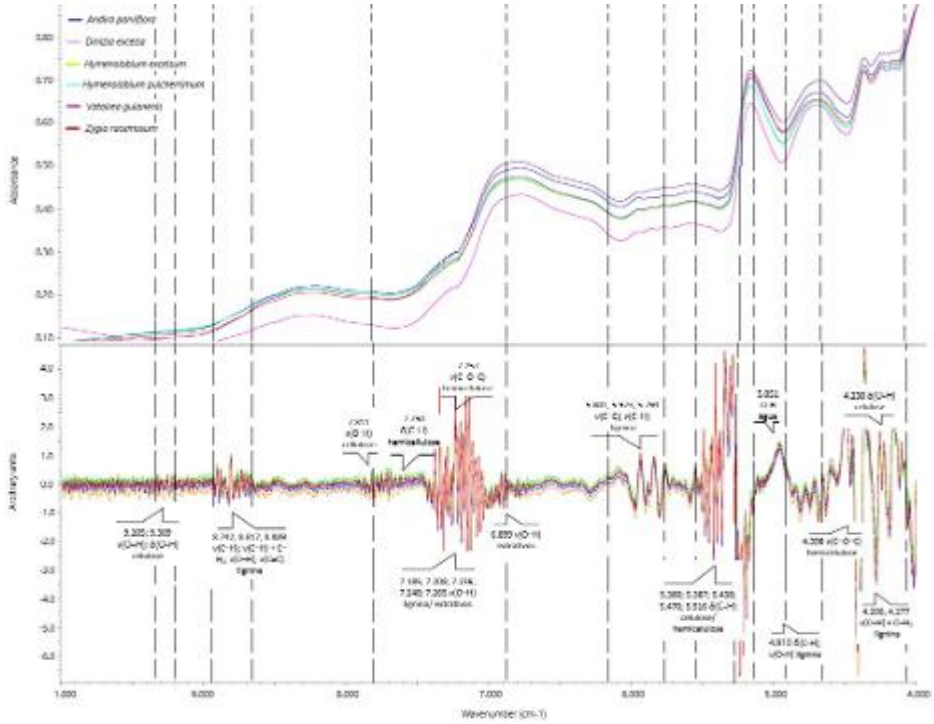


Figura 3 - Espectros médios de 6 tipos de angelim: Espectros brutos e na 2a derivada.

A elevada acurácia obtida (92% para gênero e 88,33% para espécie) indica robustez a variações ambientais, focando nas características químicas intrínsecas de cada táxon. A natureza não destrutiva e a rapidez da análise contrastam com métodos tradicionais de anatomia da madeira. O NIR apresenta potencial para programas silviculturais, certificação florestal e fiscalização ambiental, contribuindo para combate à exploração ilegal (Tsuchikawa et al., 2023; Silva da Silva et al., 2025).

A assinatura espectral NIR de madeiras da xiloteca foi usada como entrada para análise discriminante (LDA), resultando em alto índice de identificação para calibração e validação. Entretanto, a aplicação em amostras externas reduziu a acurácia em nível de espécie, indicando necessidade de ampliar a variabilidade amostral para melhor generalização. A espectroscopia NIR aliada à análise multivariada é robusta para classificação de espécies vegetais, com resultados rápidos e confiáveis (Pace et al., 2019; Nascimento et al.

2022). Os espectros NIR brutos são semelhantes, mas diferenças sutis são identificadas por processamento matemático (1ª e 2ª derivada), fundamentais para modelos discriminantes. Essas variações estão associadas à composição química da madeira (celulose, hemicelulose, lignina, extrativos). A integração com a distância de Mahalanobis explora a estrutura multivariada dos dados, aumentando a precisão na identificação de padrões espectrais (Nascimento et al., 2022).

4. Conclusões

A espectroscopia FT-NIR demonstrou elevada eficácia na discriminação de seis espécies de madeira comercialmente denominadas "angelim" na Amazônia, com modelos quimiométricos atingindo 100% de acerto na identificação em nível de gênero e espécie. A técnica supera as limitações da nomenclatura vernacular imprecisa, oferecendo uma alternativa rápida, não destrutiva e confiável à taxonomia tradicional, especialmente na ausência de material fértil. Os resultados confirmam que a assinatura espectral reflete diferenças químicas intrínsecas aos táxons, validando a FT-NIR como ferramenta promissora para fiscalização, comércio e pesquisa da biodiversidade, contribuindo para a transparência e sustentabilidade da cadeia produtiva florestal.

5. Agradecimentos

INCT-Madeiras-da-Amazônia”; CNPq/MCTI/FNDCT/Brasil (Processo: 403839/2021-1) “Possíveis efeitos da mudança do clima da idade contemporânea nos ciclos do carbono e da água da floresta Amazônica” pelo apoio financeiro.

6. Referências bibliográficas

Eugenio da Silva, C., Nascimento, C. S., Freitas, J. A., et al. (2024). Application of infrared spectroscopy in the identification of fallen trees from the Amazon rainforest (Myristicaceae). Forest Science, 70(2), 102–112. https://doi.org/10.1093/forsci/fxae001

Fasciotti, M., Alberici, R. M., Cabral, E. C.et al. (2015) Wood chemotaxonomy via ESI-MS profiles of phytochemical markers: the challenging case of African versus Brazilian mahogany woods. Analical Methods, 7(20), 8576–8583.

Ferreira, G., Gomes, J., & Hopkins, M. J. G. (2004). Estudo anatômico de espécies Leguminosae comercial no estado do Pará como "angelim". Acta amazonica, 34(3),387–398.

Florsheim, S. M. B., Ribeiro, A. P., Longui, E. L., et al. (2020). Identificação macroscópica de madeiras comerciais do Estado de São Paulo. Instituto Florestal.

Freitas, J. A., & Vasconcellos, F. (2019). Identificação de madeiras da Amazônia, INPA.

Gomes, J. N. N., Medeiros, D. T., Viana, L. C., et al. (2025). Influence of moisture on the identification of tropical wood species by NIR. Holzforschung, 79(4/5), 188–201

Lang, C., Almeida, D. R. A., & Costa, F. R. C. (2017). Discrimination of taxonomic identity at species, genus and family levels using Fourier transformed near-infrared spectroscopy (FT-NIR). Forest Ecology and Management, 406, 219–227.

Monteiro, T. V. C., Fioramonte, M., Pirolla, R., et al. (2026). Real-time wood chemotyp using a low-cost and compact mass spectrome. AOS Omega, 11, 16687–16699.

Nascimento, C. S., Andrade, J. C., Eugenio da Silva, C., et al. (2026). A non-destructive approach using spectral fingerprinting and chemometrics in the authentication and quality prediction of fallen tree wood. Microchemical Journal, 225, 117971.

Nascimento, C. S., Arújo, R. D., Eugenio da Silva, C., et al. (2022). Near infrared spectroscopy as a tool to discriminate tannins from Amazonian species. Ciência e Agrotecnologia, 46, e001422. https://doi.org/10.1590/1413-7054202246001422

Nascimento, C. S., Cruz, I. A., Nascimento, C. C., et al. (2023). Technological properties of wood from small diameter in an area of forest exploitation of reduced impact in the tropical forest. European Journal of Forest Research, 142(3), 1–15.

Nascimento, C., Araújo, R., Lima, M., et al. (2025). A chemical survey of Amazonian rainforest species: Characterization of wood extractives. J. Sustainable Forestry, 2592600, 1–19.

Nisgoski, S., Vieira, H. C., Dos Santos, J. X., et al. (2025). NIR spectroscopy for tree species identification based on different samples: a review. Forest Systems, 34(3), e20923.

Pace, J. H. C., Latorraca, J. V. F., Hein, P. R. G., et al. (2019). Wood species identification from Atlantic forest by near infrared spectrosc. Forest Systems, 28(3), e015.

Pasquini, C. (2018). Near infrared spectroscopy: A mature analytical technique with new perspectives – a review. Analytica Chimica Acta, 1026, 8–36.

Raobelina, A., Chaix, G., Razafimah, A., et al. (2023). Use of a NIR portable spectrometer for identification of Dalbergia species from Madagascar. Wood and Fib. Sci., 55(1), 1–15.

Schwanninger, Rodrigues, J., & Fackler, K. (2011). A review of band assignments inNIR spectra of wood and wood components. Journal of Near Infrared Spectroscopy, 19(5), 287–308.

Silva da Silva, W. D., Santos, J. X. d., Naide Acosta, T. L., et al. (2025). Near-infrared spectroscopy and machine learning for wood species discrimination in an Amazon floodplain forest management area. Forests, 16, 984.

Soares, L. F., Silva, D. C., Bergo, M. C. J., et al. (2017). Avaliação de espectrômetro NIR portátil e PLS-DA para a discriminação de madeiras amazônicas. Química Nova, 40, 418–426.

Souza, L. A. G. (2023). Biodiversity of Fabaceae in the Brazilian Amazon. In Tropical forests: Ecology, diversity and conserv. IntechOpen. https://doi.org/10.5772/intechopen.110374

Tsuchikawa, S., Inagaki, T., & Ma, T. (2023). Application of near-infrared spectroscopy to forest and wood products. Current Forestry Reports, 9, 401–412.

Wang, X. (2021). Recent advances in nondestructive evaluation of wood: In-forest wood quality assessments. Forests, 12, 949. https://doi.org/10.3390/f12070949

QUALIDADE DA BIOMASSA

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Aplicação da Tomografia de Impulso na Avaliação de *Adenanthera pavonina* na Universidade Federal do Acre

Erica Vitoria de Almeida Silva[1]; Iris Izabel da Silva Cavalcante[1]; Karen Tawany de Abreu Viana[1]; Shara Dias de Amorim[1]; Vitória Laurinda de Souza[1]; Jéssica Nunes Silva[2]; Leila Priscila Peters[1]; Patrícia Gomes Ribeiro[1]

[1]Universidade Federal do Acre
[2]Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia

Resumo: A arborização urbana desempenha papel fundamental na qualidade ambiental das cidades, contribuindo para o conforto térmico, a valorização paisagística e o bem estar da população. Porém, defeitos estruturais em árvores podem representar riscos à segurança pública em áreas com circulação de pessoas e veículos. Este estudo teve como objetivo avaliar a integridade estrutural de indivíduos de *Adenanthera pavonina* localizados nos estacionamentos da Universidade Federal do Acre por meio da tomografia de impulso. Foram avaliadas sete árvores com base na presença de sinais visuais de comprometimento estrutural. As análises foram realizadas com o tomógrafo Arbotom®, que permite avaliar a condição interna do lenho a partir da propagação de ondas mecânicas. Os resultados evidenciaram diferentes níveis de integridade estrutural, com indivíduos apresentando desde madeira íntegra até sinais de deterioração interna. A tomografia de impulso mostrou-se eficiente na detecção de alterações não observáveis externamente, contribuindo com informações relevantes para o monitoramento e avaliação do risco de queda na arborização.

Palavras-chave: Arboricultura Urbana; Avaliação de Risco; Integridade Estrutural.

Application of Impulse Tomography in the Evaluation of *Adenanthera pavonina* at the Federal University of Acre

Abstract: Urban trees play a vital role in improving environmental quality in cities, providing thermal comfort, enhancing urban landscapes, and promoting human well-being. However, structural defects in trees may pose significant risks to public safety, particularly in areas with intense pedestrian and vehicular traffic. This study aimed to assess the structural condition of *Adenanthera pavonina* trees located in the parking areas of the Federal University of Acre using impulse tomography. Seven individuals were selected based on the presence of visual indicators of structural impairment. The assessments were carried out using an Arbotom® impulse tomograph, which evaluates the internal condition of wood by measuring the propagation of mechanical waves through the stem. The results revealed varying levels of structural integrity among the evaluated trees, ranging from sound wood to signs of internal deterioration. Impulse tomography proved to be an effective tool for detecting internal defects that could not be identified through visual inspection alone, providing valuable information for monitoring and risk assessment and supporting safer and more effective urban tree management practices.

Keywords: Urban Forestry; Risk Assessment; Structural Integrity.

1. Introdução

A arborização urbana desempenha papel fundamental na melhoria da qualidade ambiental e na promoção do bem-estar da população, contribuindo para a regulação microclimática, a redução da poluição e a valorização paisagística dos espaços urbanos. No entanto, a ausência de avaliações sistemáticas da sanidade das árvores, associada à adoção de práticas inadequadas de manejo, tem favorecido o aumento de falhas estruturais e a ocorrência de quedas, representando riscos à segurança pública (Emerick, 2021).

Nesse contexto, *Adenanthera pavonina* L., espécie pertencente à família Fabaceae, destaca-se pelo elevado potencial ornamental e pela ampla utilização na arborização urbana brasileira. Sua ocorrência frequente em praças, parques e vias públicas (Silva *et al*., 2018) reforça a importância de estudos voltados à avaliação de suas condições estruturais. Dessa forma, o monitoramento e a análise da integridade dos indivíduos tornam-se essenciais para subsidiar estratégias de manejo, garantir a segurança da população e promover a sustentabilidade da arborização urbana.

Historicamente, a análise do risco de árvores tem sido baseada predominantemente em inspeções visuais e métodos qualitativos (Klein *et al*., 2019). Embora amplamente utilizados, esses procedimentos apresentam limitações, sobretudo na detecção de defeitos internos que não se manifestam externamente. Como alternativa, métodos invasivos têm sido empregados, envolvendo a penetração do xilema por dispositivos específicos para a identificação de processos de deterioração interna (Goh *et al*., 2018). Entretanto, tais abordagens podem causar danos ao tecido vegetal e comprometer a integridade estrutural do indivíduo avaliado.

Diante dessas limitações, os métodos não destrutivos têm se destacado como importantes ferramentas na caracterização de materiais biológicos, principalmente pela rapidez e pela capacidade de fornecer informações sem causar danos significativos ao material analisado (Medeiros *et al*., 2018). Esses métodos baseiam-se na aplicação de princípios físicos para a identificação de descontinuidades ou defeitos internos, sem promover alterações relevantes nas propriedades físicas, químicas ou mecânicas do material (Martins *et al*., 2011).

Entre as técnicas disponíveis, a tomografia de impulso tem se consolidado como uma das mais eficientes na avaliação da integridade estrutural de árvores. O método utiliza sensores distribuídos ao redor do tronco para registrar a propagação de ondas mecânicas, cujos dados são processados na forma de imagens tomográficas que evidenciam variações na estrutura interna da madeira (Latorraca *et al*., 2011; Linhares *et al*., 2021). Dessa forma, possibilita a identificação de defeitos como cavidades, fissuras, presença de fungos e ataques de insetos, contribuindo para diagnósticos mais precisos e confiáveis (Amodei *et al*., 2010).

Nesse sentido, a aplicação da tomografia de impulso torna-se especialmente relevante em áreas com intensa circulação de pessoas e veículos, onde a detecção precoce de defeitos estruturais é essencial para a mitigação de riscos e a prevenção de acidentes. Assim, este estudo teve como objetivo avaliar a integridade estrutural de árvores localizadas nos estacionamentos da Universidade Federal do Acre por meio da técnica de tomografia de impulso.

2. Material e métodos

O estudo foi realizado nos estacionamentos do campus-sede da Universidade Federal do Acre, em Rio Branco, onde foram avaliados sete indivíduos de *Adenanthera pavonina* L. (Figura 1). A seleção das árvores foi baseada na presença de indícios de risco potencial de queda, como inclinação do tronco, danos aparentes e sinais de comprometimento estrutural, além de circunferência à altura do peito (CAP) igual ou superior a 60 cm.

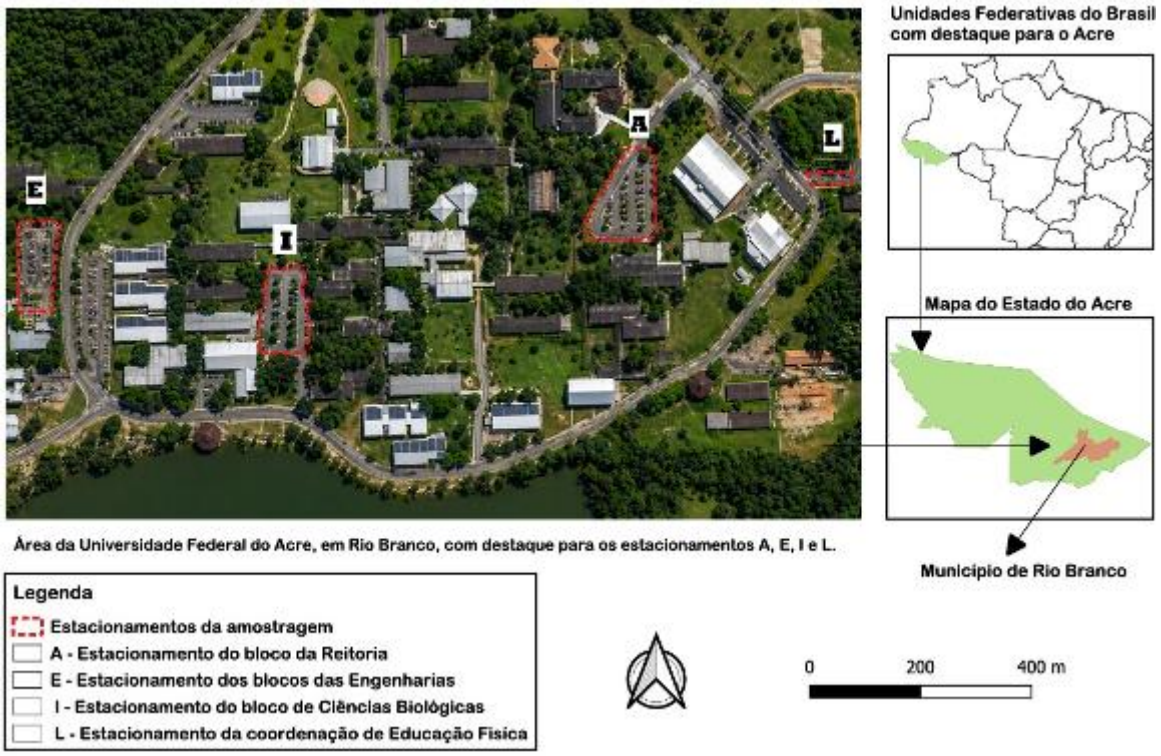


Figura 1 - Localização da área de estudo nos estacionamentos do campus-sede da Universidade Federal do Acre (UFAC), Rio Branco, Acre.

As características dendrométricas e os principais sinais de comprometimento observados nos indivíduos avaliados estão apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 – Caracterização dendrométrica e condições estrutural dos indivíduos de *Adenanthera pavonina* avaliados conforme a ABNT NBR 16246-3/2019

Código	Nome científico	CAP	Condição estrutural	Risco

		(cm)		
1	*Adenanthera pavonina*	84	Perfuração + inclinação	Médio
2	*Adenanthera pavonina*	65	Perfuração	Baixo
3	*Adenanthera pavonina*	87	Poda inadequada	Médio
4	*Adenanthera pavonina*	84	Inclinação	Médio
5	*Adenanthera pavonina*	70	Poda inadequada + rachadura	Alto
6	*Adenanthera pavonina*	69	Rachadura	Médio
7	*Adenanthera pavonina*	67	Inclinação	Baixo

Erro! Vínculo não válido. Para a realização da pesquisa, foram utilizados o equipamento Arbotom®, acoplado ao computador, um martelo e uma fita métrica. Inicialmente, foi realizada a medição da circunferência à altura do peito (CAP) de cada árvore. A partir desse valor, os sensores foram distribuídos de forma equidistante ao longo da circunferência do tronco, sendo utilizados quatro sensores por indivíduo. Adicionalmente, foi mantido uma distância mínima de 15 cm entre os sensores, visando maior precisão na aquisição dos dados. Os sensores foram instalados a 1,30 m do solo, correspondente à altura do peito.

Em seguida, pregos foram fixados na seção transversal do tronco para a sustentação dos sensores. Após a instalação, foram geradas ondas de impacto em cada sensor por meio da aplicação de impactos mecânicos. Cada sensor recebeu impactos sucessivos para a produção de ondas mecânicas, até que os erros apresentados na tabela Delta% do software do aparelho fossem inferiores a 10% (Rinntech, 2005).

As velocidades de propagação das ondas entre os sensores foram calculadas automaticamente pelo software do equipamento, a partir da relação entre a distância percorrida e o tempo de propagação. Com base nesses dados, foram geradas imagens tomográficas que representam a distribuição interna da qualidade do lenho na seção transversal do tronco.

As imagens são expressas por meio de uma escala de cores, na qual diferentes tonalidades indicam variações na velocidade de propagação das ondas. Regiões com maiores velocidades estão geralmente associadas à madeira íntegra e de maior densidade, enquanto áreas com velocidades reduzidas podem indicar a presença de defeitos internos, como cavidades, fissuras, deterioração por fungos ou ataques de insetos.

3. Resultados e discussão

A tomografia de impulso permitiu avaliar a integridade interna do lenho dos sete indivíduos de *Adenanthera pavonina* avaliados, evidenciando diferenças na distribuição da velocidade de propagação das ondas mecânicas ao longo da seção transversal dos troncos (Figura 2). As imagens tomográficas geradas pelo Arbotom® apresentaram predominância de tons verdes na maior parte dos indivíduos, indicando regiões com maior velocidade de propagação das ondas e, consequentemente, maior continuidade estrutural da madeira (Pereira *et al.*, 2007).

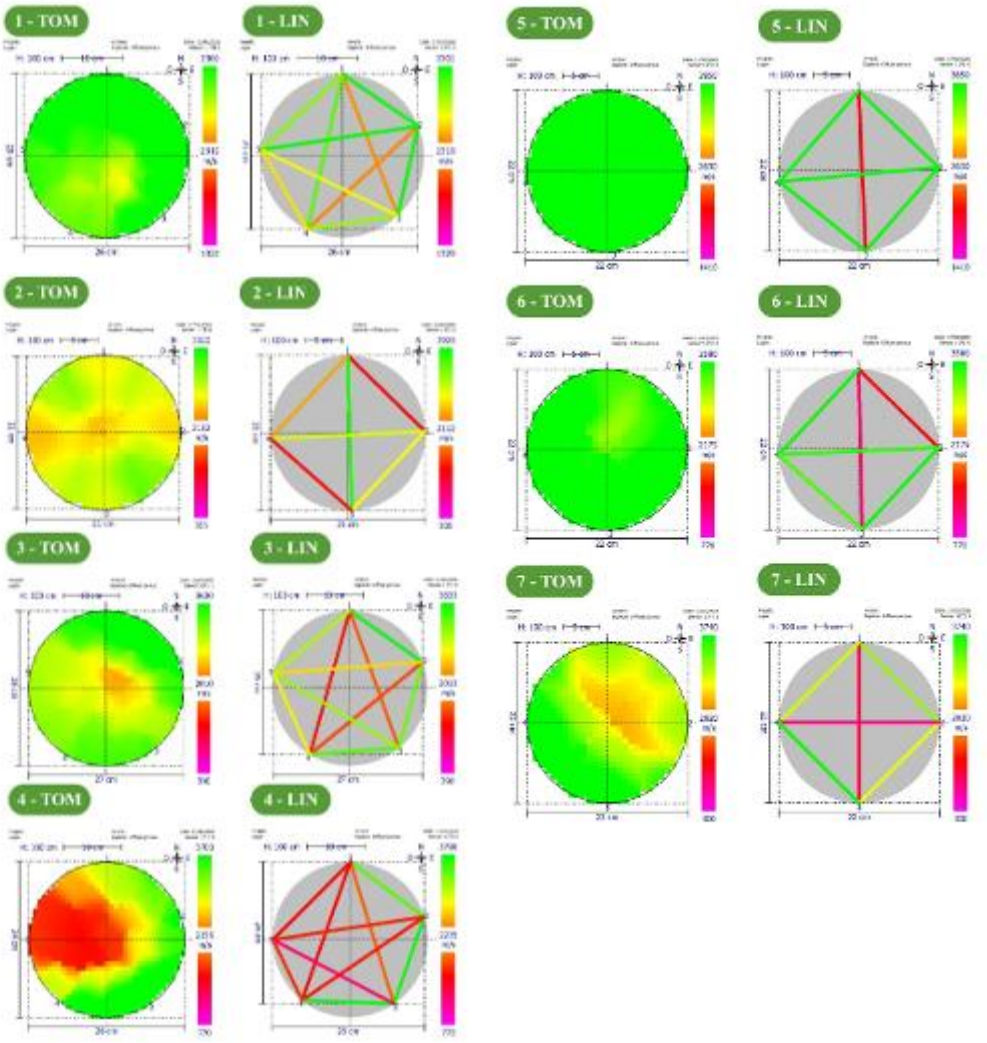


Figura 2 - Imagens tomográficas (TOM) e de propagação das ondas mecânicas (LIN) obtidas por tomografia de impulso em indivíduos de *Adenanthera pavonina*. Regiões em verde indicam maior integridade estrutural do lenho, enquanto áreas em amarelo, laranja e vermelho indicam possíveis alterações internas e redução da qualidade da madeira.

Os indivíduos 1, 5 e 6 apresentaram distribuição relativamente homogênea das velocidades, com predomínio de áreas verdes e poucas regiões de transição para tons

amarelados. Esses resultados sugerem adequada integridade estrutural do lenho, corroborando as observações visuais realizadas em campo, nas quais foram registrados apenas defeitos superficiais ou alterações de baixa severidade. Segundo Emerick *et al*. (2025), a predominância de velocidades elevadas está geralmente associada à presença de madeira sadia, com menor probabilidade de ocorrência de cavidades ou processos avançados de deterioração.

Os indivíduos 3 e 7 apresentaram áreas localizadas em tons amarelos e alaranjados, concentradas principalmente na região central do tronco. Essas alterações indicam redução da velocidade de propagação das ondas, sugerindo possíveis descontinuidades internas ou estágios iniciais de deterioração do lenho. Embora tais alterações não indiquem necessariamente risco imediato de falha estrutural, representam indícios de comprometimento interno que justificam monitoramento periódico e avaliações complementares. Estudos realizados por Papandrea *et al*. (2022) demonstram que regiões com velocidades intermediárias podem estar relacionadas a alterações na densidade da madeira, fissuras internas ou estágios iniciais de degradação biológica.

Os resultados mais expressivos foram observados nos indivíduos 2 e 4. A árvore 2 apresentou regiões extensas em tons amarelos e alaranjados distribuídas na seção transversal, evidenciando heterogeneidade estrutural e possível degradação interna. Já a árvore 4 apresentou extensa área em tom vermelho ocupando grande parte da seção transversal do tronco, indicando redução significativa da velocidade de propagação das ondas mecânicas. Esse padrão sugere elevado grau de comprometimento estrutural, possivelmente associado à presença de cavidades internas, deterioração avançada ou perda de resistência mecânica do lenho.

As imagens de linhas (LIN) reforçam essa interpretação, uma vez que os indivíduos 2 e 4 apresentaram maior quantidade de trajetórias representadas por cores amarelas, laranjas vermelhas e rosadas, indicando menores velocidades entre os sensores e maior probabilidade de ocorrência de defeitos internos. Em contraste, os indivíduos classificados como estruturalmente mais íntegros apresentaram predominância de linhas verdes, refletindo melhor transmissão das ondas mecânicas pelo lenho.

De acordo com Reis *et al*. (2022), a redução da velocidade de propagação das ondas está diretamente relacionada à perda de resistência mecânica da madeira causada por cavidades, podridões ou outros defeitos internos. Os autores destacam que a tomografia acústica constitui ferramenta eficiente para estimar o grau de comprometimento estrutural e auxiliar na avaliação do risco de falha de árvores urbanas. Os resultados observados para os indivíduos 2 e 4 foram comparáveis aos identificados por Ataide *et al*. (2023). Esses pesquisadores constataram amplas

áreas de baixa velocidade ligadas à deterioração interna em árvores urbanas históricas. Esse padrão indica possíveis descontinuidades estruturais no lenho, como cavidades, fissuras ou estágios avançados de degradação, que podem enfraquecer a resistência mecânica do tronco e elevar o risco de falha estrutural.

Além disso, a inspeção visual realizada previamente identificou nos indivíduos 2 e 4 características como perfuração e inclinação do tronco. A correspondência entre esses sinais externos e as alterações detectadas nas imagens tomográficas demonstra a importância da utilização conjunta de métodos visuais e instrumentais para a avaliação do risco arbóreo. Conforme destacado por De Góes *et al*. (2026), a combinação de diferentes técnicas aumenta significativamente a confiabilidade dos diagnósticos e reduz a subjetividade presente nas avaliações exclusivamente visuais.

4. Conclusões

A tomografia de impulso mostrou-se eficiente na avaliação da integridade estrutural de sete indivíduos de *Adenanthera pavonina* localizados nos estacionamentos da Universidade Federal do Acre. A técnica permitiu identificar diferentes níveis de comprometimento interno do lenho, revelando que os indivíduos 2 e 4 apresentaram as maiores áreas associadas à deterioração estrutural, enquanto os indivíduos 1, 5 e 6 apresentaram predominância de madeira íntegra. Além de complementar a inspeção visual, a metodologia possibilitou detectar alterações internas não observáveis externamente, aumentando a confiabilidade da avaliação do risco arbóreo. Os resultados demonstram o potencial da tomografia de impulso como ferramenta de apoio ao monitoramento e ao manejo da arborização urbana, subsidiando a tomada de decisão quanto à necessidade de acompanhamento periódico ou intervenções preventivas, contribuindo para a segurança dos usuários e para a conservação do patrimônio arbóreo da UFAC.

5. Agradecimentos

À Universidade Federal do Acre (UFAC), pelo suporte institucional e pela disponibilidade das áreas de estudo. Expressamos nosso agradecimento aos colaboradores e técnicos pelo auxílio na coleta de dados e pela disponibilização do tomógrafo de impulso, essencial para a realização deste estudo. Reconhecemos, ainda, a contribuição de todos os envolvidos, direta ou indiretamente, cuja dedicação foi fundamental para a realização desta pesquisa.

6. Referências bibliográficas

Amodei, J. B., Oliveira, B. R. U., Gurgel, M. M., Carvalho, A. M., Medeiros, R. A., & Latorraca, J. V. F. (2010). Avaliação preliminar da qualidade da madeira de Tectona grandis L. f. através da tomografia de impulso. *Floresta e Ambiente*, 17(4), 124–128. https://doi.org/10.4322/floram.2011.016

Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2019). *Florestas urbanas — Manejo de árvores, arbustos e outras plantas lenhosas — Parte 3: Avaliação de risco de árvores* (NBR 16246-3). ABNT

Ataide, G. C. V. S., Ataide, D. H. S., Martins, B. C., Carvalho, A. M., & Latorraca, J. V. F. (2023). Historic urban trees: Assessing the trunk's internal integrity. *Bosque*, 44(3), 481–491. https://doi.org/10.4067/S0717-92002023000200481

de Góes, M. B., Carrasco, E. V. M., & Klein, R. (2026). Métodos de avaliação do risco de queda de árvores urbanas: uma revisão crítica de abordagens visuais, instrumentais e quantitativas. *Revista de geopolítica*, 17(3),e2038. https://doi.org/10.56238/revgeov17n3-223

Emerick, T. G. (2021). Risco de queda de árvores urbanas: A associação entre os parâmetros da análise visual, tomogramas e ocorrência de queda (Dissertação de mestrado). Universidade Federal de Viçosa.

Emerick, T. G., Martini, A., & Souza, M. M. (2025). Evaluation of internal wood condition in tree trunks using sonic tomography and electrical resistance tomography. *Cerne*, 31, e-3486. https://doi.org/10.1590/01047760202531013486

Goh, C. L., Rahim, R. A., Rahiman, M. H. F., Talib, M. T. M., & Tee, Z. C. (2018). Sensing wood decay in standing trees: A review. *Sensors and Actuators A: Physical*, 269, 276–282. https://doi.org/10.1016/j.sna.2017.11.038

Klein, R. W., Koeser, A. K., Hauer, R. J., Hansen, G., & Escobedo, F. J. (2019). Risk assessment and risk perception of trees: A review of literature relating to arboriculture and urban forestry. *Arboriculture & Urban Forestry*, *45*(1), 26–38. https://doi.org/10.48044/jauf.2019.003

Latorraca, J. V. F., Rodrigues, N. D., Vieira, M. C., Ohana, C. C., & Teixeira, J. G. (2011). Efeito da umidade da madeira na propagação de ondas mecânicas. *Floresta e Ambiente*, 18(4), 451–459. https://doi.org/10.4322/floram.2011.064

Linhares, C. S. F., Gonçalves, R., Martins, L. M., & Knapic, S. (2021). Structural stability urban trees using visual and instrumental techniques: A review. *Forests*, 12(12), 1752. https://doi.org/10.3390/f12121752

Martins, S. F., Ferreira, R. M., & Feio, A. O. (2011). Ensaios não destrutivos - passado e futuro. Em Anais do CIMAD 11 – 1º Congresso Ibero-LatinoAmericano da Madeira na Construção (pp. 1–10). Coimbra, Portugal.

Medeiros, R. G. S., Nascimento, C. C., Barros, S. V. S., Kroessin, A., Paula, E. V. C. M., & Higuchi, N. (2018). Tomografia de impulso na avaliação da sanidade e rendimento de Micrandopsis scleroxylon W. Rodr. *Nativa*, *5*(7), 649-655649–655. https://doi.org/10.31413/nativa.v5i7.4514

Papandrea, S. F., Cataldo, M. F., Zimbalatti, G., & Proto, A. R. (2022). Comparative evaluation of inspection techniques for decay detection in urban trees. *Sensors and Actuators A: Physical*, 340, 113544. https://doi.org/10.1016/j.sna.2022.113544

Pereira, L. C., Silva Filho, D. F., Tomazello Filho, M., Couto, H. T. Z., Moreira, J. M. M. A. P., & Polizel, J. L. (2007). Tomografia de impulso para avaliação do interior do lenho de árvores. *Revista da Sociedade Brasileira de Arborização Urbana*, 2(2), 14–28. https://doi.org/10.5380/revsbau.v2i2.66313

Reis, M. N., Gonçalves, R., Brazolin, S., & Palma, S. S. A. (2022). Strength loss inference due to decay or cavities in tree trunks using tomographic imaging data applied to equations proposed in the literature. *Forests*, 13(4), 596. https://doi.org/10.3390/f13040596

Rinntech. (2005). ARBOTOM 3-D Tree Impulse Tomograph: User manual (Versão 1.59). https://rinntech.info/products/arbotom/

Silva, L. S., Oliveira, Y. R., Silva, P. H., Pimentel, R. M. M., & Abreu, M. C. (2018). Inventário das plantas arbustivo-arbóreas utilizadas na arborização urbana em praças públicas. *Journal of Environmental Analysis and Progress*, 3(2), 241–249. https://doi.org/10.24221/jeap.3.2.2018.1834.241-249

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Associação entre biochar e esterco bovino como condicionadores de solo

Tayná Rebonato Oliveira[1]; Clara Esposito Gualandi[1]; Hemanuelly Ferreira Breda Lãn Oliveira[1]; Merlindo Jacinto Manjate[1]; Fernanda Aparecida Nazário[2]; Kamilla Crysllayne Alves da Silva[2]; Iara Nobre Carmona[1]; Ananias Francisco Dias Júnior[1]

[1] Universidade Federal do Espírito Santo - UFES 01
[2] Escola Superior de Agronomia "Luiz de Queiroz" – ESALQ/USP 02

Resumo: A redução da matéria orgânica e o comprometimento das funções do solo, associados ao uso intensivo de fertilizantes químicos, têm impulsionado a busca por condicionadores orgânicos capazes de melhorar a retenção e a ciclagem de nutrientes. Diante disso, o objetivo desse trabalho foi caracterizar o biochar de casca de café, o esterco bovino e mistura formada por esses materiais, avaliando seu potencial para utilização como condicionadores do solo. Foram determinados os teores de materiais voláteis, carbono fixo e cinzas, pH, condutividade elétrica e composição elementar por fluorescência de raios X. O BC apresentou maior teor de carbono fixo, cerca de 68%, maior pH, aproximadamente 10,5, e predominância de potássio. O EB apresentou maiores teores de materiais voláteis e cinzas, pH próximo de 8,6 e composição mineral mais diversificada. O BCE apresentou valores intermediários para a composição imediata e o pH, além de reunir elementos presentes nos dois materiais. A condutividade elétrica variou entre 280 e 298 µS cm^{-1}. A associação entre biochar e esterco bovino reuniu estabilidade carbonácea e diversidade mineral, indicando uma alternativa promissora para o condicionamento do solo.

Palavras-chave: Pirólise; Fertilidade do solo; Gestão de resíduos.

Association of biochar and cattle manure as a complementary strategy for soil conditioning

Abstract: The decline in soil organic matter and the impairment of soil functions associated with the intensive use of mineral fertilizers have driven the search for organic amendments capable of improving nutrient retention and cycling. Therefore, this study aimed to characterize coffee husk biochar, cattle manure, and the blend formed by these materials, assessing their suitability for use as soil conditioners. Volatile matter, fixed carbon, and ash contents were determined, together with pH, electrical conductivity, and elemental composition by X-ray fluorescence spectroscopy. BC exhibited the highest fixed carbon content, approximately 68%, the highest pH, approximately 10.5, and a predominance of potassium. EB showed higher volatile matter and ash contents, a pH of approximately 8.6, and a more diverse mineral composition. BCE presented intermediate values for proximate composition and pH, while also combining elements found in both materials. Electrical conductivity ranged from 280 to 298 µS cm^{-1}. The association of biochar and cattle manure combined carbon stability with mineral diversity, indicating a promising alternative for soil conditioning.

Keywords: Pyrolysis; Soil fertility; Waste management.

1. Introdução

O crescimento da demanda por alimentos tem ampliado a pressão sobre os solos agrícolas e a dependência de fertilizantes químicos. Quando utilizados de forma excessiva, os fertilizantes

químicos podem intensificar a acidificação e a lixiviação de nutrientes, alterar as comunidades microbianas e comprometer a estabilidade dos agregados (Dai et al., 2020). Essas alterações reduzem a capacidade do solo de reter água e nutrientes, além de comprometer os processos de ciclagem e limitar a manutenção da produtividade agrícola ao longo do tempo (Motsi et al., 2025). Esses impactos mostram que a manutenção da fertilidade do solo não pode depender exclusivamente de insumos químicos. Torna-se, portanto, necessário adotar estratégias que favoreçam a recuperação das funções essenciais do solo.

Entre as alternativas investigadas, o biochar tem-se destacado por apresentar uma matriz carbonácea resistente à decomposição e uma estrutura porosa capaz de favorecer a retenção de água e íons presentes no solo (Kritikaki et al., 2025; Rambhatla et al., 2025). Seus grupos funcionais, superfícies carregadas e elevada área superficial favorecem a retenção de nutrientes e capacidade de troca catiônica, além de contribuírem para a redução da densidade do solo (Adetunji & Blanco-Canqui, 2026; Al-Rabaiai et al., 2024). Contudo, biochars produzidos a partir de resíduos vegetais podem apresentar baixa concentração de nutrientes e liberação mais lenta, de modo que seu uso isolado nem sempre atende à demanda nutricional imediata das plantas (Kumar et al., 2026).

Nesse contexto, o esterco bovino, por conter nitrogênio, fósforo e potássio, (Meng et al., 2019), pode complementar o biochar ao fornecer nutrientes potencialmente disponíveis no solo. Na associação com esterco bovino, o aporte nutricional é ampliado por compostos orgânicos mais facilmente mineralizáveis, que fornecem substrato à atividade microbiana (Ali et al., 2022; Hassan & Strezov, 2025). Entretanto, a rápida mineralização da fração orgânica lábil do esterco pode reduzir a retenção e a permanência dos nutrientes liberados no solo (Motsi et al., 2025). Dessa forma, a mistura entre o biochar e o esterco bovino, pode associar o fornecimento de nutrientes pelo esterco à estabilidade carbonácea e ao potencial de retenção do biochar. A atuação conjunta desses materiais justifica investigar se a mistura apresenta propriedades favoráveis ao condicionamento do solo.

Diante disso, parte-se da hipótese de que a associação entre biochar e esterco bovino reúne características químicas e composicionais complementares, com potencial para favorecer sua aplicação como condicionador do solo. O objetivo deste estudo foi caracterizar o biochar, o esterco bovino e a mistura entre esses materiais quanto à composição química imediata, ao pH, à condutividade elétrica e à composição elementar relativa, buscando identificar características complementares relevantes ao condicionamento do solo.

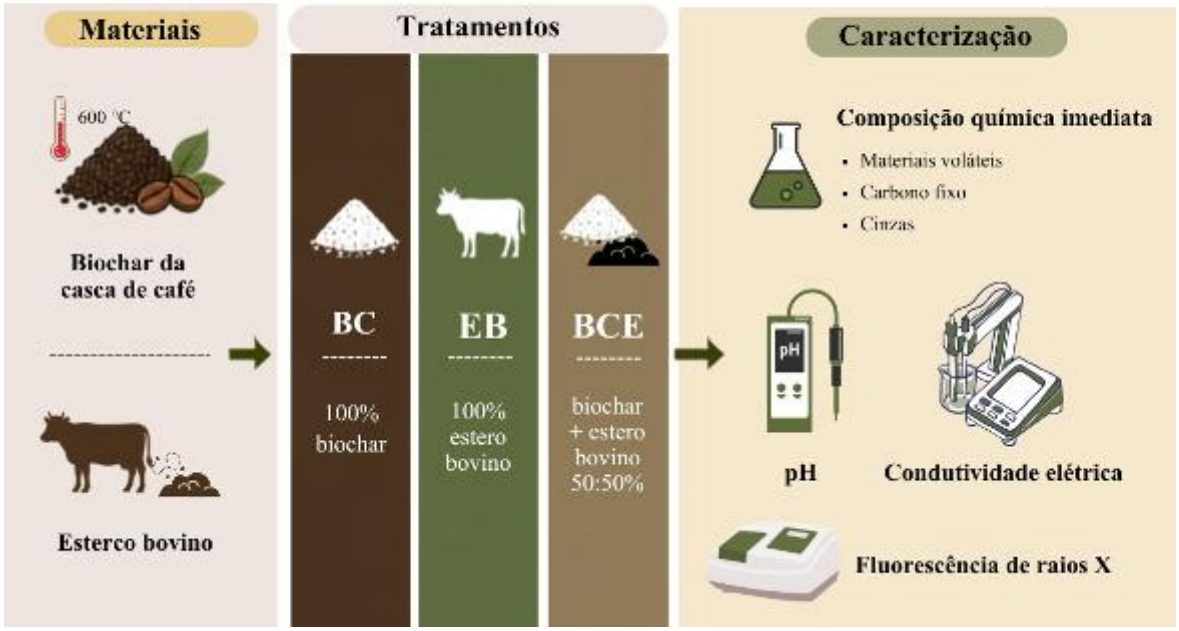
2. Material e métodos

Para este estudo foram utilizados o biochar da casca de café produzido a 600 °C e esterco bovino coletado no sul do estado do Espírito Santo. Foram realizadas a caracterização de três diferentes composições: biochar em 100% (BC), esterco bovino em 100% (EB) e biochar com esterco bovino em partes iguais, 50% cada (BCE).

Os teores de materiais voláteis, carbono fixo e cinzas do biochar, esterco bovino e da mistura de biochar com o esterco bovino, foram determinados por meio da norma D1762-84 (ASTM, 2021) utilizando amostras com granulometria de 40 e 60 mesh (0,250 mm). Para a determinação do pH, foram pesadas quatro gramas de cada material, homogeneizadas em 40 mL de água deionizada e submetidas à agitação mecânica por uma hora. Em seguida, o material foi filtrado em papel de filtro, e o pH foi determinado com auxílio de um pHmetro. A determinação da condutividade elétrica foi realizada preparando-se uma solução pela mistura de 0,5 g de amostra com 10 ml de água deionizada. A mistura foi submetida a agitação por 30 segundos, deixada em repouso e posteriormente foi realizada leitura da CE será efetuada utilizando um medidor de condutividade. Foi realizada análise multielementar por meio de espectroscopia de fluorescência de raios X (FRX), utilizando um espectrômetro.

Os dados foram submetidos ao teste de normalidade Shapiro-Wilk e à homogeneidade de variâncias pelo teste de Bartlett. Posteriormente, realizou-se análise de variância (ANOVA) em delineamento inteiramente casualizado. Quando observadas diferenças significativas pelo teste F ($p < 0,05$), as médias foram comparadas pelo teste de Tukey a 95% de probabilidade.

Figura 1. Esquema metodológico das etapas de preparo e caracterização dos diferentes tratamentos.

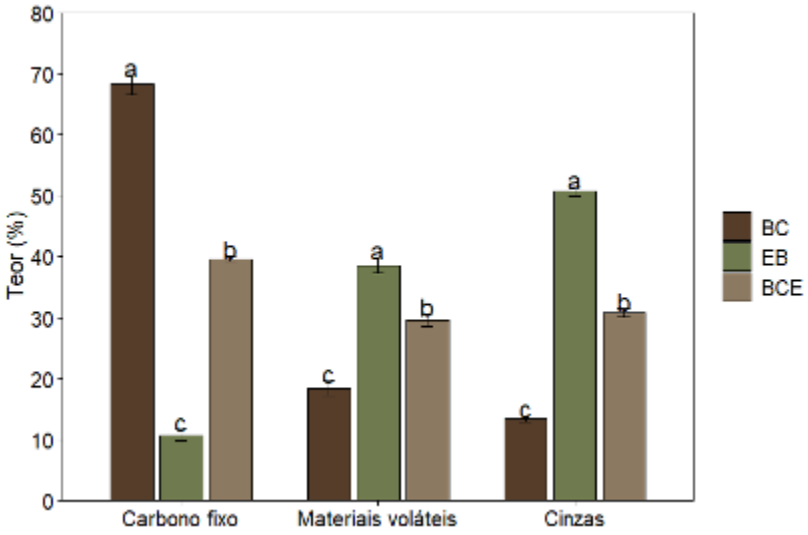


Em que: BC = biochar da casca de café; EB = esterco bovino; BCE = mistura de biochar com esterco bovino.

3. Resultados e discussão

Os resultados obtidos para os teores de carbono fixo, materiais voláteis e cinzas do biochar da casca de café (BC), esterco bovino (EB) e da mistura de biochar com esterco bovino (BCE), estão dispostos na Figura 2.

Figura 2: Composição química imediata do biochar, esterco bovino e da mistura de biochar com esterco bovino.



Médias seguida pela mesma letra não diferem entre si, a 5% de significância, pelo teste de Tukey.

O maior teor de carbono fixo é observado para o tratamento BC, com média em torno de 68%, seguido do tratamento BCE com média 39% e EB com média de aproximadamente 10%. Esse comportamento está atrelado ao processo de pirólise empregado na produção do biochar. Durante o tratamento térmico ocorre a degradação e a liberação de parte dos componentes voláteis da biomassa (Shin et al., 2023), enquanto as frações mais resistentes permanecem concentradas no material carbonizado. O maior teor de carbono fixo no biochar está relacionado à presença de estruturas carbonizadas mais estáveis, favorecendo sua permanência no solo e seu potencial de armazenamento de carbono (Shyam et al., 2025). Essa característica favorece o uso do material em projetos voltados à geração de créditos de carbono.

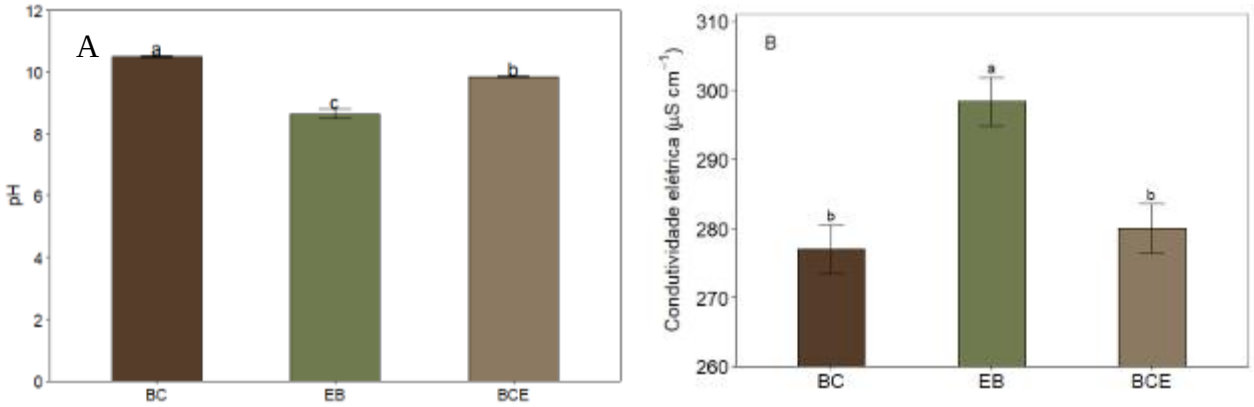
Maiores teores de materiais voláteis foram observados no tratamento EB (38%), seguido da BCE e do BC, com valores médios de aproximadamente 30% e 18%. O menor valor apresentado pelo BC é consequência da liberação de compostos voláteis durante a pirólise, onde o processo promove o aumento proporcional da fração de carbono fixo. No EB, por outro lado, a ausência de tratamento térmico mantém uma maior proporção de componentes orgânicos suscetíveis à decomposição térmica. Os resultados próximos ao obtido por Park et al. (2022) que encontraram teores médios de materiais voláteis de 56% para o esterco bovino. No solo, essa fração orgânica presente no esterco pode ser utilizada pelos microrganismos durante os processos de decomposição, contribuindo para a mineralização e para a liberação de nutrientes em um período mais curto (Ali et al., 2025). Essa característica torna o EB uma fonte de resposta mais imediata, principalmente em relação ao fornecimento de matéria orgânica e nutrientes. Entretanto, a rápida mineralização também pode reduzir a permanência do carbono incorporado e limitar a retenção dos nutrientes liberados, aumentando a possibilidade de perdas quando não existem mecanismos suficientes para mantê-los no sistema (Motsi et al., 2025). Dessa forma, a mistura de biochar e esterco bovino (BCE) pode unir a fração orgânica mais dinâmica do esterco com a fração carbonácea mais persistente do biochar, tornando um material mais completo para condicionamento de solos.

Em comportamento similar, maiores teores de cinzas foram observados para o tratamento EB próxima de 50%, indicando maior presença de fração mineral em sua composição. A mistura do biochar com o esterco bovino (BCE) obteve valor intermediário (30%), enquanto o BC apresentou o menor teor de cinzas (13%) em sua composição. Do ponto de vista agronômico, a elevada fração mineral presentes nas cinzas, contribui para o fornecimento de nutrientes do solo (Veiga et al., 2017). Além disso, a fração mineral pode

modificar propriedades como o pH (Villa-Parejo et al., 2025), que em condições alcalinas são favoráveis para aplicação em solos ácidos (Adetunji & Blanco-Canqui, 2026; Dai et al., 2020).

Foram observadas diferenças entre os três tratamentos, sendo o maior valor registrado para o BC, com média próxima de 10,5, seguido pelo BCE, com aproximadamente 9,8, e pelo EB, com cerca de 8,6 (Figura 3 – A).

Figura 3. pH e condutividade elétrica do biochar, esterco bovino e da cmistura de biochar com esterco bovino.



Médias seguida pela mesma letra não diferem entre si, a 5% de significância, pelo teste de Tukey.

Esses resultados são similares ao relatado por Hassan & Strezov (2025) e Canuto et al. (2019), que encontraram valores de pH em torno de 10,31. A casca de café presente no tratamento BC e BCE, apresenta elevada participação de compostos de potássio e cálcio em sua fração mineral (Chico-Proano et al., 2025), o que pode ter contribuído para o caráter alcalino do biochar produzido. A presença de cátions básicos e de compostos como óxidos, hidróxidos e carbonatos de K, Ca e Mg contribui para o caráter alcalino do biochar (Souza et al., 2023; Villa-Parejo et al., 2025).

Os resultados obtidos para condutividade elétrica (Figura 3 - B) indicam diferenças estatísticas para o tratamento EB, com valor médio de 298 µS cm^{-1}. A condutividade elétrica está relacionada à concentração de espécies iônicas solúveis presentes no material, sendo utilizada como um indicativo da quantidade de sais capazes de permanecer em solução (Adetunji & Blanco-Canqui, 2026). Dessa forma, a maior média observada para o EB (298 µS cm^{-1}) pode estar associada à sua elevada fração mineral, anteriormente evidenciada pelo teor de cinzas. Parte desses componentes pode ser solubilizada durante o contato com a água,

aumentando a presença de íons e, consequentemente, a capacidade da solução de conduzir corrente elétrica (Hassan & Strezov, 2025).

A composição multielementar do biochar (BC), do esterco bovino (EB) e da mistura de biochar com esterco bovino (BCE), determinada por fluorescência de raios X, está apresentada na Tabela 1.

Tabela 1: Composição multielementar do biochar, esterco bovino e da mistura de biochar com esterco bovino.

Tratamento	**Composição multielementar (%)**							
	P	**K**	**Fe**	**Mn**	**Zn**	**S**	**Cu**	**Cl**
BC	1,26	90,43	4,9	0,23	0,04	0,91	0,06	1,59
EB	2,60	30,77	17,12	0,83	0,28	2,27	0,06	4,92
BCE	1,59	54,26	12,73	0,61	0,17	1,45	0,06	3,13

Em que: P = Fósforo; K = Potássio; Fe = Ferro; Mn = Manganês; Zn = Zinco; S = Enxofre; Cu = Cobre; Cl = Cloro.

Foram identificados macro e micronutrientes de interesse para o condicionamento do solo, com diferenças na participação relativa dos elementos entre os tratamentos. O BC foi caracterizado principalmente pela elevada proporção de K, que pode ser explicada pelo fato de o mineral estar muito presente na casca de café. O tratamento EB apresentou composição mineral mais diversificada, com maiores teores de P, Fe, Mn, Zn, S e Cl. A composição do BCE apresentou proporções equilibradas entre os dois materiais que o compõe. Quando aplicado ao solo, o esterco pode favorecer o fornecimento mais imediato de nutrientes, em razão da presença de nutrientes prontamente disponíveis e da mineralização de sua fração orgânica (Ali et al., 2025; Motsi et al., 2025). Contudo, a liberação desses elementos deve ocorrer de forma compatível com a capacidade do solo de retê-los e com a absorção pelas plantas. Quando o fornecimento de nutrientes supera a capacidade de retenção e absorção do sistema solo/planta, a fração que permanece móvel pode ser transportada pela água, aumentando o risco de perdas por lixiviação ou escoamento (Rathi et al., 2026). Dessa forma, o tratamento BCE apresenta uma composição mais equilibrada que os materiais isolados, mantendo parte da estabilidade do biochar e incorporando as frações orgânica e mineral do esterco, o que amplia seu potencial de uso como condicionador do solo.

4. Conclusões

Os resultados indicam que o biochar, o esterco bovino e a mistura apresentam potencial para uso como condicionadores do solo, contribuindo também para o aproveitamento de resíduos agroindustriais e pecuários. O BC destacou-se pelo maior teor de carbono fixo, elevada alcalinidade e predominância de potássio, enquanto o EB apresentou maior fração mineral e maior diversidade de nutrientes. O BCE mostrou-se viável por combinar a estabilidade carbonácea do biochar com o fornecimento orgânico e mineral do esterco. Assim, o BC apresenta maior potencial para solos ácidos e pobres em K, o EB para solos de baixa fertilidade e reduzido teor de matéria orgânica, e o BCE para solos que necessitem simultaneamente de correção da acidez, aporte de carbono e maior diversidade de nutrientes.

5. Agradecimentos

Os autores agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação do Espírito Santo (FAPES) pelo apoio financeiro concedido para a execução deste estudo. Ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais da Universidade Federal do Espírito Santo (UFES) pelo suporte acadêmico e institucional. E ao Laboratório Multiusuário de Energia da Biomassa da UFES pela infraestrutura disponibilizada e pelo apoio técnico prestado ao longo da realização dos experimentos.

6. Referências bibliográficas

Adetunji, A. T., & Blanco-Canqui, H. (2026). Soil health response to biochar combined with other amendments: A review. Biochar, 8(1), 23. https://doi.org/10.1007/s42773-025-00531-6

Ali, L., Palamanit, A., Techato, K., Ullah, A., Chowdhury, M. S., & Phoungthong, K. (2022). Characteristics of biochars derived from the pyrolysis and co-pyrolysis of rubberwood sawdust and sewage sludge for further applications. Sustainability, 14(7), 3829. https://doi.org/10.3390/su14073829

Ali, N., Jiang, Q., Akhtar, K., Luo, R., Jiang, M., He, B., & Wen, R. (2025). Biochar and manure co-application improves soil health and rice productivity through microbial modulation. BMC Plant Biology, 25(1), 914. https://doi.org/10.1186/s12870-025-06834-x

Al-Rabaiai, A., Menezes-Blackburn, D., Al-Ismaily, S., Janke, R., Al-Alawi, A., Al-Kindi, M., & Bol, R. (2024). Biochar pH reduction using elemental sulfur and biological activation using compost or vermicompost. Bioresource Technology, 401, 130707. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2024.130707

Rathi, B, S., S, S., V, K., Sridhar, S., & S, V. K. (2026). Waste-to-value conversion: A comprehensive review on biochar production, modification, and remediation potential. Next Materials, 12, 102550. https://doi.org/10.1016/j.nxmate.2026.102550

Canuto, C., Andrade, D. da S., Lima, E. M. de, Goes, M. da C. C. de, Almeida, M. M. V. de, & Lima, J. R. de S. (2019). Biochar e esterco bovino aumentam a eficiência no uso de água da alface. Diversitas Journal, 4(3), 1082–1091. https://doi.org/10.17648/diversitas-journal-v4i3.822

Chico-Proano, A., Nicolalde, J. F., Boada, M., Bonilla, O., Riofrio, C., Cueva, J. A., Rodríguez-Clavijo, F., Bolaños-Belalcazar, J., Suárez-Beltrán, C., Maria, M. A., Diaz, H., & Martínez-Gómez, J. (2025). Biochar from waste coffee husk as a thermal conductivity enhancer in palm stearin BPCMs. Carbon Trends, 19, 100501. https://doi.org/10.1016/j.cartre.2025.100501

Dai, Y., Zheng, H., Jiang, Z., & Xing, B. (2020). Combined effects of biochar properties and soil conditions on plant growth: A meta-analysis. *Science of the Total Environment, 713*, 136635. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.136635

Souza, K. das G., Oliveira, M. A. de, Alcantara, G. U., Paulino, G. M., Lima, R. P. de, Ferreira, O. E., Bezerra, A. C. da S., Pimenta, L. P. S., & Machado, A. R. T. (2023). Effect of pyrolysis temperature on the properties of the coffee grounds biochar and composition of its leachates. *Chemical Papers, 77*(7), 3947–3956. https://doi.org/10.1007/s11696-023-02755-x

Hassan, M., & Strezov, V. (2025). Combined effect of biochar, manure and compost on canola growth, yield parameters and soil chemical properties. *Scientific Reports, 15*(1), 43338. https://doi.org/10.1038/s41598-025-27371-5

Kritikaki, A., Karmali, V., Vathi, D., Bartzas, G., & Komnitsas, K. (2025). Advanced characterization of biochars produced from three different organic-based feedstocks and their potential applications. *Circular Economy and Sustainability*, 1–24. https://doi.org/10.1007/s43615-025-00580-w

Kumar, S., Kumar, R., & Sindhu, S. S. (2026). Biochar and biofertilizers combined fertilization technology for modulating soil health, plant growth and environmental sustainability. *Total Environment Microbiology, 2*(2), 100083. https://doi.org/10.1016/j.temicr.2026.100083

Li, B., Li, M., Gao, W., Bi, M., Ma, L., Qin, Q., & Shu, C. M. (2020). Effects of particle size on the self-ignition behaviour of a coal dust layer on a hot plate. *Fuel, 260*, 116269. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.116269

Meng, Q., Ma, X., Zhang, J., & Yu, Z. (2019). The long-term effects of cattle manure application to agricultural soils as a natural-based solution to combat salinization. *Catena, 175*(4), 193–202. https://doi.org/10.1016/j.catena.2018.12.022

Monteiro de Oliveira, D., Cleber, J., Ferreira, C., Aoki, R. B., Paulo, N., & Falcão, S. (2022). Influência de resíduos de biocarvão e esterco bovino no desenvolvimento de mudas de faveira. *Research, Society and Development, 11*(16), e88111637855. https://doi.org/10.33448/rsd-v11i16.37855

Motsi, H., Phiri, E. E., & Mothapo, P. N. (2025). The effect of biochar and manure on soil physicochemical properties under the production of a biofuel crop. *Discover Soil, 2*(1), 107. https://doi.org/10.1007/s44378-025-00138-0

Park, J. E., Lee, G. B., Kim, H., & Hong, B. U. (2022). High surface area–activated carbon production from cow manure controlled by heat treatment conditions. *Processes, 10*(7), 1282. https://doi.org/10.3390/pr10071282

Rambhatla, N., Panicker, T. F., Mishra, R. K., Manjeshwar, S. K., & Sharma, A. (2025). Biomass pyrolysis for biochar production: Study of kinetics parameters and effect of temperature on biochar yield and its physicochemical properties. *Results in Engineering, 25*, 103679. https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.103679

Veiga, T. R. L. A., Lima, J. T., Dessimoni, A. L. de A., Pego, M. F. F., Soares, J. R., & Trugilho, P. F. (2017). Different plant biomass characterizations for biochar production. *Cerne*, *23*(4), 529–536. https://doi.org/10.1590/01047760201723042373

Villa-Parejo, J., Aguirre-Forero, S., Piraneque-Gambasica, N., & Cruz-O'Byrne, R. (2025). Enhancing soil properties and plant growth with coffee and oil palm biochar: A sustainable circular economy approach in agroindustry. *Industrial Crops and Products, 233*, 121491. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2025.121491

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Avaliação da durabilidade da madeira de *Azadirachta indica* A. Juss (Nim) em campo de apodrecimento

Laizy Nascimento dos Santos[1];Adson Thassio do Nascimento Cordeiro[2], Amanda Assunção Queirós[3]; Denys Santos de Souza[4]; Hevelly Ézia Camilo da Silva[5]; Igor Modesto Alves Varella Brasil[6]; Juliana Lorensi do Canto[7]; Tatiane Kelly Barbosa[8].

[1] Universidade Federal do Rio Grande do Norte
[2] Universidade Federal do Rio Grande do Norte

Resumo: A madeira é um recurso fundamental para a sociedade, sendo utilizada em diversas aplicações devido às suas propriedades tecnológicas. Entretanto, sua durabilidade natural frente a agentes biodeterioradores é variável entre espécies e constitui fator determinante para o desempenho em ambientes externos. Nesse contexto, o presente estudo teve como objetivo avaliar a durabilidade natural e tratada da madeira de *Azadirachta indica* em campo de apodrecimento, por meio de um experimento com duração de cinco anos, sendo este trabalho referente à primeira avaliação do material em campo. O ensaio foi realizado na Escola Agrícola de Jundiaí UFRN, município de Macaíba, RN, onde foram confeccionadas 30 estacas de nim, das quais 15 receberam tratamento preservativo com Arseniato de Cobre Cromatado (CCA) e 15 permaneceram sem tratamento. As estacas, com dimensões de 5,0 × 2,5 × 50,0 cm, foram parcialmente enterradas e avaliadas após seis meses de instalação do experimento. Os resultados evidenciaram diferenças no desempenho entre os grupos. As estacas sem tratamento apresentaram notas entre 7 e 10, com indícios iniciais de deterioração por fungos e cupins, sobretudo na região em contato com o solo. Em contrapartida, as estacas tratadas com CCA permaneceram estáveis, obtendo notas predominantemente iguais a 10, sem sinais de degradação. O nim enquadra-se preliminarmente na classe 3 de durabilidade (moderada). Conclui-se que, embora apresente resistência natural superior a algumas espécies tropicais, a madeira de nim demanda tratamento preservativo para aplicações externas de maior exigência, especialmente em contato direto com o solo.

Palavras-chave: Deterioração; Desempenho; Preservativo; CCA; Nim.

Durability evaluation of neem wood (Azadirachta Indica) in a graveyard test

Abstract: Wood is a fundamental resource for society, utilized in various applications due to its technological properties. However, its natural durability against biodeteriorating agents varies among species and is a determining factor for performance in outdoor environments. In this context, this study aimed to evaluate the natural and treated durability of *Azadirachta indica* (neem) wood in a field decay test. The trial was conducted at the Escola Agrícola de Jundiaí UFRN in the municipality of Macaíba, RN; 30 neem stakes were prepared, with 15 receiving a preservative treatment using Chromated Copper Arsenate (CCA) and 15 remaining untreated. The stakes, measuring 5.0 × 2.5 × 50.0 cm, were partially buried and evaluated six months after

the experiment began. The results revealed performance differences between the groups. Untreated stakes received scores ranging from 7 to 10, showing early signs of deterioration caused by fungi and termites, particularly in the area in contact with the soil. In contrast, CCA-treated stakes remained stable, predominantly scoring 10 with no signs of degradation. Neem is preliminarily classified as durability class 3 (moderate). It is concluded that, although it exhibits natural resistance superior to that of some tropical species, neem wood requires preservative treatment for more demanding outdoor applications, especially those involving direct soil contact.

Keywords: Deterioration; Performance; Preservative; CCA; Neem.

1. Introdução

A madeira é um material utilizado pelas civilizações desde os primórdios, desempenhando papel fundamental no desenvolvimento humano (HAMEDI et al., 2025). Seu uso consolidou-se ao longo do tempo devido às propriedades mecânicas favoráveis, à facilidade de manuseio, ao desempenho como isolante térmico, à resistência química e à ampla diversidade de espécies, cada uma com características singulares (ALMEIDA et al., 2013).

Entre suas propriedades, destaca-se a predisposição ao ataque de fungos xilófagos, especialmente os apodrecedores (PAES et al., 2013). Estes organismos são os principais responsáveis pela deterioração em habitats terrestres, utilizando as enzimas que segregam para metabolizar a celulose, a hemicelulose e a lignina da parede celular como fonte de energia (Aguiar, Ferraz, 2011) . No contexto de exposição ao solo, o nim está sujeito a três categorias principais de degradação: a podridão-branca, característica de folhosas, onde ocorre a decomposição tanto da holocelulose quanto da lignina; a podridão-parda, que consome preferencialmente os carboidratos, resultando em fraturas cúbicas; e a podridão-mole, que se desenvolve em condições de elevada umidade (Alonso et al., 2007).

A durabilidade natural constitui um dos principais fatores que influenciam a utilização de madeiras em países tropicais, como o Brasil, conferindo maior espectro de aplicações e valor comercial (TREVISAN, 2006). Independentemente da espécie ou do tipo de lenho, o ambiente florestal apresenta condições mais favoráveis à deterioração da madeira do que ambientes externos (MELO et al., 2010). A degradação tende a ser menos severa no cerne em comparação ao alburno, variando entre espécies e indivíduos (BOTELHO; SANTANA; ALVES, 2000).

Diante disso, o estudo da degradação da madeira exposta ao ar livre é essencial para compreender e orientar seu uso adequado (CORASSA, 2019). Ensaios de campo em contato com o solo permitem classificar a durabilidade das espécies e definir recomendações para aplicação em ambientes externos (TOMAZELI, 2016), sendo o acompanhamento das fases de degradação fundamental para otimizar desempenho e durabilidade natural (BATISTA, 2020; STANGERLIN, 2013).

Para aumentar a resistência, o tratamento com Arseniato de Cobre Cromatado (CCA) é amplamente utilizado, sendo aplicado sob pressão em autoclave e considerado eficiente e economicamente viável em comparação com outros métodos químicos, térmicos ou naturais (FERRARINI et al., 2016; KIMA; PARK, 2020). No Brasil, o CCA representa cerca de 80% do volume de madeira tratada, sem restrições quanto ao seu uso (BELIZÁRIO, 2023).

Dentre as espécies estudadas, destaca-se a *Azadirachta indica*, popularmente conhecida como nim, da família Meliaceae, caracterizada pelo rápido crescimento e pela ampla adaptação a diferentes condições edafoclimáticas. (CHOPRA; NAYAR; CHOPRA, 1956). Introduzida no Brasil na década de 1980 inicialmente para controle agrícola, a espécie passou a ser utilizada na arborização urbana e rural (VIEIRA et al., 2024). No que se refere a qualidade da superfície usinada da madeira é um fator crucial na indústria moveleira na *Azadirachta indica* apresenta secagem rápida e densidade classificada como média (SOUZA, 2024).

Entretanto, informações sobre a durabilidade e resistência da madeira de nim em condições de campo aberto ainda são escassas, o que reforça a necessidade de estudos experimentais para orientar seu uso sustentável e maximizar seu potencial econômico.

2. Material e métodos

2.1 Seleção das árvores

As árvores utilizadas neste estudo provêm de um povoamento na área experimental da Escola Agrícola de Jundiaí, localizada no município de Macaíba RN, pertencente à mesorregião Leste Potiguar e inserida no bioma Caatinga (IBGE, 2021). Foram selecionadas quinze árvores com idade de 7 anos, considerando critérios como troncos retilíneos, diâmetro à altura do peito (DAP), ausência de nós e bom estado fitossanitário.

2.2 Preparo dos corpos de prova

As árvores selecionadas foram cortadas com motosserra com 30cm da base, obtendo-se toras com comprimento de 1 metro, contendo apenas o alburno e descartando-se as extremidades. Em seguida, as toras foram transportadas para a marcenaria da Escola Agrícola

de Jundiaí, da UFRN, onde foram descascadas e secadas ao ar livre. As toras foram medidas em diâmetro, apresentando média de 8,5 cm, e separadas em dois grupos, sendo a metade para receber tratamento preservativo (CCA) e a outra metade para permanecer sem tratamento.

2.3 Processo de Impregnação de CCA sob Pressão

As toras destinadas ao tratamento foram levadas à Fazenda Futuro Verde, localizada no município de Ceará-Mirim RN, onde receberam o preservativo Arseniato de Cobre Cromatado (CCA) por meio do método de Célula Cheia (Processo Bethell), que é o procedimento padrão para impregnar a madeira com o máximo de preservativo possível, especialmente para aplicações em contato com o solo. Este método aplica um vácuo inicial com o objetivo de retirar o ar contido nas células da madeira, facilitando a entrada da solução preservativa.

A escolha deste processo deve-se ao fato de que as estacas foram destinadas a um campo de apodrecimento, onde a agressividade dos agentes biodeterioradores exige alta retenção e penetração profunda do produto químico no lenho.

2.4 Instalação do ensaio de campo

Sete dias após o tratamento, o ensaio foi composto por 30 corpos de prova (estacas) de nim *Azadirachta indica*. As estacas foram confeccionadas de acordo com a metodologia estabelecida pela IUFRO (*International Union of Forest Research Organizations*) e descrita por Lepage (1970). As estacas tinham as seguintes dimensões após secagem e corte das extremidades: 5,0 x 2,5 x 50,0 cm (radial x tangencial x longitudinal). Metade das estacas (15 unidades) foram confeccionadas a partir das toras que receberam tratamento com CCA, enquanto a outra metade foi confeccionada com as toras sem tratamento. Em dezembro de 2024, as estacas foram parcialmente enterradas (40 cm), em delineamento casualizado, distribuídas em seis linhas com cinco unidades cada, mantendo espaçamento de 3,0 m entre linhas e 1,0 m entre estacas dentro das linhas, conforme metodologia de Araújo (2012).

2.5 Procedimento de coleta de dados

A classificação foi baseada no método da *International Union of Forest Research Organizations* (IUFRO), descrito por Lepage (1970). E esse estudo tem duração estimada de 5 anos, com avaliação anual. A primeira análise foi realizada em junho de 2025 por inspeção visual de cada estaca, retirando-os do solo e atribuindo notas de 0 a 10 de acordo com o nível de deterioração da madeira em suas diferentes partes.

3. Resultados e discussão

A primeira avaliação permitiu identificar diferenças no comportamento da madeira de *Azadirachta indica* em campo de apodrecimento, tanto no grupo tratado com CCA quanto no grupo sem tratamento. Os resultados obtidos encontram-se apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 – Avaliação da durabilidade da madeira não tratadas

Teste de durabilidade em Campo de Apodrecimento	
Escola Agrícola de Jundiaí - UFRN	
Espécie	**Avaliações (notas)**
Nim (neem) *Azadirachta indica*	**2025**
10	**10**
12	**9**
14	**10**
1	**9**
15	**10**
2	**10**
11	**10**
4	**10**
5	**7**
6	**10**
13	**9**
3	**7**
7	**9**
8	**10**
9	**9**

Tabela 2: Avaliação da durabilidade madeira tratada

Teste de durabilidade em Campo de Apodrecimento	
Escola Agrícola de Jundiaí - UFRN	
Espécie	**Avaliações (notas)**
Nim (neem) *Azadirachta indica*	**2025**
14T	**10**
12T	**10**
6T	**9**
7T	**9**
15T	**10**
5T	**10**
2T	**10**
1T	**10**
4T	**9**
8T	**10**
9T	**10**
13T	**10**
10T	**10**
3T	**10**
11T	**10**

Nas madeiras sem tratamento as notas variaram entre 7 e 10, com a predominância de 9 e 10. Houve duas estacas com avaliação de 7, ou seja, 13% do total, já apresentando sinais iniciais de deterioração. Indica que, em apenas 6 meses, a madeira de Nim sem preservativo começou a ser atacada por agentes biodeterioradores (fungos e cupins), principalmente na região em contato com o solo. Entretanto 87% das estacas tiveram boas notas de resistência.

Nas madeiras tratadas com CCA, 12 estacas receberam nota 10, sem nenhum indício de deterioração e 3 estacas receberam nota 9. O tratamento com preservativo com CCA foi eficaz em garantir resistência e durabilidade das estacas até a primeira avaliação.

Ao comparar os resultados obtidos com estudos prévios, observa-se que o Nim apresenta desempenho satisfatório mesmo sem tratamento (Paes et al., 2012). Em ensaios de deterioração conduzidos em ambiente florestal semelhantes quanto a temperatura e idade, *Azadirachta indica* obteve nota média 8,0, sendo classificada como de deterioração leve a moderada e superando espécies como *Tectona*

grandis (5,8) e *Bagassa guianensis* (4,9) (DIAS JÚNIOR et al., 2018). Esses achados reforçam que o Nim possui durabilidade natural superior à de muitas espécies tropicais, embora, em condições mais agressivas como o campo de apodrecimento, apresente sinais de degradação em menor intervalo de tempo.

De acordo com a classificação da IUFRO (LEPAGE, 1970), o desempenho da madeira de *Azadirachta indica* no presente estudo indica enquadramento preliminar na classe 3 de durabilidade (moderada), o que reforça sua resistência natural considerável, mas limitada em condições de contato direto com o solo. O padrão de deterioração observado foi discreto, porém já perceptível nas estacas sem tratamento, sobretudo na região ao nível do solo, reconhecida como a mais vulnerável à ação de fungos e cupins, que ao final do experimento serão identificados. Dessa forma, a madeira de *Azadirachta indica* apresenta potencial de uso externo sem tratamento, ao longo de seis meses; contudo, a aplicação de preservativos, como o CCA, é indispensável para aumentar sua durabilidade e assegurar desempenho satisfatório em contato com o solo.

4. Conclusões

A avaliação evidenciou poucas diferenças entre os corpos de prova tratados e não tratados de *Azadirachta indica* aos seis meses em campo. Esses resultados demonstram que, embora a madeira de nim possui certa resistência natural, sua durabilidade em condições de campo é limitada quando não submetida a tratamento preservativo. O uso de CCA mostrou-se eficaz em proporcionar proteção no primeiro período de seis meses, garantindo maior potencial de utilização da espécie em aplicações externas. Avaliações subsequentes a cada ano durante 5 anos permitirão confirmar a progressão da deterioração e consolidar as inferências quanto à eficiência do tratamento e à durabilidade natural da madeira.

5. Agradecimentos

À Universidade Federal do Rio Grande do Norte, pelo suporte acadêmico e estrutural disponibilizado para a realização deste trabalho.

À Pró-Reitoria de Pesquisa da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, pelo incentivo à pesquisa e apoio concedido ao desenvolvimento das atividades científicas.

6. Referências bibliográficas

Aguiar, A., & Ferraz, A. (2011). Mecanismos envolvidos na biodegradação de materiais lignocelulósicos e aplicações tecnológicas correlatas. *Química Nova, 34*(10), 1729–1738. https://doi.org/10.1590/S0100-40422011001000006

Almeida, D. H. de, Scaliante, R. de M., Macedo, L. B. de, Macêdo, A. N., Dias, A. A., Christoforo, A. L., & Calil Júnior, C. (2013). Caracterização completa da madeira da espécie amazônica Paricá (*Schizolobium amazonicum* Herb) em peças de dimensões estruturais. *Revista Árvore, 37*(6), 1175–1181. https://doi.org/10.1590/S0100-67622013000600019

Alonso, S. K. de, Silva, A. G. da, Kasuya, M. C. M., Barros, N. F. de, Cavallazzi, J. R. P., Bettucci, L., Lupo, S., & Alfenas, A. C. (2007). Isolamento e seleção de fungos causadores da podridão-branca da madeira em florestas de *Eucalyptus* spp. com potencial de degradação de cepas e raízes. *Revista Árvore, 31*(1), 145–155. https://doi.org/10.1590/S0100-67622007000100016

APRILE, H. et al. (1999). Propriedades da madeira e suas aplicações. Editora Universitária.

BATISTA, M. F. (2020). Estudo da degradação da madeira em ambientes externos. Revista Brasileira de Ciências Florestais, 40(1), 25-34.

BELIZÁRIO, L. (2023). Uso de preservativos na madeira: o caso do CCA. Editora Ambiental.

BOTELHO, R. A.; SANTANA, F. A.; ALVES, M. A. (2000). Análise da deterioração da madeira em diferentes condições ambientais. Floresta e Ambiente, 7(3), 45-52.

CHOPRA, R. N.; NAYAR, S. L.; CHOPRA, I. C. (1956). Glossário de plantas medicinais. Editora Científica.

CORASSA, M. (2019). Impacto ambiental da degradação da madeira. Editora Florestal.

DA SILVA NETO, J. A. et al. (2020). Potencial terapêutico de plantas exóticas. Revista Brasileira de Farmacognosia, 31(2), 112-118.

DIAS JÚNIOR, A. F. et al. (2018). CARACTERIZAÇÃO DA MADEIRA DE QUATRO ESPÉCIES FLORESTAIS PARA USO EM MOVELARIA. Floresta e Ambiente, 25(4), 1-12.

FERRARINI, M. A. et al. (2016). Tratamento de madeira com CCA: eficácia e viabilidade econômica. Revista Brasileira de Tecnologia, 45(2), 67-74.

IBGE. (2021). Biomas e domínios do Brasil. IBGE.

Hamedi, M. M., Sandberg, M., Olsson, R. T., Pedersen, J., Benselfelt, T., & Wohlert, J. (2025). Wood and Cellulose: the Most Sustainable Advanced Materials for Past, Present, and Future Civilizations. *Advanced materials (Deerfield Beach, Fla.), 37*(22), e2415787. https://doi.org/10.1002/adma.202415787

KIMA, S.; PARK, K. (2020). Métodos alternativos de preservação de madeira. Journal of Wood Science, 66(5), 123-130.

MENDES, J. A.; ALVES, M. A. (1988). Durabilidade natural da madeira em regiões tropicais. Revista Brasileira de Ciências Florestais, 5(1), 15-22.

MELO, J. A. et al. (2010). Influência do ambiente na deterioração da madeira. Floresta e Ambiente, 10(4), 89-95.

NEEM FOUNDATION. (2023). Neem: economic potential and applications. Neem Foundation. https://www.neemfoundation.org/neem-economia

Paes, J. B., Souza, A. D. de, Lima, C. R. de, & Souza, P. F. de. (2012). Eficiência dos óleos de nim (*Azadirachta indica* A. Juss.) e mamona (*Ricinus communis* L.) na resistência da madeira de sumaúma (*Ceiba pentandra* (L.) Gaerth.) a fungos xilófagos em simuladores de campo. *Ciência Florestal*, *22*(3), 617–624. https://doi.org/10.5902/198050986627

SOUZA, V. V. S. (2024). Comparação da qualidade da superfície usinada da madeira entre duas unidades de beneficiamento (Monografia de graduação). Universidade Federal de Sergipe.

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Avaliação da qualidade da madeira de clones de *Eucalyptus* spp. visando à produção de polpa celulósica kraft

Samira Souza de Moura[1]; Ana Márcia Macedo Ladeira Carvalho[1]; Paulo Eduardo Botelho Meira[1];

[1] Universidade Federal de Viçosa

Resumo: A crescente demanda por matéria-prima de elevada qualidade para a indústria de polpa celulósica impulsiona a seleção de materiais genéticos com propriedades tecnológicas adequadas. Este estudo avaliou a qualidade da madeira de três clones de *Eucalyptus* spp. por meio da caracterização química, determinação da densidade básica e análise da morfologia das fibras para produção de polpa kraft. Foram determinados os teores de extrativos, carboidratos estruturais, celulose, hemiceluloses, densidade básica e dimensões das fibras. Os resultados evidenciaram diferenças significativas apenas nos teores de extrativos e xilose, enquanto celulose, hemiceluloses e densidade básica não diferiram entre os clones. As fibras apresentaram características compatíveis com a produção de polpa de fibra curta, destacando-se o Clone B pelo menor *coarseness* e maior comprimento de fibras. Conclui-se que os três clones apresentam potencial para o processo kraft, sendo o Clone B o mais promissor devido ao menor teor de xilose e às propriedades anatômicas observadas.

Palavras-chave: Caracterização Tecnológica; Fibras Lignocelulósicas; Propriedades Anatômicas.

Wood Quality Assessment of Eucalyptus spp. Clones for Kraft Pulp Production

Abstract: The growing demand for high-quality raw materials for the pulp industry has driven the selection of genetic materials with suitable technological properties. This study evaluated the wood quality of three *Eucalyptus* spp. clones through chemical characterization, determination of basic density, and analysis of fiber morphology for kraft pulp production. The contents of acetone extractives, structural carbohydrates, cellulose, hemicelluloses, basic density, and fiber dimensions were determined. The results revealed significant differences only in extractives and xylose contents, whereas cellulose, hemicelluloses, and basic density did not differ among the clones. The fibers exhibited characteristics compatible with short-fiber pulp production, with Clone B standing out due to its lower *coarseness* and greater fiber length. It was concluded that all three clones have potential for the kraft process, with Clone B being the most promising because of its lower xylose content and favorable anatomical properties.

Keywords: Technological Characterization; Lignocellulosic Fibers; Anatomical Properties.

1. Introdução

O Brasil ocupa posição de destaque na produção mundial de polpa celulósica kraft de fibra curta, tendo o gênero *Eucalyptus* como principal matéria-prima devido ao seu

rápido crescimento, elevada produtividade florestal e características tecnológicas favoráveis ao processo de polpação (IBÁ, 2025). A competitividade do setor tem impulsionado programas de melhoramento genético voltados ao desenvolvimento de clones com maior produtividade e melhor qualidade da madeira para atender às exigências da indústria de polpa celulósica.

A qualidade da madeira destinada à produção de polpa kraft é determinada pela interação entre suas propriedades químicas, físicas e anatômicas (Ramos *et al*., 2024). A composição química exerce influência direta sobre o rendimento do processo e o consumo de reagentes, sendo desejáveis elevados teores de celulose e baixos conteúdos de extrativos e hemiceluloses (Wang *et al*., 2024). Ramos *et al*. (2024) ainda afirmam que a densidade básica, por sua vez, está relacionada à produtividade volumétrica, ao consumo específico de madeira e às condições operacionais da fábrica, enquanto as características morfológicas das fibras influenciam o desempenho da polpa e as propriedades físicas e mecânicas dos papéis produzidos.

Entre as propriedades anatômicas, o comprimento, a largura, o diâmetro do lume, a espessura da parede celular e o coarseness constituem importantes indicadores da qualidade das fibras para a produção de polpa celulósica, uma vez que afetam a flexibilidade das fibras, o grau de colapso durante a formação da folha e, consequentemente, as propriedades de resistência do papel (Çiçekler & Tutuş, 2026). Dessa forma, a avaliação integrada dessas características, associada à composição química e à densidade básica da madeira, fornece uma base mais consistente para a seleção de materiais genéticos destinados à produção de polpa kraft.

Nesse contexto, este trabalho teve como objetivo avaliar a qualidade da madeira de três clones de *Eucalyptus* spp., por meio da caracterização química, da determinação da densidade básica e da análise da morfologia das fibras, visando à identificação de materiais com maior potencial para a produção de polpa celulósica kraft.

2. Material e métodos

2.1 Material

A madeira utilizada neste estudo foi proveniente de três clones de Eucalyptus spp., cedidos por uma empresa brasileira produtora de polpa celulósica. Para cada clone, foram selecionadas cinco árvores representativas do plantio comercial, das quais foram retirados cinco discos ao longo do fuste, correspondentes às posições de 0, 25, 50, 75 e 100% da altura

comercial. A posição de 100% correspondeu ao ponto do fuste com diâmetro de 8 cm. Os discos foram destinados à preparação das amostras para a caracterização química da madeira.

2.2 Métodos

De cada disco foram retiradas duas cunhas diametralmente opostas. As cunhas provenientes dos cinco discos de cada árvore foram transformadas em cavacos, os quais foram posteriormente misturados para obtenção de uma amostra composta representativa de cada árvore. Em seguida, os cavacos foram armazenados em ambiente coberto e ventilado até a estabilização do teor de umidade e acondicionados em sacos de polietileno para posterior processamento.

Posteriormente, os cavacos foram moídos em moinho de facas tipo Willey e a serragem obtida foi homogeneizada. Para cada clone, realizou-se o quarteamento sucessivo da serragem até a obtenção de aproximadamente 200 g de amostra representativa. A serragem foi classificada conforme o procedimento descrito na norma TAPPI T257 cm-85, sendo utilizada nas análises a fração que passou pela peneira de 40 mesh e ficou retida na peneira de 60 mesh.

O teor de extrativos solúveis em acetona foi determinado de acordo com a norma TAPPI T204 cm-17. Os teores de glicanas, xilanas, mananas, arabinanas e galactanas foram determinados conforme o procedimento estabelecido pela norma SCAN-CM 71:09

O teor de celulose foi estimado a partir do conteúdo de glicanas, enquanto o teor de hemiceluloses foi obtido pela soma dos teores de xilanas, mananas, arabinanas e galactanas, considerando ainda as correções referentes aos grupos acetil (2,9%) e aos ácidos urônicos (4,1%), conforme metodologia proposta por Gomide *et al*. (2005), a partir da composição dos carboidratos estruturais determinados por cromatografia de iônica (IC).

A densidade básica da madeira foi determinada de acordo com a norma ABNT NBR 14984 (2003), utilizando-se o método do máximo teor de umidade.

A caracterização morfológica das fibras foi realizada em analisador de fibras Fiber Image Analyzer FS5 (Valmet®). As amostras foram previamente individualizadas e dispersas em suspensão aquosa para análise automática pelo equipamento. Foram

determinados o comprimento, a largura, o diâmetro do lume, a espessura da parede celular e o coarseness das fibras.

O experimento foi conduzido em delineamento inteiramente casualizado, sendo avaliados três clones de *Eucalyptus* spp. As médias foram submetidas à análise de variância (ANOVA) e comparadas pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade, utilizando-se o software R.

3. Resultados e discussão

Os resultados da caracterização química dos três clones de *Eucalyptus* spp. encontram-se apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 – Composição química da madeira de clones de Eucalyptus spp. destinados à produção de polpa celulósica kraft .

Amostras	Extrativos em acetona (%)	Arabinose (%)	Galactose (%)	Glicose (%)	Xilose (%)	Manose (%)	Celulose (%)	Hemiceluloses (%)
Clone A	1,68 b	0,05 a	0,70 a	47,05 a	10,90 a	0,0 a	47,05 a	11,65 a
Clone B	1,71 b	0,10 a	0,80 a	47,40 a	10,60 b	0,0 a	47,40 a	11,50 a
Clone C	2,85 a	0,10 a	0,80 a	47,55 a	10,70 ab	0,0 a	47,55 a	11,60 a

Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Os teores de extrativos em acetona variaram entre 1,68 e 2,85%, sendo observada diferença significativa entre os clones ($p < 0,05$). O Clone C apresentou o maior teor de extrativos (2,85%), enquanto os Clones A e B apresentaram valores estatisticamente inferiores e semelhantes entre si . Para os carboidratos estruturais, apenas os teores de xilose diferiram significativamente entre os materiais avaliados, variando de 10,60 a 10,90%, sendo o menor valor observado para o Clone B. Não foram verificadas diferenças estatísticas para os teores de arabinose, galactose, glicose, celulose e hemiceluloses entre os clones.

Os teores de extrativos em acetona variaram entre 1,68 e 2,85%, com diferença significativa entre os clones ($p < 0,05$). O Clone C apresentou o maior teor de extrativos (2,85%), diferindo significativamente dos Clones A e B, que apresentaram valores estatisticamente semelhantes entre si. Os baixos teores de extrativos observados nos três clones são desejáveis para a produção de polpa kraft, uma vez que esses constituintes podem aumentar o consumo de reagentes químicos, favorecer a formação de depósitos (pitch) e reduzir a eficiência do processo industrial (Mboowa, 2024). Embora o Clone C tenha apresentado teor de extrativos significativamente superior aos demais, os valores

permaneceram dentro da faixa reportada para madeiras de *Eucalyptus* destinadas à produção de polpa celulósica (dos Santos *et al*., 2025).

A concentração de arabinose variou entre 0,05 e 0,10%, e a de galactose entre 0,70 e 0,80%. Para esses monossacarídeos, os clones não apresentaram diferenças significativas ($p > 0,05$), sugerindo uma composição semelhante dessas frações nos materiais avaliados. A escassa presença de arabinose e galactose na composição dos clones é coerente com o perfil de carboidratos que geralmente se observa em madeiras de *Eucalyptus*, onde a maior parte das hemiceluloses é formada por xilanas e arabinose e as galactose estão presentes em menores quantidades (Aniza et al., 2026). Essa composição é importante para a polpação kraft, pois a estrutura e a proporção dos vários polissacarídeos determinam a estabilidade deles durante o cozimento alcalino.

Os conteúdos de glicose obtidos nesta pesquisa, que foram de 47,05, 47,40 e 47,55% para os Clones A, B e C, respectivamente, não mostraram diferenças significativas entre os materiais ($p > 0,05$). A estreita faixa de variação (0,50 ponto percentual) mostra que os clones são bastante semelhantes em relação a esse caráter. Em virtude de a glicose ser a principal fração dos carboidratos estruturais da madeira e ter uma relação direta com a celulose, sua alta concentração favorece a obtenção de polpa celulósica. Altos teores de glicose também foram encontrados em madeiras de clones de *Eucalyptus* voltadas para a produção de polpa, o que evidencia ainda mais o potencial dos materiais analisados para essa finalidade (dos Santos et al., 2025).

Em relação aos teores de xilose, os clones mostraram diferenças significativas ($p < 0,05$), com o Clone A apresentando 10,90%, o Clone B com 10,60% e o Clone C com 10,70%. O Clone B teve o menor teor, por outro lado o Clone A teve o maior, sendo o Clone C estatisticamente no meio. A xilose é a principal unidade estrutural das xilanas que se encontram nas madeiras de *Eucalyptus*, e sua quantidade pode afetar a retenção de hemiceluloses durante o processo de polpação, o que, por sua vez, impacta o rendimento e as propriedades da polpa (Loaiza et al., 2026). Portanto, as diferenças que surgem entre os clones sugerem uma leve alteração na composição dessa fração, mesmo com os valores sendo bem próximos.

A concentração de manose foi zero em todos os três clones, e por isso não houve diferença significativa entre os materiais. Conforme o que foi abordado, a falta ou presença mínima de manose é compatível com madeiras de folhosas, onde as glucomananas constituem uma fração menor das hemiceluloses em comparação às xilanas. Dessa maneira, esse

componente teve uma contribuição limitada para a distinção química entre os clones analisados (Aniza et al., 2026).

A porcentagem de celulose variou de 47,05 a 47,55%, sem diferenças significativas entre os clones ($p > 0,05$). A ligeira diferença encontrada entre os materiais demonstra que eles se comportam de forma semelhante no que se refere à fração estrutural mais importante para a obtenção de polpa celulósica. Os resultados estão alinhados com aqueles observados em clones de *Eucalyptus* voltados para a produção de celulose, onde a glicose é a principal fração dos carboidratos estruturais (dos Santos et al., 2025). Essa alta proporção de celulose, junto com os baixos níveis de extrativos, torna esses materiais bastante adequados para a produção de polpa kraft.

A porcentagem de hemiceluloses variou entre 11,50 e 11,65%, sem diferenças significativas entre os clones ($p > 0,05$). A ligeira variação entre os materiais sugere uma composição uniforme dessa fração. As hemiceluloses se comportam de forma diferente da celulose durante o processo de polpação alcalina, sendo que podem ser parcialmente solubilizadas durante o cozimento kraft (Loaiza et al., 2026). Então, apesar dos clones terem apresentado valores estatisticamente equivalentes, a composição das hemiceluloses, principalmente a proporção de xilanas, é um fator a ser levado em conta na análise do desempenho da madeira na polpação.

Na Tabela 2 estão apresentados os valores da densidade básica e das características morfológicas das fibras dos clones de *Eucalyptus* spp.

Tabela 2 – Densidade básica e características morfológicas das fibras dos clones de Eucalyptus spp.

Amostras	Densidade básica (Kg/m^3)	Comprimento de Fibra (mm)	Largura de Fibra (µm)	Espessura de parede (µm)	Diâmetro de Lume (µm)	Coarseness (mg/m)
Clone A	463a	0,804	17,47	2.34	12,79	0,059
Clone B	454a	0,912	16,21	2.18	10,61	0,041
Clone C	462a	0,923	18,01	3,01	11,99	0,050

Para a propriedade de densidade básica não foram observadas diferenças estatísticas entre os clones avaliados. Os valores variaram de 454 a 463 kg m^{-3}, sendo classificados como de densidade básica intermediária para madeiras destinadas à produção de polpa celulósica. Para esse tipo de aplicação, são geralmente preferidas madeiras com densidade básica entre

400 e 550Kg/m^3, pois podem proporcionar maior produtividade volumétrica sem comprometer a impregnação dos cavacos pelo licor de cozimento. Valores próximos aos observados neste estudo são frequentemente reportados para clones comerciais de *Eucalyptus* destinados à produção de celulose, situando-se na faixa considerada adequada para o processamento industrial (Ramos *et al*., 2024; Arantes *et al*., 2025).

Além da influência sobre a produtividade florestal, a densidade básica está diretamente relacionada ao consumo específico de madeira por tonelada de polpa produzida (Ramos *et al*., 2024). Dessa forma, considerando a ausência de diferença estatística e a pequena amplitude de variação observada entre os clones, é possível inferir que os materiais apresentam potencial semelhante quanto ao consumo específico de madeira, embora essa característica também seja influenciada pelo rendimento da polpação e pelas condições do processo.

Embora não tenha sido realizada análise estatística para as características morfológicas, observa-se que os três clones apresentam dimensões típicas de fibras de *Eucalyptus* utilizadas na fabricação de polpas de fibra curta (Çiçekler & Tutuş, 2026). O comprimento médio das fibras variou de 0,804 mm no Clone A a 0,923 mm no Clone C, enquanto a largura variou de 16,21 a 18,01 µm. O Clone C apresentou também a maior espessura de parede (3,01 µm), enquanto o Clone A apresentou o maior diâmetro de lume (12,79 µm). Essas características podem influenciar o comportamento das fibras durante o refino e a formação da folha, refletindo-se nas propriedades do papel.

O maior diâmetro de lume observado no Clone A pode estar associado a fibras potencialmente mais flexíveis e com maior capacidade de colapso durante a formação da folha, característica que pode favorecer a consolidação da estrutura fibrosa e o desenvolvimento das ligações interfibras (Wang et al., 2024). Por outro lado, a maior espessura de parede observada no Clone C sugere fibras relativamente mais rígidas, enquanto o Clone B apresentou o menor valor de *coarseness* (0,041 mg m^{-1}), indicando fibras mais leves e maior número de fibras por unidade de massa de polpa. Essa característica pode favorecer a formação da folha e o desenvolvimento das ligações interfibras, contribuindo para melhores propriedades de resistência à tração e ao arrebentamento (Uddin *et al*., 2024; Wang *et al*., 2024). O Clone A apresentou o maior *coarseness* (0,059 mg m^{-1}), indicando maior massa linear das fibras, característica que pode favorecer propriedades como a resistência ao rasgo, dependendo das condições de refino e do produto final (Manfredi, 2024).

4. Conclusões

A caracterização da madeira dos três clones de *Eucalyptus* spp indicou potencial para produção de polpa celulósica kraft. Os teores de celulose e hemiceluloses e a densidade básica não diferiram significativamente entre os clones, enquanto foram observadas diferenças nos teores de extrativos em acetona e xilose. O Clone C apresentou o maior teor de extrativos e o Clone B menor teor de xilose.

As características morfológicas das fibras apresentaram valores compatíveis com madeiras de *Eucalyptus* destinadas à produção de polpa celulósica. O Clone B destacou-se pelo menor coarseness, enquanto o Clone C apresentou o maior comprimento médio das fibras. De modo geral, o Clone B apresentou um conjunto de características químicas e morfológicas potencialmente favorável à produção de polpa celulósica, embora estudos de polpação sejam necessários para confirmar seu desempenho tecnológico.

5. Agradecimentos

Os autores agradecem à LD Celulose pelo fornecimento do material para o desenvolvimento da pesquisa, CNPq, à EMBRAPII e à FAPEMIG pelo apoio financeiro. Agradecem, ainda, ao Departamento de Engenharia Florestal/UFV, aos Laboratórios LPM, LAPEM e LCP, bem como à Fundação SIF, pelo suporte técnico e infraestrutura disponibilizada.

Referências bibliográficas

Arantes, B. S., de Souza, A. J., da Silva, R. G. C., de Souza, I. C. G., dos Santos, V. B., Nunes, S. M. V., ... & Vidaurre, G. B. (2025). Impact of determination method and sample type on basic wood density analysis and its implications for *Eucalyptus* pulp production. *Holzforschung*, *79*(11), 612–626.

Çiçekler, M., & Tutuş, A. (2026). *Paper 2.0: Five alternative pathways for producing pulp without cutting trees*. In *Proceedings of the 7th International Conference on Trends in Advanced Research* (Konya, Turkey, June 26–27, 2026).

Gomide, J. L., Colodette, J. L., Oliveira, R. C., & Silva, C. M. (2005). Caracterização tecnológica para produção de celulose da nova geração de clones de *Eucalyptus* do Brasil. *Revista Árvore*, *29*(1), 129–137.

Indústria Brasileira de Árvores. (2025). *Relatório anual 2025: O setor de árvores cultivadas como potência econômica, ambiental e social do Brasil*. https://iba.org

Manfredi, V. (2024). The pulps (fibers) characteristics. In *Eucalyptus kraft pulp refining* (pp. 59–89). Springer Nature Switzerland.

Mboowa, D. (2024). A review of the traditional pulping methods and the recent improvements in the pulping processes. *Biomass Conversion and Biorefinery*, *14*(1), 1–12.

Loaiza, J., García, M., Lozano-Calvo, S., Fernández, M., García, J., & López, F. (2026). Effect of cold alkaline extraction in obtaining hemicelluloses and cellulose from high-yield forest species (*Ulmus minor*). *Journal of Wood Science*.

Ramos, R. D., Longue Junior, D., Gomes, F. J. B., & Medeiros, N. C. G. D. (2024). Influence of basic density and chemical composition of wood for the pulp industry: A case study. *Ciência Florestal, 34*, e85566.

Scandinavian Pulp, Paper and Board Testing Committee. (2009). SCAN-CM 71:09: Carbohydrate composition by high-performance anion-exchange chromatography with pulsed amperometric detection (HPAEC-PAD). SCAN.

Technical Association of the Pulp and Paper Industry. (1985). TAPPI T257 cm-85: Sampling and preparing wood for analysis. TAPPI Press.

Technical Association of the Pulp and Paper Industry. (2017). TAPPI T204 cm-17: Solvent extractives of wood and pulp. TAPPI Press.

Uddin, M. N., Likhon, M. N. A., Rahman, M. M., & Jahan, M. S. (2024). Effect of fibre-quality parameters on pulp properties by using multiple linear regression and artificial neural network. *International Wood Products Journal, 15*(2–4), 91–99.

Wang, L., Li, G., Chen, X., Yang, Y., Liew, R. K., Abo-Dief, H. M., & Li, H. (2024). Extraction strategies for lignin, cellulose, and hemicellulose to obtain valuable products from biomass. *Advanced Composites and Hybrid Materials, 7*(6), 219.

Wang, P., Han, J., Wang, S., & Guo, Y. (2024). Mechanical behavior of flexible fiber assemblies: Review and future perspectives. *Materials, 17*(24), 6042.

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Avaliação da qualidade madeira de *Dialium guianense* para uso como dormentes em relação à norma ABNT NBR 7511 (2026)

Laura Menezes Corrêa[1]; William Colatino Martins[1]; Ana Júlia Alves Pereira[1]; Davi Bueno Araujo[1]; Isabelle Silveira Martins Honorato[1]; Davi Ferreira Castro Cabral[1]; Marcos Oliveira de Paula[1]; Vinícius Resende de Castro[1]

[1] Universidade Federal de Viçosa

Resumo: A recente atualização da ABNT NBR 7511:2026 definiu critérios mais modernos para classificar e qualificar madeiras usadas como dormentes ferroviários, reforçando a importância de caracterizar espécies tropicais ainda pouco estudadas para essa finalidade. Este trabalho avaliou a qualidade da madeira de *Dialium guianense* (Aubl.) Sandwith e seu potencial para uso como dormente ferroviário. Os corpos de prova foram confeccionados conforme a ABNT NBR 7511:2026 e ensaiados em máquina de ensaio universal. Foram realizados ensaios de compressão paralela às fibras, módulo de elasticidade (MOE), módulo de ruptura (MOR), dureza *Janka* e resistência ao arrancamento de parafusos nas direções normal e lateral às fibras, além da determinação da densidade e do teor de umidade. Os resultados obtidos foram comparados aos requisitos da norma, permitindo concluir que a madeira de *Dialium guianense* possui desempenho físico-mecânico compatível com o uso proposto e, em diversos parâmetros, superior aos requisitos mínimos estabelecidos pela ABNT NBR 7511:2026.

Palavras-chave: Espécies nativas; Madeira estrutural; Dormentes ferroviários.

Evaluation of *Dialium guianense* wood quality for use as railway sleepers in relation to the ABNT NBR 7511 (2026) standard.

Abstract: The recent update to the ABNT NBR 7511:2026 standard established modern criteria for classifying and qualifying wood used for railway sleepers, highlighting the importance of characterizing tropical species that have received little prior study for this application. This study evaluated the quality of *Dialium guianense* (Aubl.) Sandwith wood and its potential for use as railway sleepers. Test specimens were prepared in accordance with ABNT NBR 7511:2026 and tested using a universal testing machine. Tests included compression in parallel to the grain, modulus of elasticity (MOE), modulus of rupture (MOR), Janka hardness, and screw withdrawal resistance (both perpendicular and parallel to the grain), as well as the determination of density and moisture content. The results were compared against the standard's

requirements, leading to the conclusion that *Dialium guianense* wood exhibits physical-mechanical performance compatible with the intended use and, for several parameters, exceeds the minimum requirements established by ABNT NBR 7511:2026.

Keywords: Native species; Structural timber; Railway sleepers.

1. Introdução

O transporte ferroviário desempenha papel estratégico na logística de cargas de grande volume, destacando-se pela elevada eficiência energética, menor emissão de gases de efeito estufa e menores custos operacionais quando comparado ao modal
rodoviário (ONTL, 2025). Nesse contexto, a confiabilidade da via permanente depende diretamente do desempenho dos seus componentes estruturais, especialmente dos dormentes, responsáveis pela distribuição das cargas provenientes dos trilhos ao lastro, manutenção da bitola e absorção dos esforços dinâmicos gerados pela circulação ferroviária (ABNT, 2026; Kaewunruen et al., 2023).

Embora materiais como concreto protendido e compósitos tenham ampliado sua participação nas últimas décadas, os dormentes de madeira permanecem amplamente empregados em ferrovias de carga, linhas secundárias, pontes ferroviárias e aparelhos de mudança de via, devido à elevada capacidade de amortecimento de impactos, facilidade de usinagem, menor peso e excelente desempenho na fixação dos trilhos (Remennikov; Kaewunruen, 2022). Entretanto, a crescente restrição à exploração de espécies tradicionalmente utilizadas, aliada à necessidade de ampliar o uso sustentável dos recursos florestais, tem impulsionado pesquisas voltadas à caracterização tecnológica de madeiras alternativas capazes de atender aos requisitos normativos para aplicações estruturais de elevada solicitação mecânica (ROCHA, 2003).

Entre as madeiras classificadas como dormentes de primeira classe destacam-se angico-preto, aroeira-do-sertão, jatobá, sucupira-amarela, maçaranduba, ipê-tabaco, pau-roxo, coração-de-negro e angelim-vermelho, empregadas principalmente em linhas de tráfego pesado devido à sua elevada resistência físico-mecânica (IPT, 2013). Espécies como angico-vermelho, grápia, guajuvira, peroba-rosa, pessegueiro-bravo, canela-preta, imbuia e canafístula também foram amplamente utilizadas, sendo enquadradas como madeiras de segunda classe para aplicações em vias de menor solicitação mecânica (IPT, 2013). Entretanto, a redução da disponibilidade dessas madeiras nativas, associada às restrições ambientais para sua

exploração, favoreceu a substituição gradual por espécies de eucalipto provenientes de florestas plantadas (COLENCI, 2002; DAMASCENO et al., 2017).

Atualmente, o eucalipto é a principal matéria-prima utilizada na produção de dormentes, destacando-se espécies como *Eucalyptus citriodora* e *Eucalyptus cloeziana*, que apresentam elevada resistência mecânica, boa estabilidade dimensional e durabilidade natural (COLENCI, 2002). Além da espécie empregada, a constituição da madeira influencia diretamente seu desempenho. O cerne, localizado na região central do tronco, apresenta maior durabilidade natural e resistência à deterioração biológica,

enquanto o alburno, situado entre o cerne e a casca, possui maior permeabilidade, favorecendo a penetração dos produtos preservativos utilizados no tratamento da madeira e contribuindo para o aumento da vida útil dos dormentes (MAINIERI; CHIMELO, 1989)

Dentre as espécies nativas com potencial para aplicações como dormentes em ferrovias, destaca-se *Dialium guianense* (Aubl.) Sandwith, pertencente à família Fabaceae, conhecida popularmente como jataipeba, beiju-de-coco, jutaí, jutaí-pororoca, quebra-machado, durinho e tamarindo-preto, entre outros nomes regionais (ABNT NBR 7511:2026).

A espécie ocorre naturalmente nos biomas Amazônia e Mata Atlântica, sendo encontrada em florestas de terra firme, várzeas e florestas estacionais e ombrófilas. Sua madeira apresenta cerne marrom-avermelhado, distinto do alburno amarelo-pálido, elevada densidade, alta resistência mecânica, boa resistência à compressão, flexão, dureza e cisalhamento, características que a tornam indicada para usos que exigem elevado desempenho estrutural. Essas propriedades sugerem um potencial promissor para sua utilização na fabricação de dormentes ferroviários, embora o baixo rendimento do cerne deva ser considerado na avaliação de sua aplicação, uma vez que a impregnação de preservativos é um fator importante para aumentar a vida útil (LABORATÓRIO DE PRODUTOS FLORESTAIS, IBAMA). Apesar dessas propriedades serem reconhecidas em estudos tecnológicos da madeira, ainda são escassas as investigações que avaliam seu comportamento mecânico segundo os requisitos específicos estabelecidos pela ABNT NBR 7511:2026 para utilização em dormentes ferroviários, o que limita sua inserção em aplicações de infraestrutura.

Dessa forma, este trabalho teve como objetivo avaliar a qualidade da madeira de *Dialium guianense*, por meio dos ensaios físicos-mecânicos comparando os resultados com os requisitos estabelecidos pela ABNT NBR 7511:2026, visando verificar o potencial tecnológico da espécie para uso como dormentes ferroviários.

2. Material e métodos

A madeira da espécie *Dialium guianense* (Aubl.) Sandwith foi avaliada quanto ao seu potencial para utilização na fabricação de dormentes ferroviários, considerando os requisitos estabelecidos pela ABNT NBR 7511:2026 para madeiras destinadas à infraestrutura ferroviária. A madeira oriunda de uma madeireira localizada em Marcelândia/MT, foi doada na forma de dormentes e encaminhada para o Laboratório de Propriedades da Madeira (LPM), da Universidade Federal de Viçosa. A partir de 5 dormentes sem defeitos visíveis, foram confeccionados 10 corpos de prova para cada análise, respeitando as dimensões, orientações anatômicas e procedimentos prescritos pela norma.



Figura 1: Amostra utilizada nos ensaios mecânicos

Os ensaios mecânicos foram realizados em Máquina Universal de Ensaios devidamente calibrada, contemplando as propriedades exigidas para classificação tecnológica de dormentes: resistência à compressão paralela às fibras, módulo de elasticidade (MOE) e módulo de ruptura (MOR) em flexão estática, dureza *Janka* com penetração na face transversal e resistência ao arrancamento de parafusos nas direções paralela (lateral) e perpendicular (normal) às fibras. Além dos ensaios mecânicos, os ensaios físicos de densidade aparente e teor de umidade, seguiram os respectivos anexos da ABNT NBR 7511:2026, garantindo a padronização das condições de ensaio e a comparabilidade dos resultados.

As propriedades físico-mecânicas obtidas foram expressas por meio de estatística descritiva (média), sendo posteriormente comparadas aos valores mínimos estabelecidos para madeiras classificadas como dormentes de primeira e segunda classe pela ABNT NBR 7511:2026. Os resultados foram confrontados com informações disponíveis na literatura para espécies tradicionalmente empregadas na fabricação de dormentes ferroviários, especialmente *Eucalyptus citriodora* e *Eucalyptus cloeziana*, permitindo avaliar o potencial tecnológico de *Dialium guianense* para aplicações estruturais ferroviárias.

Tabela 1 – Valores mínimos dos parâmetros mecânicos dos dormentes de acordo com ABNT NBR 7511:2026

Parâmetro	Notação	Valor		Método de verificação
		Primeira classe	Segunda classe	
Módulo de elasticidade à flexão	MOE	13 000 MPa	10 000 MPa	Anexo A
Módulo de ruptura à flexão	MOR	50 MPa	40 MPa	Anexo A
Compressão normal – Placa	$f_{c90,\,p}$	5 MPa	4 MPa	Anexo B
Resistência ao arrancamento lateral	R_{a0}	10 kN	8 kN	Anexo D
Resistência ao arrancamento normal	R_{a90}	25 kN	20 kN	Anexo C
Dureza *Janka*	f_H	40 MPa	35 MPa	Anexo E

Fonte: ABNT NBR / 7511(2026)

3. Resultados e Discussão

Os resultados obtidos evidenciaram que a madeira de *Dialium guianense* apresenta elevado desempenho físico-mecânico, demonstrando potencial para aplicação em dormentes ferroviários (Tabela 2). A avaliação das propriedades mecânicas mostrou que a espécie atende aos requisitos mínimos estabelecidos pela ABNT NBR 7511:2026 para madeiras destinadas à fabricação de dormentes, indicando elevada capacidade de suportar os esforços de compressão, flexão, impacto e retenção dos elementos de fixação exigidos durante a operação ferroviária. Estudos recentes destacam que a seleção de espécies para essa finalidade deve considerar propriedades como densidade, módulo de elasticidade, módulo de ruptura, dureza superficial e resistência ao arrancamento de fixadores, por estarem diretamente relacionadas à classificação e ao desempenho da madeira como dormente ferroviário (ABNT, 2026; KOLTON et al., 2023).

Tabela 2: Resultados dos ensaios físico-mecânicos da madeira de *Dialium guianense*

Amostra / Repetição	Densidade (kg/m³)	Teor de umidade (%)	Compressão paralela (MPa)	MOR (MPa)	MOE (MPa)	Dureza *Janka* (MPa)	Arrancamento de parafuso lateral (kN)	Arrancamento de parafuso normal (kN)
01	1081,17	21,06	96,1	131,29	28817,29	121,3	30,89	31,93
02	1120,12	24,18	57,5	156,40	10727,60	137,7	34,38	24,64
03	1033,16	19,12	82,1	174,70	11011,00	142,0	29,45	25,56
04	1047,11	17,91	89,8	135,80	9508,90	148,4	16,83	24,67
05	1062,52	20,84	78,0	103,00	8454,00	142,8	14,71	25,51
06	1070,01	20,87	95,5	80,30	8160,00	144,1	14,80	24,63

07	1070,26	20,67	91,7	131,70	10114,00	142,9	15,00	24,58
08	1080,35	23,40	74,8	120,20	8698,00	152,1	14,76	25,74
09	1074,62	20,87	80,6	141,10	10781,50	146,6	14,73	24,55
10	1018,63	18,92	84,1	150,70	10322,40	143,5	14,78	24,71
Média	**1065,80**	**20,78**	**83,02**	**132,52**	**11659,47**	**142,14**	**20,03**	**25,65**

Fonte: Autor

A madeira apresentou densidade aparente média de 1065,80 kg/m³, caracterizando-se como uma madeira de elevada densidade. Essa característica está fortemente associada ao aumento da resistência mecânica e da dureza, fatores essenciais para minimizar deformações permanentes decorrentes das cargas cíclicas impostas pelo tráfego ferroviário. Segundo Forest Products Laboratory, (2010), madeiras com densidade superior a 900 kg m^{-3} tendem a apresentar maior estabilidade dimensional, maior resistência ao desgaste e melhor desempenho estrutural em aplicações ferroviárias.

O teor de umidade médio encontrado foi de 20,78%, apresentando pequena variação entre as amostras (17,91–24,18%). Esse resultado demonstra adequada homogeneidade do material e encontra-se próximo da condição de equilíbrio higroscópico normalmente observada para madeiras utilizadas em ensaios tecnológicos e aplicações externas. A umidade exerce influência significativa sobre as propriedades mecânicas da madeira, sendo amplamente reconhecido que reduções no teor de água abaixo do ponto de saturação das fibras promovem aumento da resistência e da rigidez do material (Glass; Zelinka, 2021).

A resistência à compressão paralela às fibras apresentou média de 83,02 MPa, valor significativamente superior ao mínimo requerido pela ABNT NBR 7511:2026 para madeiras utilizadas em dormentes. Esse resultado demonstra elevada capacidade de suportar esforços concentrados provenientes da transferência de cargas entre trilhos, placas de apoio e lastro. Valores dessa magnitude indicam elevada resistência estrutural da madeira, característica associada ao potencial de uso em aplicações que exigem bom desempenho mecânico, uma vez que densidade, estabilidade dimensional e resistência mecânica são parâmetros essenciais para qualificar a madeira para diferentes utilizações na forma sólida (ARAÚJO et al., 2023).

O módulo de elasticidade (MOE) médio foi de 11659,47 MPa, superando com ampla margem o limite mínimo de 13.000 MPa estabelecido para dormentes de primeira classe pela ABNT NBR 7511:2026. Esse elevado valor indica maior rigidez da madeira, reduzindo deformações elásticas durante a passagem dos trens e contribuindo para maior estabilidade geométrica da via permanente. Além disso, o módulo de ruptura (MOR) médio de 132,52 MPa

também permaneceu muito acima do requisito normativo de 50 MPa, evidenciando excelente resistência à flexão estática.

A dureza *Janka* apresentou média de 142,14 MPa, valor bastante superior ao mínimo normativo de 40 MPa. Essa propriedade representa uma das características importantes para a avaliação de madeiras destinadas a dormentes ferroviários, pois expressa a resistência da madeira à penetração e à deformação superficial, estando relacionada ao desempenho frente às solicitações exercidas por trilhos, placas de apoio e elementos metálicos de fixação. Estudos com madeiras para dormentes ferroviários indicam que a dureza Janka compõe os critérios de classificação físico-mecânica do material, estabelecendo-se valores mínimos de resistência de 40 MPa tanto para a Classe I quanto para a Classe II (ABNT, 2026).

Quanto à resistência ao arrancamento de parafusos, foram obtidos valores médios de 20,03 kN na direção lateral e 25,65 kN na direção normal às fibras. O valor obtido para o arrancamento normal atende ao requisito mínimo da ABNT NBR 7511:2026 para dormentes de primeira classe (25 kN), enquanto o arrancamento lateral supera o valor mínimo estabelecido para madeiras de primeira classe (10 kN). Esses resultados indicam elevada capacidade de retenção dos elementos de fixação, reduzindo o risco de afrouxamento das conexões durante a vida útil do dormente.

Comparando-se os resultados com espécies tradicionalmente utilizadas na fabricação de dormentes, observa-se desempenho igual ou superior ao relatado para *Eucalyptus citriodora* e *Eucalyptus cloeziana*, principalmente quanto à densidade, resistência à compressão, módulo de elasticidade e dureza *Janka* (Colenci, 2002). Embora essas espécies continuem sendo amplamente empregadas pela disponibilidade proveniente de florestas plantadas, especialmente do gênero *Eucalyptus*, estudos recentes indicam a importância da avaliação de novas espécies madeireiras com propriedades físico-mecânicas adequadas para uso em dormentes ferroviários, considerando os critérios estabelecidos pela NBR 7511:2026. Nesse contexto, a diversificação das matérias-primas utilizadas na infraestrutura ferroviária torna-se relevante, sobretudo diante da necessidade de materiais com elevada densidade, dureza e resistência mecânica (KOLTON et al., 2023; IBÁ, 2024).

De forma geral, os resultados demonstram que a madeira de *Dialium guianense* apresenta propriedades mecânicas compatíveis com os requisitos exigidos para dormentes ferroviários de primeira classe, evidenciando elevado potencial tecnológico para utilização em infraestrutura ferroviária e ampliando as perspectivas de aproveitamento de espécies nativas brasileiras em aplicações estruturais de elevada solicitação mecânica.

4. Conclusões

Os resultados demonstraram que a madeira de *Dialium guianense* apresenta desempenho físico-mecânico compatível e, em diversos parâmetros, superior aos requisitos mínimos estabelecidos pela ABNT NBR 7511:2026 para dormentes ferroviários. Os elevados valores de densidade, resistência à compressão paralela às fibras, módulo de elasticidade, dureza *Janka* e resistência ao arrancamento de parafusos evidenciam a aptidão da espécie para suportar as solicitações mecânicas impostas ao sistema ferroviário. Quando comparada às espécies tradicionalmente empregadas na fabricação de dormentes, como *Eucalyptus citriodora* e *Eucalyptus cloeziana*, *Dialium guianense* apresentou desempenho igual ou superior para as propriedades avaliadas, indicando elevado potencial tecnológico para aplicações estruturais de alta exigência. Tais resultados corroboram estudos recentes que destacam a importância da caracterização físico-mecânica de espécies tropicais de alta densidade como alternativa para ampliar a disponibilidade de matérias-primas destinadas à infraestrutura ferroviária, reduzindo a dependência de um número restrito de espécies comerciais e promovendo o uso sustentável dos recursos florestais.

5. Agradecimentos

Os autores agradecem à empresa Madeireira Três Guri pelo apoio financeiro concedido ao projeto de inovação ao qual este trabalho está vinculado, tornando possível o desenvolvimento das atividades desta pesquisa.

Agradecem, ainda, ao Laboratório de Propriedades da Madeira (LPM) – Universidade Federal de Viçosa (UFV) pela disponibilização de sua infraestrutura e equipamentos, bem como pelo apoio técnico na realização dos ensaios experimentais, fundamentais para a obtenção dos resultados apresentados neste trabalho.

6. Referências bibliográficas

Araújo, S. de L., et al. (2023). Cor, grã e propriedades físico-mecânicas da madeira de *Corymbia* e *Eucalyptus* não tradicionais. *Scientia Forestalis, 51*, 1–16.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2026). *ABNT NBR 7511:2026: Dormentes de madeira—Requisitos e métodos de ensaio*. ABNT.

Colenci, R. A. (2002). *Qualificação mecânica de madeiras para uso como dormente ferroviário* [Dissertação de mestrado, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho"].

Damasceno, F. G., Matlaba, V. J., Santos, J. F. dos, & Mota, J. A. (2017). Reaproveitamento de dormentes de madeira da Estrada de Ferro Carajás para a cogeração de energia elétrica. *Revista Brasileira de Ciências Ambientais*, *45*, 1–18.

Forest Products Laboratory. (2010). *Wood handbook: Wood as an engineering material* (Centennial ed., General Technical Report FPL-GTR-190). U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory.

Glass, S. V., & Zelinka, S. L. (2021). Moisture relations and physical properties of wood. In Forest Products Laboratory, *Wood handbook: Wood as an engineering material* (General Technical Report FPL-GTR-282, Chapter 4). U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory.

Indústria Brasileira de Árvores. (2024). *Relatório anual 2024*. IBÁ.

Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo. 2013. (s. d.). *Catálogo de madeiras brasileiras para a construção civil*. IPT.

Kaewunruen, S., Guo, Y., Jing, G., & Matsumoto, A. (2023). Circular economy implementation in railway systems beyond net zero. *Frontiers in Built Environment, 9*, Article 1239740. https://doi.org/10.3389/fbuil.2023.1239740

Kolton, P. H. de M., et al. (2023). Fast-growing woods for use as a railway sleeper. *Journal of the Indian Academy of Wood Science, 20*, 183–190. https://doi.org/10.1007/s13196-023-00323-0

LABORATÓRIO DE PRODUTOS FLORESTAIS (LPF). *Madeiras Brasileiras: Banco de Dados de Madeiras Brasileiras*. Brasília, DF: LPF/IBAMA. Disponível em: http://lpf.florestal.gov.br/. Acesso em: 20 de agosto 2026.

Li, D., Kaewunruen, S., Remennikov, A., & You, R. (2022). Diagnostics and management methods for concrete sleepers. In *Rail infrastructure resilience: A best-practices handbook* (Cap. 13, pp. 271–294). Woodhead Publishing.

Mainieri, C., & Chimelo, J. P. (1989). *Fichas de características das madeiras brasileiras*. Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo.

Observatório Nacional de Transporte e Logística (ONTL), (2025). *Panorama do sistema ferroviário brasileiro com foco em carga geral*. Infra S.A.

Rocha, R. R. da. (2003). *Avaliação não-destrutiva de madeiras para dormentes ferroviários* [Dissertação de mestrado, Universidade Estadual Paulista]. Repositório Institucional UNESP.

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Avaliação da resistência à perfuração para estimativa da densidade básica da madeira em *Eucalyptus* spp.

Náthali dos Santos Toniato Alves[1]; Gilson Mendonça de Miranda Júnior[2]; Felipe Toniato Alves[1]; Nathalia Gabriele Franca Dias Polido[1]; Henzza Ferreira Rocha[1]; Maria Eduarda Meira Pratti[1]; Davi Rogério Guimarães[1]; Rejane Costa Alves[1]

[1] Universidade Federal do Espírito Santo 01
[2] Universidade Federal de Pernambuco 02

Resumo: A densidade básica é uma das principais propriedades utilizadas na caracterização tecnológica da madeira, influenciando seu potencial de aplicação industrial. Nesse contexto, este estudo teve como objetivo avaliar a eficiência da resistência à perfuração como método não destrutivo para estimar a densidade básica de árvores em pé de *Eucalyptus* spp. O estudo foi realizado em um plantio comercial localizado no município de Iúna, Espírito Santo, utilizando 59 árvores com idades entre 5 e 10 anos. As avaliações foram realizadas com um Resistógrafo R650-SC, enquanto a densidade básica foi determinada em laboratório pelo método de imersão em água, conforme a NBR 11941. A relação entre os valores estimados pela resistografia e os obtidos pelo método convencional foi avaliada por regressão linear simples. Os resultados evidenciaram forte associação entre os métodos, com coeficiente de determinação (R^2) de 90,1%, demonstrando elevada capacidade preditiva da resistografia para estimar a densidade básica da madeira eficientemente.

Palavras-chave: Resistógrafo; Qualidade da Madeira; Avaliação em Árvores em Pé.

Evaluation of Drilling Resistance for Estimating Basic Wood Density in *Eucalyptus* spp.

Abstract: Basic wood density is one of the main properties used in the technological characterization of wood, directly influencing its industrial applications. In this context, this study aimed to evaluate the efficiency of drilling resistance as a non-destructive method for estimating the basic wood density of standing Eucalyptus spp. trees. The study was conducted in a commercial plantation located in the municipality of Iúna, Espírito Santo, Brazil, using 59 trees aged between 5 and 10 years. Drilling resistance measurements were performed using a Resistograph R650-SC, while basic wood density was determined in the laboratory by the water immersion method, according to ABNT NBR 11941. The relationship between the values estimated by resistography and those obtained by the conventional method was evaluated using simple linear regression. The results showed a strong relationship between the two methods, with a coefficient of determination (R^2) of 90.1%, demonstrating the high predictive accuracy of resistography for efficiently estimating basic wood density.

Keywords: Resistograph; Wood Quality; Standing Tree Assessment.

1. Introdução

No cenário florestal brasileiro, o gênero *Eucalyptus* desempenha papel de destaque como uma das principais fontes de matéria-prima, em virtude de seu rápido crescimento, elevada produtividade e ampla capacidade de adaptação às mais diversas condições edafoclimáticas (Indústria Brasileira de Árvores – IBÁ, 2025). A madeira proveniente de plantios comerciais de *Eucalyptus* é amplamente utilizada como matéria-prima em diferentes setores industriais, destacando-se a produção de celulose e papel, carvão vegetal, biomassa energética, painéis reconstituídos e madeira serrada (Scanavacca Júnior; Garcia, 2023).

A idade influencia as propriedades da madeira em função da formação de madeira juvenil e adulta. No entanto, em *Eucalyptus*, a relação entre idade, densidade e resistência mecânica pode variar conforme a espécie, o material genético e as condições de crescimento (Marinho, 2022), embora alterações anatômicas e químicas decorrentes do avanço da idade tendam a contribuir para o aumento da densidade e da rigidez da madeira (Santos et al., 2024).

A caracterização tecnológica da madeira de *Eucalyptus* spp. é essencial para compreender sua variabilidade e subsidiar sua utilização industrial, favorecendo o direcionamento da matéria-prima para diferentes aplicações (Araujo et al., 2023). Nesse contexto, os métodos não destrutivos (MND) destacam-se por permitirem a estimativa das propriedades da madeira sem comprometer sua integridade, possibilitando avaliações rápidas e confiáveis em árvores em pé, toras e peças estruturais. Em comparação aos métodos destrutivos convencionais, esses métodos proporcionam maior agilidade nas análises e potencial para reduzir os custos operacionais (Wang, 2021; Ettelaei; Taoum; Nolan, 2022).

A resistografia é um MND que se baseia no registro da resistência da madeira ao avanço de uma broca de pequeno diâmetro. Durante o ensaio, o equipamento gera um perfil radial da resistência à perfuração, possibilitando a identificação de variações estruturais, anatômicas e de densidade ao longo do lenho (Gendvilas et al., 2024). Ao avaliarem espécies nativas brasileiras, Silva et al. (2020) verificaram forte correlação entre a amplitude resistográfica e a densidade básica da madeira, com coeficientes de determinação superiores a 0,90, sobretudo para espécies de maior densidade. Esses resultados reforçam o potencial da resistografia como ferramenta para a estimativa indireta de propriedades físicas relacionadas à qualidade da madeira.

Nesse contexto, o presente trabalho teve como objetivo avaliar a eficiência do método não destrutivo de resistência à perfuração na estimativa da densidade básica da madeira em árvores em pé de *Eucalyptus* spp., comparando os resultados obtidos em campo com a

densidade básica determinada por meio de ensaios laboratoriais realizados após o abate das árvores.

2. Material e métodos

O estudo foi realizado em um plantio comercial de *Eucalyptus* spp., localizado no município de Iúna, Espírito Santo, Brasil. Foram avaliadas 59 árvores em pé, com idades entre 5 e 10 anos, representativas das condições do povoamento. A seleção dos indivíduos buscou contemplar a variabilidade existente no talhão, priorizando árvores com desenvolvimento típico e sem defeitos externos aparentes, a fim de garantir a representatividade da amostra e das análises realizadas.

A avaliação não destrutiva foi realizada antes da derrubada das árvores, utilizando o método de resistência à perfuração. Essa técnica permite a caracterização indireta da madeira com base em propriedades físicas relacionadas à sua densidade e rigidez.

A avaliação por resistografia foi realizada utilizando um Resistógrafo modelo R650-SC (Series 6, RINNTECH, Heidelberg, Alemanha), equipamento que registra continuamente a resistência da madeira à perfuração por meio de uma broca de pequeno diâmetro. O ensaio consistiu na inserção controlada da broca no fuste, ao longo do sentido diametral, com registro contínuo da variação da resistência mecânica durante a perfuração (Figura 1).

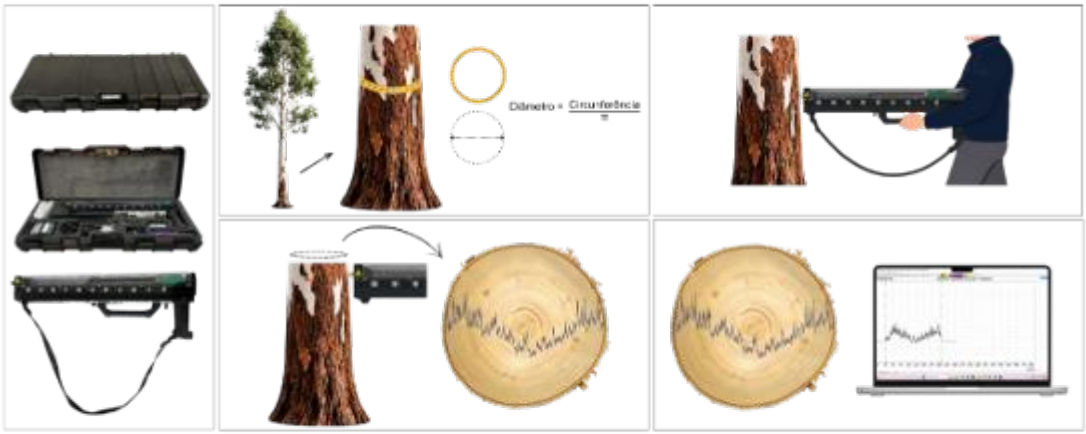


Figura 1 – Ilustração do esquema de resistência à perfuração.

As leituras com o resistógrafo foram realizadas em todas as árvores na altura do diâmetro à altura do peito (DAP), no sentido diametral e com a casca intacta em todo o diâmetro do fuste. O equipamento foi operado com velocidade de avanço de 200 cm min^{-1}, utilizando haste de 1,5 mm de diâmetro e aresta de corte de 3 mm. Durante o ensaio, foi registrado o perfil

de resistência à perfuração ao longo do diâmetro do fuste, gerando valores de amplitude resistográfica.

Os dados obtidos foram processados no software DECOM, no qual foi realizada a calibração dos perfis resistográficos, bem como a remoção dos ruídos decorrentes do início e do término da perfuração, quando a broca ainda não estava em contato efetivo com a madeira. Também foram excluídos os trechos correspondentes à casca. Após o processamento, o software forneceu os parâmetros resistográficos corrigidos e a estimativa da densidade básica da madeira, expressa em kg m^{-3}.

Os perfis resistográficos corrigidos possibilitaram a avaliação indireta da variação radial da densidade da madeira, uma vez que a resistência à perfuração está associada às características anatômicas do lenho e à sua densidade, sendo que regiões de maior resistência tendem a apresentar maior densidade e integridade estrutural.

Após a realização das avaliações não destrutivas, as árvores foram abatidas e, de cada indivíduo, foi retirado um torete com aproximadamente 1,0 m de comprimento da base do fuste. Os toretes foram encaminhados à Marcenaria do Departamento de Ciências Florestais e da Madeira (DCFM) da Universidade Federal do Espírito Santo (UFES), onde foram processados.

O desdobro foi realizado com o auxílio de motosserra, obtendo-se pranchas diametrais ao longo do eixo longitudinal dos toretes. A partir dessas pranchas, foram confeccionados corpos de prova livres de defeitos, destinados às determinações das propriedades físicas da madeira, em conformidade com as recomendações da ABNT NBR 7190 (ABNT, 2022).

Foram confeccionados seis corpos de prova por prancha (2×3×5 cm) para a determinação da densidade básica da madeira. Os ensaios foram realizados no Laboratório de Experimentação e Múltiplos Usos da Madeira (LEMUM-DCFM-UFES), utilizando o método de imersão em água, conforme a NBR 11941 (ABNT, 2003), com base na relação entre a massa seca e o volume saturado dos corpos de prova (Figura 2).



Figura 2 – Ilustração do esquema de densidade básica.

A relação entre os parâmetros obtidos pelo método não destrutivo de resistência à perfuração e a densidade básica da madeira foi avaliada por meio de regressão linear simples, utilizando-se o coeficiente de determinação (R^2) como indicador da qualidade do ajuste do modelo. As análises estatísticas foram realizadas no software Minitab, versão 19.

3. Resultados e discussão

A densidade básica determinada pelo método convencional apresentou variação de 405,26 a 743,69 kg m^{-3}, enquanto a densidade básica estimada pela resistografia variou de 408 a 645 kg m^{-3} (Tabela 1). Observou-se que as árvores com menores valores de densidade básica também apresentaram menores valores estimados pela resistografia, enquanto as árvores com maior densidade tenderam a apresentar maiores estimativas pelo método não destrutivo.

Tabela 1 – Valores individuais da densidade básica determinada pelo método convencional, densidade básica estimada pela resistografia e variáveis associadas ao perfil resistográfico da madeira

Árvore	D. Básica [Kg m^{-3}]	D. Bás.resistografia [Kg m^{-3}]	A.P. [adim.]	Porcentagem
A1	530,72	528	1336	89,1
A2	427,33	408	418	27,9
A3	511,63	512	1213	80,9
A4	485,90	472	907	60,4
A5	**422,66**	**498**	**1107**	**73,8**
A6	481,70	477	947	63,1
A7	504,68	501	1133	75,5
A8	518,18	518	1259	83,9
A9	544,62	515	1239	82,6
A10	478,84	474	926	61,7
A11	452,16	436	635	42,3
A12	456,13	452	751	50,1
A13	**405,26**	**485**	**1009**	**67,3**
A14	446,81	437	637	42,5
A15	560,44	532	1368	91,2
A16	743,69	645	2239	149,2
A17	599,68	527	1330	88,7
A18	676,73	567	1639	109,2

A19	613,10	531	1359	90,6
A20	641,93	549	1503	100,2
A21	680,53	574	1691	112,7
A22	702,52	594	1850	123,3
A23	566,83	501	1128	75,2
A24	566,25	500	1127	75,1
A25	537,95	488	1032	68,8
A26	587,23	512	1219	81,3
A27	590,35	514	1230	82,0
A28	602,03	530	1352	90,1
A29	625,63	534	1385	92,3
A30	634,24	541	1438	95,8
A31	727,35	634	2151	143,4
A32	591,86	518	1261	84,1
A33	676,79	568	1648	109,9
A34	643,30	553	1532	102,1
A35	562,12	490	1043	69,5
A36	696,77	578	1723	114,9
A37	636,51	542	1446	96,4
A38	523,05	474	920	61,4
A39	594,74	523	1298	86,5
A40	697,27	591	1823	121,5
A41	585,38	511	1205	80,3
A42	678,26	571	1671	111,4
A43	617,83	532	1370	91,4
A44	565,73	496	1090	72,6
A45	602,03	530	1353	90,2
A46	518,59	467	870	58,0
A47	680,43	573	1686	112,4
A48	654,30	555	1546	103,0
A49	640,68	546	1475	98,3
A50	627,81	541	1440	96,0
A51	639,08	544	1461	97,4
A52	531,78	483	994	66,3
A53	664,30	555	1545	103,0
A54	683,40	576	1710	114,0
A55	730,19	643	2223	148,2
A56	639,29	545	1466	97,8

A57	647,43	553	1530	102,0
A58	673,67	561	1590	106,0
A59	658,58	555	1548	103,2

D. Básica: densidade básica determinada pelo método convencional; D. Bás. Resistografia: densidade básica estimada pela resistografia; A.P.: amplitude de perfuração obtida pelo resistógrafo; adim.: adimensional; Porcentagem: valor relativo associado ao perfil resistográfico.

A comparação entre a densidade básica determinada pelo método convencional e aquela estimada pela resistografia evidenciou tendência geral de subestimação. A diferença percentual média foi de −10,06%, o erro percentual absoluto médio foi de 11,33% e a diferença absoluta média entre os métodos correspondeu a 70,09 kg m^{-3}. Entretanto, essa discrepância não ocorreu de forma uniforme ao longo da faixa de densidade avaliada.

Nas menores densidades, observou-se maior proximidade entre os valores convencionais e aqueles estimados pela resistografia, embora tenham ocorrido superestimações pontuais, especialmente nas árvores A5 e A13. Entre 500 e 600 kg m^{-3}, a resistografia apresentou subestimação média de aproximadamente 8,65%, aumentando para 14,73% nas densidades superiores a 600 kg m^{-3}. Esses resultados indicam redução da concordância entre os métodos nas maiores faixas de densidade.

A maior discrepância nas árvores de elevada densidade pode estar relacionada à menor amplitude das estimativas obtidas pela resistografia em comparação ao método convencional, indicando menor capacidade do modelo em representar valores extremos. Estudos com o mesmo equipamento mostram que a relação entre resistência à perfuração e densidade pode variar conforme a anatomia da madeira, o material genético e a região do lenho avaliada (Jesus et al., 2023; Silva, 2019), embora não relatem explicitamente a mesma tendência de subestimação crescente observada neste estudo.

A amplitude de perfuração variou de 418 a 2239, enquanto a porcentagem variou de 27,9 a 149,2% (Tabela 1). Essa ampla variação evidencia que o sinal gerado pelo equipamento foi sensível às diferenças internas da madeira entre as árvores avaliadas. A resposta da resistografia pode ser influenciada por fatores como densidade, umidade, anatomia, proporção de lenho juvenil e adulto e variações radiais ao longo do diâmetro do fuste (Lorensani & Gonçalves, 2025).

A relação entre a densidade básica convencional e a densidade básica estimada pela resistografia apresentou tendência linear positiva (Figura 3). A equação ajustada apresentou R^2 = 90,1% e R^2aj. = 89,9%. Esses resultados indicam que a densidade básica determinada pelo

método convencional explicou grande parte da variação observada na densidade estimada pela resistografia, demonstrando forte associação entre as variáveis.

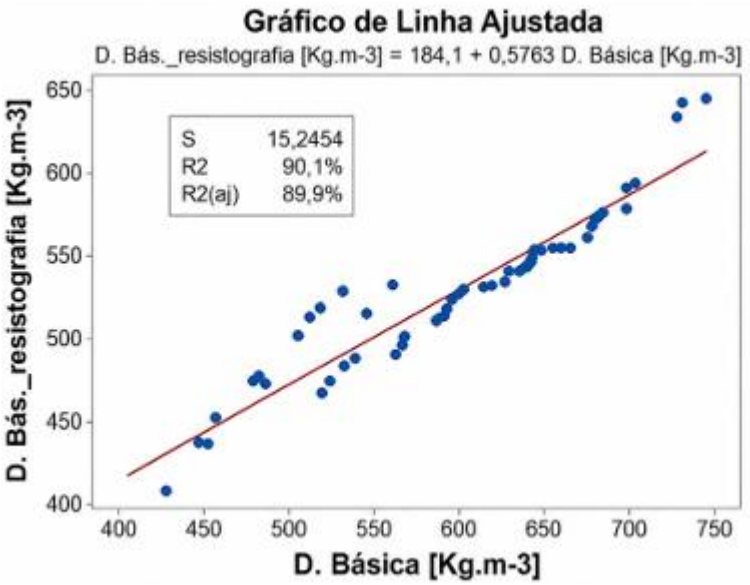


Figura 3 – Relação entre a densidade básica determinada pelo método convencional e a densidade básica estimada pela resistografia em árvores de eucalipto.
S: erro padrão da estimativa [Kg m^{-3}]; R^2: coeficiente de determinação; R^2aj.: coeficiente de determinação ajustado.

O erro padrão do ajuste foi de 15,25 kg m^{-3} (Figura 3), indicando baixa dispersão dos resíduos em torno da relação ajustada. A proximidade dos pontos em relação à linha ajustada reforça o potencial da resistografia para estimar a densidade básica da madeira de forma indireta. Embora a técnica não substitua completamente o método convencional em situações que exigem valores laboratoriais de referência, ela pode ser utilizada como ferramenta auxiliar em avaliações rápidas e menos destrutivas em campo.

Apesar do elevado ajuste, observaram-se alguns desvios em relação à linha de regressão, principalmente nas maiores densidades (Figura 3). Essas variações podem estar relacionadas à heterogeneidade natural da madeira, às diferenças anatômicas entre árvores e a fatores operacionais inerentes ao ensaio de resistografia (Gendvilas et al., 2024).

Em árvores de eucalipto, modelos baseados em resistografia apresentaram coeficientes de determinação entre 0,62 e 0,79 para estimativa da densidade básica média da árvore (Singh et al., 2022). De forma semelhante, em genótipos de *Eucalyptus* cultivados sob diferentes condições de disponibilidade hídrica, foram observadas fortes relações entre resistência à perfuração e densidade básica, com coeficientes de determinação de 0,97 e 0,84, dependendo do material genético avaliado (Elissetche et al., 2024).

Em clones de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*, também foi observada correlação significativa entre a resistência à perfuração e a densidade básica, além de associação com características anatômicas da madeira, como a espessura da parede das fibras (Jesus et al., 2023). Esses resultados reforçam que a resposta do resistógrafo está diretamente relacionada às características físicas e anatômicas do lenho.

O elevado coeficiente de determinação obtido neste estudo demonstra que a resistografia apresentou bom desempenho para estimar a densidade básica da madeira. Assim, o método apresenta potencial para uso em programas de qualidade da madeira, melhoramento genético e seleção de árvores em campo, permitindo avaliações mais rápidas e com menor necessidade de retirada de amostras destrutivas.

4. Conclusões

A resistência à perfuração apresentou elevada eficiência na estimativa da densidade básica da madeira de *Eucalyptus* spp., evidenciada pelo elevado coeficiente de determinação entre os valores estimados e aqueles obtidos pelo método convencional. Assim, a resistografia mostrou-se uma ferramenta promissora para a avaliação não destrutiva da densidade da madeira em árvores em pé, possibilitando estimativas rápidas para aplicações no setor florestal. Entretanto, sua utilização requer padronização das condições de medição e modelos de calibração adequados ao material avaliado, uma vez que a heterogeneidade da madeira e as condições de perfuração podem interferir na resposta do equipamento. Além disso, observou-se menor concordância nas maiores faixas de densidade, com tendência de subestimação dos valores mais elevados.

5. Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

6. Referências bibliográficas

Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2003). NBR 11941: Madeira – Determinação da densidade básica. ABNT.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2022). NBR 7190-3: Projeto de estruturas de madeira – Parte 3: Métodos de ensaio para corpos de prova isentos de defeitos para madeiras de florestas nativas. ABNT.

Araujo, S. L., Melo, A. B., Oliveira, L. J., Silva, J. G. M., Almeida, M. N. F., Silva, P. H. M., Vidaurre, G. B., & Godinho, T. F. (2023). Cor, grã e propriedades físico-mecânicas da madeira de Corymbia e Eucalyptus não tradicionais. Scientia Forestalis, 51, e4029. https://doi.org/10.18671/scifor.v51.28

Elissetche, J. P., Alzamora, R. M., Espinoza, Y., Emhart, V., Pincheira, M., Medina, A., & Rubilar, R. (2024). Wood basic density assessment of Eucalyptus genotypes growing under contrasting water availability conditions. Forests, 15(1), 185. https://doi.org/10.3390/f15010185

Ettelaei, A., Taoum, A., & Nolan, G. (2022). Assessment of different measurement methods/techniques in predicting modulus of elasticity of plantation Eucalyptus nitens timber for structural purposes. Forests, 13(4), 607. https://doi.org/10.3390/f13040607

Gendvilas, V., Downes, G. M., Lausberg, M., Harrington, J. J., & Lee, D. J. (2024). Predicting wood density using resistance drilling: The effect of varying feed speed and RPM. Forests, 15(4), 579. https://doi.org/10.3390/f15040579

Gendvilas, V., Lee, D. J., Kain, D. P., Kumar, C., Downes, G. M., Lausberg, M., & Harrington, J. J. (2024). Predicting wood density using resistance drilling: The effect of instrument and operator. Forests, 15(1), 157. https://doi.org/10.3390/f15010157

Indústria Brasileira de Árvores. (2025). Relatório anual 2025. IBÁ.

Jesus, D. S., Oliveira, J. T. S., & Nascimento, A. M. (2023). Relationship between wood density and anatomy with drilling resistance by non-destructive evaluation method. Floresta, 53(3), 371–376. https://doi.org/10.5380/rf.v53i3.84759

Lorensani, R. G. M., & Gonçalves, R. (2025). Machine learning algorithms and nondestructive methods for estimating wood density in planted forest trees. Forests, 16(2), 376. https://doi.org/10.3390/f16020376

Marinho, M. S. S. (2022). Efeito do preparo do solo nas propriedades estrutural e química da madeira de reação de clones de Eucalyptus sp. (Monografia de graduação, Universidade Federal de Alagoas).

Santos, V. B., Conceição, G. J., Rodrigues, P. D., Cirilo, N. R. M., Almeida, M. N. F., Rocha, M. F. V., Guimarães, J. F. R., Carvalho, A. M. M. L., Gomes, F. J. B., Marcelino, P. R. C., Barbosa, V. O. P., Castor Neto, T. C., Moulin, J. C., Pedrazzi, C., & Vidaurre,

G. B. (2024). Impact of age and genotype on the quality of Eucalyptus wood for dissolving pulp. Industrial Crops and Products, 218, 118930. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2024.118930

Scanavacca Júnior, L., & Garcia, J. N. (2023). Physical and mechanical properties of Eucalyptus urophylla. Brazilian Journal of Agriculture, 98(1), 12–22. https://doi.org/10.37856/bja.v98i1.4317

Silva, C. E. S., Pace, J. H. C., Gomes, F. J. B., Carvalho, P. C. L., Reis, C. A., Latorraca, J. V. F., Rolim, S. G., & Carvalho, A. M. (2020). Comparison between resistograph analysis with physical properties of the wood of Brazilian native tree species. Floresta e Ambiente, 27(1). https://doi.org/10.1590/2179-8087.005219

SILVA, J. G. M. da. Aplicação da resistografia na estimativa da densidade e umidade da madeira em árvores jovens de eucalipto. 2019. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Espírito Santo, Jerônimo Monteiro, 2019.

Singh, K. P., Siregar, I. Z., Abad, J. I. M., & Karlinasari, L. (2022). Non-destructive modeling using a drilling resistance tool to predict wood basic density of standing trees in a Eucalyptus plantation in North Sumatra, Indonesia. Biodiversitas, 23(12), 6218–6226. https://doi.org/10.13057/biodiv/d231217

Wang, X. (2021). Recent advances in nondestructive evaluation of wood: In-forest wood quality assessments. Forests, 12(7), 949. https://doi.org/10.3390/f12070949

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Avaliação da resistência do mogno africano (*Khaya grandifoliola*) ao cupim arborícola *Nasutitermes corniger*

Isabelle Silveira Martins Honorato[1]; Evanderson Luis Capelete Evangelista[1]; Ana Júlia Alves Pereira[1]; Laura Menezes Côrrea[1]; Willian Colatino Martins[1]; Benício Ambrósio Ávila[1]; Angélica de Cassia Oliveira Carneiro[1]; Vinicius Resende de Castro[1]

[1] Universidade Federal de Viçosa

Resumo: A deterioração por cupins compromete a durabilidade natural e limita seu uso comercial. Este trabalho avaliou a resistência biológica do mogno africano (*Khaya grandifoliola* C. DC.) ao ataque do cupim arborícola *Nasutitermes corniger*. O ensaio foi conduzido em campo durante 63 dias, utilizando *Pinus* spp. como controle. Foram avaliadas 12 amostras de mogno africano, provenientes de seis árvores, e seis de *Pinus* spp. O desgaste foi avaliado por três examinadores, conforme escala adaptada da norma AWPA E1-23, complementada por caracterização química e registro fotográfico. O mogno africano apresentou nota média de 9,53, com predomínio de amostras sem danos ou danos superficiais, enquanto *Pinus* spp. apresentou 7,95. A madeira apresentou 8,34% de extrativos, 29,58% de lignina total e 62,08% de holocelulose; porém, o maior teor de extrativos coincidiu com maior desgaste, indicando que esse componente isoladamente não explicou a resistência observada. Os resultados indicam elevada resistência de *K. grandifoliola* ao ataque de *N. corniger* nas condições avaliadas.

Palavras-chave: Biodeterioração; Durabilidade natural; Desgaste visual.

Evaluation of the Resistance of African Mahogany (*Khaya grandifoliola*) to the Arboreal Termite *Nasutitermes corniger*

Abstract: Termite-induced wood deterioration compromises natural durability and limits its commercial use. This study evaluated the biological resistance of African mahogany (*Khaya grandifoliola* C. DC.) to attack by the arboreal termite *Nasutitermes corniger*. The field trial was conducted over 63 days, using *Pinus* spp. as the control. Twelve African mahogany samples obtained from six trees and six *Pinus* spp. samples were evaluated. Wood deterioration was visually assessed by three examiners using a rating scale adapted from the AWPA E1-23 standard and complemented by chemical characterization and photographic records. African mahogany achieved a mean rating of 9.53, with most samples showing no damage or only

superficial damage, whereas *Pinus* spp. achieved 7.95. The wood contained 8.34% extractives, 29.58% total lignin, and 62.08% holocellulose; however, the highest extractive content coincided with greater deterioration, indicating that this component alone did not explain the observed resistance. The results indicate high resistance of *K. grandifoliola* to *N. corniger* attack under the evaluated conditions.
Keywords: Biodeterioration; Natural durability; Termite damage.

1. Introdução

O aumento do cultivo de mogno africano (*Khaya* spp.) tem ampliado a disponibilidade de madeiras tropicais de alto valor para aplicações estruturais e de acabamento (Ribeiro et al., 2017). Além do valor madeireiro direto, os plantios florestais têm sido reconhecidos por desempenharem outras funções relevantes, como a contribuição para o estoque de carbono na biomassa, a recuperação de áreas degradadas e a manutenção de serviços ecossistêmicos associados ao manejo florestal sustentável (FAO, 2023; EMBRAPA, 2023). Entretanto, o sucesso comercial desses plantios de restauração florestal depende não apenas do desempenho silvicultural da espécie, mas também da durabilidade natural da madeira, especialmente de sua resistência à deterioração biológica, fator que influencia diretamente a vida útil do material, os custos de manutenção e sua viabilidade para aplicações de maior valor agregado.

Entre os agentes biológicos responsáveis pela deterioração da madeira em regiões tropicais, os cupins destacam-se como uma das principais causas de perdas econômicas. No Brasil, o cupim arborícola *Nasutitermes corniger* apresenta ampla distribuição geográfica e elevada capacidade de degradação de materiais lignocelulósicos, constituindo um organismo de grande relevância para a avaliação da durabilidade natural de espécies florestais de interesse comercial (Medeiro et al., 2024). Estudos anteriores (Owoyemi et al., 2013; Paes et al., 2015; Ribeiro et al., 2017; Ndulue et al., 2023) demonstram que a resistência da madeira ao ataque de cupins varia significativamente entre espécies e está frequentemente associada à sua composição química, especialmente ao teor e à composição dos extrativos (Santana et al., 2010), embora características anatômicas e propriedades físicas, como a densidade, também desempenhem papel importante nesse processo.

Diante desse contexto, o presente trabalho teve como objetivo avaliar a resistência biológica natural da madeira de mogno africano (*Khaya grandifoliola* C. DC.) ao ataque do cupim arborícola *Nasutitermes corniger*, bem como caracterizar sua composição química estrutural, por meio da determinação dos teores de extrativos, lignina total e holocelulose, com

ênfase na possível relação entre o teor de extrativos e o padrão de resistência biológica observado.

2. Material e métodos

Amostras de madeira foram obtidas de seis árvores de *Khaya grandifoliola* com 14 anos de idade, cultivadas em um plantio comercial localizado em Porto Seguro, Bahia, Brasil. De cada uma das seis árvores, foi coletado um disco transversal à altura do DAP (1,30 m). De cada disco, foram retiradas duas amostras, uma na região do cerne interno e outra na transição entre alburno e cerne, totalizando 12 amostras. Corpos de prova de *Pinus* spp. foram utilizados como controles suscetíveis. Todos os corpos de prova foram inspecionados visualmente para excluir defeitos, como nós, rachaduras ou deterioração, antes dos ensaios.

O ensaio de resistência ao ataque de cupins foi conduzido em condições de campo, em colônias arborícolas de *N. corniger*, no período de 15 de abril a 17 de junho de 2026 (63 dias de exposição). As amostras de mogno africano (*K. grandifoliola*) e de *Pinus* spp. foram distribuídas nas colônias, de modo a permitir a exposição dos corpos de prova à atividade dos cupins. O ensaio foi conduzido com base em metodologia laboratorial da AWPA E1-23.

Ressalta-se que a AWPA E1 são originalmente voltadas a cupins subterrâneos; como o organismo avaliado foi *N. corniger* (cupim arborícola), os resultados devem ser interpretados como avaliação adaptada de biodeterioração, não como aplicação normativa direta.

Após o período experimental, os corpos de prova foram removidos das colônias, limpos cuidadosamente com escova de cerdas macias para remoção de resíduos superficiais e submetidos à avaliação visual dos danos provocados pelos cupins. A intensidade do ataque foi determinada independentemente por três avaliadores, utilizando a escala de classificação proposta pela AWPA E1, variando de 10 (ausência de danos) a 0 (falha completa da amostra). Para cada corpo de prova foi calculada a média aritmética das notas atribuídas pelos avaliadores, utilizada como indicador da resistência biológica da madeira. Além da avaliação visual, foram obtidos registros fotográficos padronizados antes e após a exposição para documentação qualitativa do padrão de deterioração.

3. Resultados e discussão

A madeira de *Khaya grandifoliola* apresentou elevada resistência ao ataque de *Nasutitermes corniger*, com nota média de desgaste de 9,53, próxima ao valor máximo da escala de avaliação, enquanto o material controle (*Pinus spp.*) apresentou média de 7,95 (Tabela 1).

Esse contraste demonstra que o mogno africano possui menor suscetibilidade ao consumo por cupins arborícolas, indicando elevado potencial de durabilidade natural nas condições experimentais avaliadas.

Tabela 1 - Notas médias de desgaste das amostras de mogno africano (*K. grandifoliola*) submetidas ao ataque de *N. corniger*

Árvore	**1**		**2**		**3**		**4**		**5**		**6**	
Amostra	1.1	1.2	2.1	2.2	3.1	3.2	4.1	4.2	5.1	5.2	6.1	6.2
Notas	10	10	9	7	10	10	10	10	10	10	10	10
	10	10	7	7	9	10	10	10	10	10	10	10
	10	10	7	7	10	10	10	10	10	10	10	10
Média	**10**	**10**	**7,7**	**7**	**9,7**	**10**	**10**	**10**	**10**	**10**	**10**	**10**

A elevada resistência observada foi consistente entre cinco das seis árvores avaliadas, sugerindo que essa característica representa um atributo relativamente estável da espécie. Apenas a árvore A2 apresentou desgaste superior ao das demais, evidenciando que existe variabilidade intraespecífica. Diferenças na formação do cerne, densidade da madeira, distribuição radial dos extrativos e composição química específica podem explicar essa variação, embora tais fatores não tenham sido avaliados diretamente neste estudo

A comparação com o material controle reforçou esse padrão, as seis amostras de *Pinus* spp. apresentaram maior intensidade de desgaste, com média geral de 7,95 (Tabela 2).

Tabela 2 - Notas médias de desgaste das amostras controle de *Pinus* spp. submetidas ao ataque de *Nasutitermes corniger*

Amostra	**1.1**	**1.2**	**1.3**	**1.4**	**1.5**	**1.6**
Notas	7	10	10	7	7	7
	7	9	10	7	7	7
	7	10	10	7	7	7
Média	**7**	**9,7**	**10**	**7**	**7**	**7**

A diferença entre os valores médios das duas espécies indica que o ataque de *N. corniger* provocou danos mais expressivos no material controle. O *Pinus* spp. foi utilizado como controle suscetível por apresentar menor resistência natural ao ataque de cupins, permitindo verificar a atividade dos insetos durante o ensaio e estabelecer uma referência para comparação com o mogno africano. Assim, o maior desgaste observado no *Pinus* spp., em contraste com a manutenção da integridade superficial da maioria das amostras de *K. grandifoliola*, reforça a

maior resistência biológica do mogno africano nas condições avaliadas. Essa resistência pode estar associada à interação entre características químicas, físicas e anatômicas da madeira, não sendo explicada isoladamente pelo teor de extrativos.

A caracterização química estrutural da madeira de mogno africano (*K. grandifoliola*) (Tabela 3) apresentou teores médios de 8,34% de extrativos, 29,58% de lignina total e 62,08% de holoceluloses.

Tabela 3 - Médias da caracterização química estrutural da madeira de mogno africano (*K. grandifoliola*)

Árvore	Extrativos (%)	Lignina total (%)	Holoceluloses (%)
1	7,34	29,81	62,85
2	9,44	29,89	60,66
3	8,71	29,1	62,19
4	7,53	29,56	62,91
5	8,04	29,63	62,33
6	8,95	29,5	61,54
Média	**8,34**	**29,58**	**62,08**

O teor médio de extrativos obtido para a madeira de *Khaya grandifoliola* foi de 8,34%, valor superior aos teores relatados para a madeira de *Pinus taeda*, de 2,83% e 3,76%, encontrados por Vivian et al. (2015) e Vedovotto et al. (2026), respectivamente. Para a madeira de *Pinus elliottii*, Delucis et al. (2017) encontraram teor de extrativos de 2,45% em madeira sem casca. Dessa forma, a madeira de mogno-africano avaliada apresentou teor relativamente elevado de extrativos em comparação aos valores reportados para essas espécies de *Pinus*. Entretanto, essa comparação deve ser interpretada com cautela, em razão das diferenças entre os materiais, das condições de amostragem e dos procedimentos analíticos empregados nos estudos.

Diferentemente do esperado com base na literatura, que associa maiores teores de extrativos a maior resistência biológica (Paes et al., 2015), os resultados deste estudo não confirmaram essa relação direta. A árvore A2 apresentou o maior teor de extrativos (9,44%) e, simultaneamente, as menores notas médias de desgaste, enquanto as árvores A1, A4, A5 e A6, apesar de teores variáveis de extrativos, lignina e holocelulose, mantiveram nota 10 em todas as amostras. Esse padrão indica que, para a madeira de mogno africano nas condições avaliadas, o teor de extrativos isoladamente não explica a resistência ao ataque de *N. corniger*, reforçando que a resistência biológica decorre da interação entre diferentes características químicas, físicas

e anatômicas, como densidade, proporção de cerne e alburno, posição radial e composição dos extrativos, e não pode ser atribuída a um único componente isolado (Paes et al., 2009; Antwi-Boasiako; Allotey, 2010).

O registro fotográfico (Apêndice A) corroborou os resultados quantitativos: amostras com nota 10 mantiveram integridade superficial, sem perfurações ou galerias aparentes, enquanto as amostras da árvore A2 e do controle de *Pinus* spp. apresentaram alterações compatíveis com ataque moderado, consistentes com as notas atribuídas.

Além da limitação normativa já mencionada, decorrente da adaptação da AWPA E1, originalmente voltadas a cupins subterrâneos, para uma espécie arborícola, soma-se o tamanho amostral reduzido (12 amostras de mogno e 6 de controle, provenientes de seis e uma árvore, respectivamente), a condução em colônia única de *N. corniger* e a natureza subjetiva da avaliação visual do desgaste, ainda que mitigada pelo uso de múltiplos examinadores. Esses fatores recomendam cautela na extrapolação dos resultados para condições de campo. Estudos complementares, com maior número de árvores e colônias, diferentes posições no tronco e exposição em ambiente natural, são necessários para confirmar o desempenho da madeira em condições reais de uso.

4. Conclusões

A madeira de *K. grandifoliola* apresentou elevada resistência visual ao ataque do cupim arborícola *N. corniger* nas condições de campo avaliadas, com desempenho superior ao do material controle (*Pinus* spp.), o que reforça seu potencial para aplicações de maior valor agregado. A variação pontual observada na árvore A2 indica que a resistência biológica da madeira decorre da interação entre propriedades químicas, físicas e anatômicas, não podendo ser atribuída a um único componente isolado.

Recomenda-se, entretanto, a realização de estudos complementares com maior número de árvores, diferentes posições no tronco e exposição em condições de campo, a fim de confirmar o desempenho da espécie em situações reais de uso e ampliar a segurança de sua indicação tecnológica.

5. Agradecimentos

Agradeço à EMBRAPII pela concessão da bolsa e à empresa Symbiosis Investimentos pelo fornecimento do material utilizado nesta pesquisa.

Referências bibliográficas

Antwi-Boasiako, C., & Allotey, A. (2010). The effect of stake dimension on the field performance of two hardwoods with different durability classes. International Biodeterioration & Biodegradation, 64(4), 267–273.

Delucis, R. D. A., Santos, P. S. B. D., Beltrame, R., & Gatto, D. A. (2017). Chemical and fuel properties of forestry wastes from pine plantations. Revista Árvore, 41(5), e410507.

Food and Agriculture Organization of the United Nations. (n.d.). Planted forests. https://www.fao.org/forestry/our-focus/forest-management/planted-forests/en

Medeiros, J. C. G. de, Medeiros Neto, P. N. de, Antas, R. N., Silva, A. S. L. da, Cortez, L. E. B., & Araújo, L. V. C. de. (2024). Caracterização físico-química da madeira de Khaya grandifoliola. Agropecuária Científica no Semiárido, 20(2), 52–54. https://doi.org/10.30969/5xkrwh19

Ndulue, N. B., Omole, A. O., Oluwadare, A. O., & Iyiola, E. A. (2023). Natural durability of Khaya grandifoliola stem and branchwood against termite infestation. Pro Ligno, 19(1), 52–63.

Nogueira Junior, L. R. (2023). Estoque e sequestro de carbono em florestas e sistemas de produção agrícola: Software InVEST. In S. G. Tosto, L. C. Pereira, M. A. F. Gomes, & J. A. Rodrigues (Eds.), Serviços ecossistêmicos e serviços ambientais de solo, água e carbono: Amazônia (Cap. 6, pp. 147–157). Embrapa. https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1157740

Owoyemi, J. M., Aliyu, D. I., & Olaniran, S. O. (2013). Effect of density on the natural resistance of ten selected Nigerian wood species to subterranean termites. Pro Ligno, 9(1), 32–40.

Paes, J. B., Morais, V. de M., Lima, C. R. de, & Santos, G. J. C. dos. (2009). Resistência natural de nove madeiras do semiárido brasileiro a fungos xilófagos em simuladores de campo. Revista Árvore, 33(3), 511–520. https://doi.org/10.1590/S0100-67622009000300013

Paes, J. B., Brocco, V. F., Moulin, J. C., Motta, J. P., & Alves, R. C. (2015). Efeitos dos extrativos e da densidade na resistência natural de madeiras ao térmita Nasutitermes corniger. Cerne, 21(4), 569–578. https://doi.org/10.1590/01047760201521041849

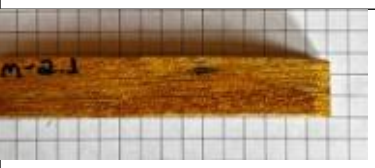
Ribeiro, A., Ferraz Filho, A. C., & Scolforo, J. R. S. (2017). O cultivo do mogno africano (Khaya spp.) e o crescimento da atividade no Brasil. Floresta e Ambiente, 24, e00076814. https://doi.org/10.1590/2179-8087.076814

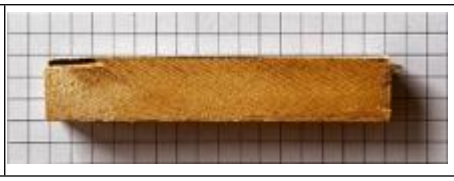
Santana, A. L. B. D., Maranhão, C. A., Santos, J. C., Cunha, F. M., Conceição, G. M., Bieber, L. W., & Nascimento, M. S. (2010). Antitermitic activity of extractives from three Brazilian hardwoods against Nasutitermes corniger. International Biodeterioration & Biodegradation, 64(1), 7–12. https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2009.07.009

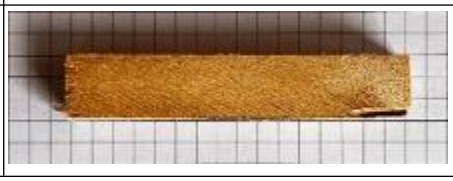
Vedovotto, D. O. H. M., Farias, D. T. D., Roubuste, R. R., Wacht, W. L., Silva, D. M. D., Monteiro, C. R., … Pedrazzi, C. (2026). Estudo comparativo dos componentes químicos da madeira de Pinus taeda na polpação kraft. Ciência Florestal, 36, e93109.

Vivian, M. A., Segura, T. E. S., Bonfatti Júnior, E. A., Sarto, C., Schmidt, F., Silva Júnior, F. G. D., … Fardim, P. (2015). Qualidade das madeiras de Pinus taeda e Pinus sylvestris para a produção de polpa celulósica kraft. Scientia Forestalis, 43(105), 183–191

915. Apêndice A

Amostras de mogno africano (*K. grandifoliola*) - Antes			Amostras de mogno africano (*K. grandifoliola*) -
Frente	Verso		Frente	Ve
		Amostra 1.1		
		Amostra 2.1		
		Amostra 3.1		
		Amostra 4.1		
		Amostra 5.1		

		Amostra 6.1		

Amostras de mogno africano (*K. grandifoliola*) - Antes			Amostras de mogno africano (*K. grandifoliola*) -	
Frente	Verso		Frente	Ve
		Amostra 1.2		
		Amostra 2.2		
		Amostra 3.2		
		Amostra 4.2		
		Amostra 5.2		
		Amostra 6.2		

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Avaliação da resposta espectral Raman de madeiras nativas de interesse forense

Lúcia Silva Prado[1]; José Henrique Camargo Pace[1]; Natália Toledo Galvão Leal[2]; Marcelo Garcia de Barros[3]; Jez Willian Batista Braga[2]; Jefferson Luan Gonçalves Veras[1]

[1] Departamento de Engenharia Florestal, Universidade de Brasília
[2] Instituto de Química, Universidade de Brasília
[3] Instituto Nacional de Criminalística, Polícia Federal

Resumo: A identificação de madeiras comercializadas ilegalmente representa um desafio para a fiscalização ambiental. Neste trabalho, avaliou-se o potencial da espectroscopia Raman portátil, associada a ferramentas quimiométricas, para a diferenciação de gêneros madeireiros de interesse forense em testes laboratoriais. Foram analisadas amostras comerciais pertencentes aos gêneros *Allantoma*, *Cariniana* e *Couratari*, com obtenção de espectros em madeira maciça e em extrativos obtidos com Álcool 80% e Acetonitrila, nos modos suspensão de pó de madeira com solvente e sobrenadante. Os dados espectrais foram submetidos a pré-processamentos e analisados por Análise de Componentes Principais (PCA) e Análise Discriminante por Mínimos Quadrados Parciais (PLS-DA). Os resultados indicaram que o modo de preparo amostral constitui a principal fonte de variação espectral, sobrepondo-se à variação de origem taxonômica.

Palavras-chave: Comércio ilegal; Química da madeira; Espectroscopia Raman; Quimiometria.

Evaluation of the Raman spectral response of native woods of forensic interest

Abstract: The identification of illegally traded timber represents a challenge for environmental enforcement. This study evaluated the potential of portable Raman spectroscopy, combined with chemometric tools, for the differentiation of timber genera of forensic interest under laboratory conditions. Commercial samples belonging to the genera *Allantoma*, *Cariniana*, and *Couratari* were analyzed, with spectra acquired from solid wood and from extractives obtained with 80% Ethanol and Acetonitrile, in two preparation modes: wood powder suspension in solvent and supernatant. The spectral data were subjected to preprocessing and analyzed by Principal Component Analysis (PCA) and Partial Least Squares Discriminant Analysis (PLS-DA). The results indicated that the sample preparation mode constitutes the main source of spectral variation, overriding taxonomic variation.

Keywords: Illegal trade; Wood chemistry; Raman spectroscopy; Chemometrics.

1. Introdução

A exploração e a comercialização ilegais de madeira impulsionam o desmatamento, demandando ações institucionais para combater o tráfico e proteger espécies comerciais (Soares et al., 2017). Contudo, a fiscalização ambiental enfrenta gargalos no combate a essa prática, pois os métodos convencionais de identificação baseados em análises anatômicas e morfológicas exigem material botânico completo e elevado conhecimento específico, escasso frente à alta demanda. Diante desse cenário, torna-se urgente o desenvolvimento de ferramentas tecnológicas que automatizem e otimizem a identificação de espécies florestais, garantindo maior eficiência, celeridade e confiabilidade ao processo de controle em campo.

Atualmente, a eficiência da fiscalização florestal em campo tem sido impulsionada pelo uso de equipamentos portáteis, destacando-se a espectroscopia no infravermelho próximo (NIRS) na discriminação de espécies de madeira por meio do perfil de absorção de seus componentes moleculares (Moreira et al., 2026; Tsuchikawa et al., 2003; Soares et al., 2017; Tsuchikawa, 2007). Contudo, a NIRS apresenta desempenho ideal em amostras secas, sendo a água um fator limitante que exige padronização (Silva et al., 2018; Soares et al., 2017; Bergo et al., 2016). Em contrapartida, a espectroscopia Raman sofre menor interferência da umidade, configurando-se como uma alternativa promissora para análises in situ de materiais úmidos (Smith; Dent, 2019; Nascimento Dias, 2025).

Para viabilizar o uso prático dessa abordagem na fiscalização, faz-se necessário desenvolver bibliotecas espectrais e modelos quimiométricos focados em táxons vulneráveis ao comércio ilegal, especialmente aqueles comercializados sob nomes populares genéricos que agrupam diferentes espécies e níveis de proteção legal, como o "tauari", frequentemente oriundas de gêneros distintos da família Lecythidaceae (Bernal et al., 2011; Brasil, 2022). Embora a espectroscopia Raman permita a análise direta e não destrutiva da madeira maciça, a assinatura química superficial pode ser insuficiente para discriminar táxons anatomicamente próximos. Para contornar essa limitação, a análise dos extrativos obtidos por protocolos simplificados surge como uma estratégia complementar promissora para o contexto forense (Monteiro et al., 2026), permitindo comparar a eficiência discriminatória dos espectros obtidos na madeira maciça e em suas frações solubilizadas.

A composição química dos extrativos apresenta maior variabilidade taxonômica entre gêneros do que os componentes estruturais majoritários da madeira (celulose, hemicelulose e lignina). Como a espectroscopia Raman é particularmente sensível a grupos funcionais característicos desses, a análise direcionada dos extrativos obtidos por solventes de polaridades distintas, que maximizam a captura de diferentes classes químicas, pode ampliar o poder

discriminatório em relação à análise da madeira maciça isoladamente. Hipotetiza-se, portanto, que o perfil espectral Raman dos extrativos, combinado ao da madeira maciça, seja capaz de discriminar gêneros anatomicamente próximos, como os associados ao "tauari", com maior sensibilidade do que a análise da madeira maciça isoladamente.

Dessa forma, o atual trabalho tem como objetivo avaliar o potencial da espectroscopia Raman associada à análise dos extrativos de madeira de interesse forense. Por objetivos específicos, a obtenção dos espectros Raman da madeira maciça, e dos extrativos extraídos por Álcool 80% e Acetonitrila e o desenvolvimento de modelos de classificação utilizando o conjunto combinado de espectros da madeira maciça e dos extrativos, avaliando a discriminação taxonômica dos gêneros estudados.

2. Material e métodos

2.1. Amostragem e identificação taxonômica

Foram coletadas seis amostras de tábuas comerciais de madeira no Distrito Federal. A confirmação taxonômica foi realizada por análise macroscópica no Laboratório de Produtos Florestais (LPF), identificando três gêneros da família Lecythidaceae, representados por duas amostras cada: *Allantoma*, *Cariniana* e *Couratari*.

2.2. Preparo e aquisição de espectros da madeira maciça

A aquisição dos espectros Raman foi feita diretamente na madeira maciça seccionada, cobrindo as faces radial e tangencial em três regiões por amostra (12 a 18 leituras por tábua), totalizando 102 espectros. Utilizou-se um espectrômetro Raman portátil (Rigaku ResQ™ CQ, laser de 1064 nm), com potência de 490 mW, exposição de 3000 ms, 10 varreduras/medida e distância focal de 0,5 mm.

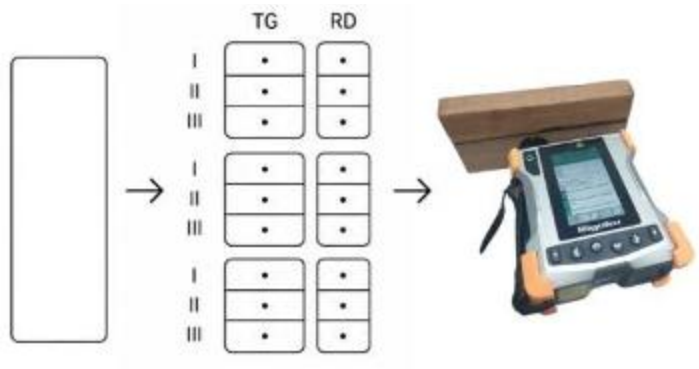


Figura 1 – Fluxograma do preparo das amostras para aquisição dos espectros da madeira maciça, I. II. III representando a região da amostra e (•) simbolizando as leituras.

2.3. Extração e aquisição dos espectros dos extrativos

O pó de madeira, obtido por perfurações nos planos tangencial, radial e transversal, foi misturado, moído manualmente e pesado em vials de vidro (0,2 g por vial). Testou-se o uso de Álcool 80% e Acetonitrila, adicionando-se 3 mL de solvente por frasco, seguido de agitação manual por 1 minuto e repouso mínimo de 30 minutos. Os espectros foram coletados com os parâmetros de potência e tempo da madeira maciça, com distância focal ajustada para 2,5 mm, além do registro de espectros dos solventes puros para a subtração do branco. O preparo de três réplicas por solvente para cada uma das seis amostras de madeira, avaliando-se tanto as suspensões com pó quanto os sobrenadantes transferidos, gerou 12 unidades experimentais por amostra, totalizando 72 vials analisados e 216 espectros, 3 para cada vial.

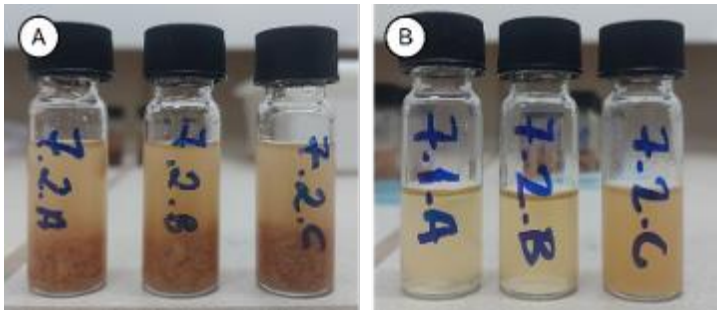


Figura 3 – Ilustração dos modos de preparo dos extrativos. (A) Vial com a suspensão de pó de madeira e solvente. (B) Sobrenadante.

2.4. Tratamento de dados e modelagem quimiométrica

Os dados espectrais foram processados no ambiente MATLAB®. Aplicou-se o alisamento por Savitzky-Golay, a variação normal padrão (SNV) e o centramento na média para mitigação de ruídos e efeitos aditivos/multiplicativos de espalhamento. A Análise de Componentes Principais (PCA) foi utilizada para avaliação exploratória de agrupamentos e detecção de outliers (limites de T^2 de Hotelling e resíduos Q), sendo definidos 3 componentes principais (PCs).

Por fim, avaliou-se a capacidade discriminatória por Análise Discriminante por Mínimos Quadrados Parciais (PLS-DA). Do total de 318 espectros analisados, 212 (2/3) foram destinados à calibração do modelo e 106 (1/3) à validação independente, seguindo uma divisão sistemática na qual, a cada três espectros consecutivos, dois foram alocados à calibração e um à validação. O número de variáveis latentes (VLs) do modelo PLS-DA foi definido a partir da

validação cruzada pelo método *venetian blinds*, adotando-se como critério de seleção o menor valor de erro de classificação, resultando em um modelo com 4 VLs.

3. Resultados e discussão

3.1. Espectros Raman

3.1.1. Madeira maciça e extrativos

Quando comparados os espectros médios de todas as amostras de madeiras com os espectros médios dos extrativos da suspensão de pó de madeira e solvente e dos sobrenadantes é evidenciada a diferença da feição (Figura 4). De certo, espera-se que os espectros acompanhem a diferença da composição química dos solventes, no entanto, bandas características das madeiras não foram apresentadas nos espectros dos extrativos, a exemplo dos picos nas regiões de 895 cm^{-1}, referente a celulose cristalina e/ou amorfa, 1124 cm^{-1}, lignina e holocelulose, 1151 cm^{-1}, para celulose, e 1597 cm^{-1} pico característico da lignina (Gunduz et al., 2016).

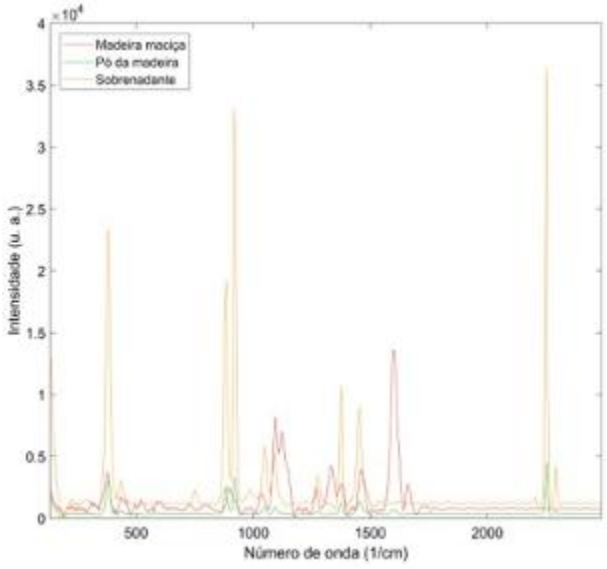


Figura 4 – Espectros Raman médios comparados de madeira maciça, extrativos com o pó da madeira e do sobrenadante

No entanto, a média dos espectros da suspensão do pó de madeira em solvente apresentou maior semelhança com os espectros das madeiras maciças, com destaque para as bandas associadas à holocelulose (377 cm^{-1}) e à lignina (1597 cm^{-1}). Essas bandas não foram observadas no sobrenadante.

3.2. Modelos supervisionados para discriminação de madeira maciça e dos extrativos

3.2.1. Análise de Componentes Principais (PCA)

A análise de componentes principais (PCA) revelou que o preparo da amostra é o fator determinante na variabilidade espectral, explicando 97,53% da variância total (PC1 67,67% e PC2 29,86%) e promovendo uma separação nítida entre madeira maciça, suspensão e sobrenadante (Figura 5.A).

Enquanto o sobrenadante apresentou maior homogeneidade e menor dispersão, a madeira maciça refletiu variações taxonômicas entre gêneros, e a suspensão de pó demonstrou sensibilidade ao solvente utilizado, reforçando que a estratégia de preparação influencia diretamente a precisão e a capacidade de discriminação dos modelos quimiométricos. No entanto, a distinção entre gêneros não foi observada, contrapondo-se com os resultados obtidos por Kusnierek et al. (2024**)** em estudo comparativo entre diferentes modos de preparo, o qual demonstrou que o resultado do modelo é afetado tanto pela técnica de preparação da amostra quanto pela espécie de madeira.

As disparidades observadas nos perfis espectrais entre a Acetonitrila e o Álcool 80% decorrem da diferença de seletividade de cada solvente. A Acetonitrila possui uma polaridade intermediária e extrai um conjunto mais restrito e seletivo de metabólitos, o que resulta em espectros Raman mais homogêneos. Essa seletividade foi observada por Moreira (2019) em testes de extração para biodiesel, enquanto Souza e Corio (2019) demonstraram que a Acetonitrila é capaz de estabilizar monômeros e evitar a agregação molecular, garantindo sinais espectrais mais limpos e representativos, o que é essencial para o sucesso da diferenciação por métodos quimiométricos.

Por outro lado, o Álcool 80% apresenta uma capacidade maior de extrair compostos polares e semipolares. De acordo com Sarto e Sansigolo (2010), essa abrangência contribui para uma maior complexidade química dos extratos, o que eleva a variabilidade e a dispersão dos dados observados na PCA.

O diagnóstico por Hotelling T^2 e resíduos Q confirmou a robustez do modelo, com a maioria das amostras dentro do limite de confiança de 95%, embora o uso de Acetonitrila tenha gerado resíduos Q mais elevados, indicando nuances na composição ou heterogeneidade da suspensão não capturadas integralmente pela PCA.

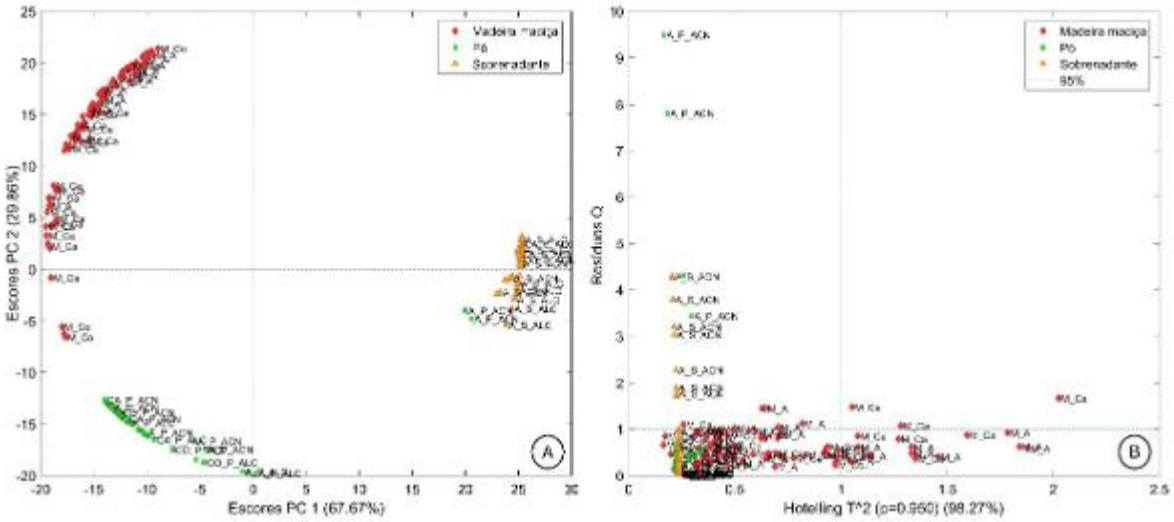


Figura 5 – (A) Escores da análise PCA para os três tipos de preparo amostral. (B) Resíduos Q versus Hotelling T² para o modelo PCA para os três tipos de preparo amostral.

3.2.2. Análise Discriminante por Quadrados Mínimos Parciais (PLS-DA)

O modelo PLS-DA aplicado ao conjunto completo de amostras (madeira maciça, suspensão e sobrenadante) demonstrou desempenho diagnóstico e classificatório superior ao PCA. Na Figura 6.A, que apresenta Hotelling T² vs. resíduos Q, a maioria das amostras encontra-se dentro dos limites de 95%, com o modelo concentrando menor dispersão em Q em comparação ao PCA.

A Figura 6.B, que apresenta os pesos das variáveis latentes, revela que LV1 (71,65%) é dominada pela banda em 900 cm^{-1}, sendo responsável pela separação do sobrenadante em relação aos demais grupos. LV2 (26,41%) apresenta pesos positivos em 1550–1600 cm^{-1} e negativos em 1300 cm^{-1}, discriminando madeira maciça do pó, com contribuições adicionais em 900 e 2300 cm^{-1}. LV3 (0,39%) não apresenta relevância interpretativa. As regiões espectrais discriminantes coincidem com bandas características de lignina e polissacarídeos (GUNDUZ et al., 2016).

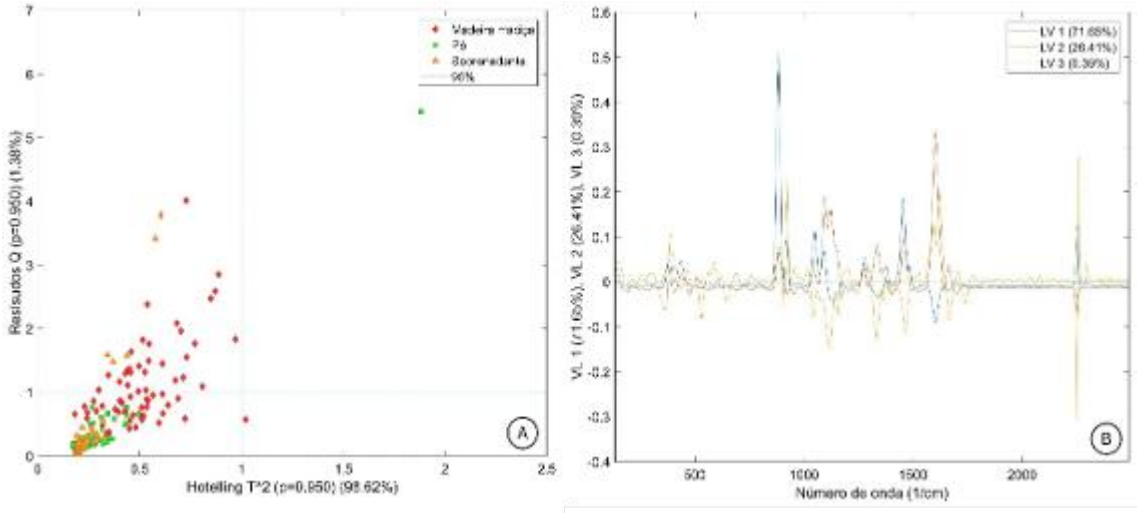


Figura 6 – (A) Resíduos Q versus Hotelling T² para o modelo PCA para os três tipos de preparo amostral. (B) Pesos das variáveis latentes 1, 2 e 3.

Todas as amostras de madeira maciça foram corretamente atribuídas acima do limite de discriminação, com pó e sobrenadante rejeitados; o pó foi discriminado com apenas uma ou duas amostras próximas ao limite; e o sobrenadante apresentou a separação mais nítida, confirmando que esse modo de preparo produz a assinatura espectral mais distinta e facilmente discriminável pelo modelo (Figura 7).

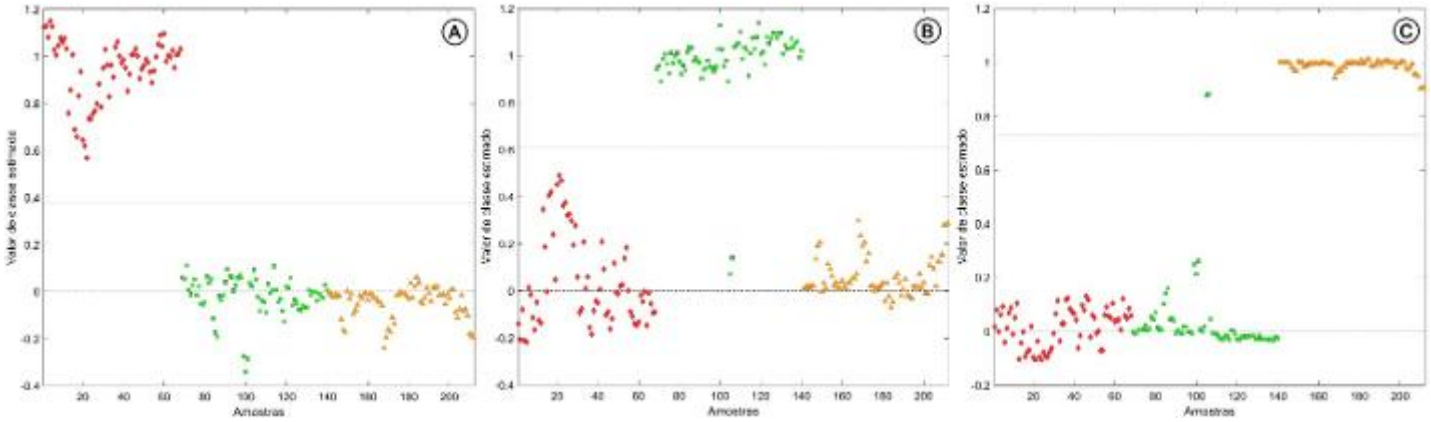


Figura 7 – Distribuição dos valores estimados do conjunto de treinamento e validação para os modelos PLS-DA para os três modos de preparo amostral. (A) Madeira (B) Pó (C) Sobrenadante.

Estudos futuros devem ampliar a amostragem biológica, de forma a contemplar a variabilidade química intragênero e aumentar a robustez dos modelos quimiométricos, juntamente com a validação da técnica em campo, fatores que foram limitantes no trabalho

atual. Recomenda-se ainda o desenvolvimento de modelos supervisionados de discriminação intergênero por modo de preparo amostral. A expansão do estudo para outros gêneros da família Lecythidaceae e para espécies de diferentes famílias botânicas de interesse forense contribuiria para a construção de bibliotecas espectrais robustas, viabilizando, em longo prazo, a aplicação da técnica como ferramenta complementar à identificação anatômica convencional na fiscalização do comércio madeireiro.

4. Conclusões

O presente trabalho atingiu seu objetivo de avaliar o potencial da espectroscopia Raman portátil associada à análise dos extrativos para a discriminação de gêneros madeireiros de interesse forense. A obtenção dos espectros Raman foi viável tanto para a madeira maciça quanto para os extrativos em Álcool 80% e Acetonitrila, confirmando a aplicabilidade da técnica aos diferentes modos de preparo propostos. Contudo, os modelos de classificação desenvolvidos a partir do conjunto combinado de espectros não discriminaram os gêneros *Allantoma*, *Cariniana* e *Couratari*, uma vez que o modo de preparo amostral se mostrou a principal fonte de variação espectral, sobrepondo-se à variação de origem taxonômica. Ainda assim, a maior similaridade dos espectros da suspensão de pó de madeira com os da madeira maciça sugere esse modo de preparo como o mais promissor para etapas subsequentes de discriminação taxonômica.

5. Agradecimentos

Agradecimentos ao Instituto Nacional de Criminalística da Polícia Federal (INC/PF), ao Laboratório de Produtos Florestais (LPF) do Serviço Florestal Brasileiro (SFB/MMA) e ao Laboratório de Automação, Quimiometria e Química Ambiental (AQQUA) do Instituto de Química da UnB.

6. Referências bibliográficas

Bergo, M. C., Pastore, T. C., Coradin, V. T., Wiedenhoeft, A. C., & Braga, J. W. (2016). NIRS identification of Swietenia macrophylla is robust across specimens from 27 countries. Iawa Journal, 37(3), 420-430. https://doi.org/10.1163/22941932-20160144

Bernal, R. A., Coradin, V., Camargos, J., Costa, C., & Pissarra, J. (2011). Wood anatomy of Lecythidaceae species called “Tauari”. Iawa Journal, 32(1), 97-112. https://doi.org/10.1163/22941932-90000046

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente (MMA). Portaria nº 148, de 7 de junho de 2022. Altera os Anexos da Portaria nº 443, de 17 de dezembro de 2014, da Portaria nº 444, de 17 de

dezembro de 2014, e da Portaria nº 445, de 17 de dezembro de 2014, referentes à atualização da Lista Nacional de Espécies Ameaçadas de Extinção. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 8 jun. 2022.

Gunduz, G., Oral, M. A., Akyuz, M., Aydemir, D., Yaman, B., Asik, N., ... & Allahverdiyev, S. (2016). Propriedades físicas e morfológicas e espectroscopia raman de madeira de Castanea sativa Mill. Afetada pelo cancro do castanheiro. Cerne, 22, 43-58. https://doi.org/10.1590/01047760201622012101

Kusnierek, K., Woznicki, T., & Treu, A. (2024). Quality control of wood treated with citric acid and sorbitol using a handheld Raman spectrometer. Journal of Cleaner Production, 434, 139925.

Monteiro, T. V., Fioramonte, M., Pirolla, R., Gontijo, A. B., Nascimento, C. S., Higuchi, N., ... & Fasciotti, M. (2026). Real-Time Wood Chemotyping Using a Low-Cost and Compact Mass Spectrometer. *ACS omega*, *11*(10), 16687-16699. https://doi.org/10.1021/acsomega.5c13161

Moreira, J. D. B. D., de Rezende, D. B., & Pasa, V. M. D. (2019). Solventes alternativos para desacidificação do óleo de polpa de Macaúba por extração líquido-líquido para produção de biodiesel. https://hdl.handle.net/1843/55765

Nascimento-Dias, B. L. D. (2025). Raman Spectroscopy: A concise review from Applied Physics and its use in Astrobiology research. Revista Brasileira de Ensino de Física, 47, e20250271. https://doi.org/10.1590/1806-9126-RBEF-2025-0271

Sarto, C., & Sansigolo, C. A. (2010). Cinética da remoção dos extrativos da madeira de Eucalyptus grandis durante polpação Kraft. *Acta Scientiarum. Technology*, *32*(3), 227-235. http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=303226528012

Silva, D. C., Pastore, T. C., Soares, L. F., de Barros, F. A., Bergo, M. C., Coradin, V. T., ... & Braga, J. W. (2018). Determination of the country of origin of true mahogany (Swietenia macrophylla King) wood in five Latin American countries using handheld NIR devices and multivariate data analysis. *Holzforschung*, *72*(7), 521-530. https://doi.org/10.1515/hf-2017-0160

Smith, E., & Dent, G. (2019). *Modern Raman spectroscopy: a practical approach*. John Wiley & Sons.

Soares, L. F., Silva, D. C. D., Bergo, M. C., Coradin, V. T., Braga, J. W., & Pastore, T. C. (2017). Avaliação de espectrômetro NIR portátil e PLS-DA para a discriminação de seis espécies similares de madeiras amazônicas. Química nova, 40(4), 418-426. https://doi.org/10.21577/0100-4042.20170014

Souza, M. L. D., & Corio, P. (2019). Investigação do solvatocromismo e ionocromismo do corante azul do nilo através das espectroscopias Raman, Infravermelho e UV-Vis. *Química Nova*, *42*(9), 1091-1097. https://doi.org/10.21577/0100-4042.20170432

Tsuchikawa, S., Inoue, K., Noma, J., & Hayashi, K. (2003). Application of near-infrared spectroscopy to wood discrimination. Journal of Wood Science, 49(1), 0029-0035. https://doi.org/10.1007/s100860300005

Tsuchikawa, S. (2007). A review of recent near infrared research for wood and paper. Applied Spectroscopy Reviews, 42(1), 43-71. https://doi.org/10.1080/05704920601036707

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Avaliação da variação radial da densidade básica da madeira de espécies nativas da Mata Atlântica

Murilo Pereira da Silva[1]; Wallace Plácido dos Santos[1]; Calline Chaves de Jesus[1]; João Vitor Morais da Silva[1]; Mara Lúcia Agostini Valle[1]; Ricardo Gabriel de Almeida Mesquita[1]

[1] Universidade Federal do Sul da Bahia

Resumo: A Mata Atlântica abriga elevada diversidade de espécies florestais, porém muitas ainda apresentam lacunas de conhecimento quanto às propriedades tecnológicas de suas madeiras. Entre essas propriedades, destaca-se a densidade básica, considerada um dos principais parâmetros para avaliação de potencial de uso. O objetivo desse estudo foi avaliar a variação radial da densidade básica da madeira de cinco espécies nativas da Mata Atlântica: *Simarouba versicolor*, *Pseudalbizzia polycephala*, *Protium heptaphyllum*, *Himatanthus drasticus* e *Cordia* spp. As amostras foram coletadas no município de Itacaré, Bahia, utilizando discos retirados à altura do peito de três indivíduos por espécie. Os corpos de prova foram obtidos em três posições radiais (medula, intermediária e casca). A densidade básica foi determinada conforme a NBR 11941. Os dados foram analisados por estatística descritiva, Anova e teste de Tukey a 5% de probabilidade. A partir da análise dos resultados obtidos, a única espécie que apresentou baixa densidade foi a *S. versicolor*, as demais apresentaram média densidade. Não foram observadas diferenças estatisticamente significativas entre as posições radiais para *Protium heptaphyllum*, *Himatanthus drasticus* e *Cordia* spp. Os resultados demonstram que a magnitude e a direção da variação radial da densidade básica diferem entre as espécies avaliadas

Palavras-chave: Madeira Nativa; Silvicultura; Tecnologia da Madeira.

Evaluation of the radial variation of basic wood density in native species of the Atlantic Forest.

Abstract: The Atlantic Forest harbors a high diversity of forest species; however, many of them still have knowledge gaps regarding the technological properties of their wood. Among these properties, basic density stands out as one of the main parameters for assessing wood use potential. The objective of this study was to evaluate the radial variation in the basic density of wood from five native species of the Atlantic Forest: *Simarouba versicolor*, *Pseudalbizzia polycephala*, *Protium heptaphyllum*, *Himatanthus drasticus*, and *Cordia* spp. Samples were collected in the municipality of Itacaré, Bahia, using discs obtained at breast height from three individuals of each species. Test specimens were obtained from three radial positions (pith, intermediate, and bark). Basic density was determined according to NBR 11941. The data were analyzed using descriptive statistics, analysis of variance (ANOVA), and Tukey's test at a 5% probability level. Based on the results obtained, the only species that presented low density was S. versicolor, whereas the other species presented medium density. No statistically significant differences among radial positions were observed for *Protium heptaphyllum*, *Himatanthus drasticus*, and *Cordia* spp. The results demonstrate that the magnitude and direction of radial variation in basic density differ among the species evaluated.

Keywords: Native Wood; Silviculture; Wood Technology.

1. Introdução

A Mata Atlântica é um dos biomas brasileiros com elevada diversidade biológica, sendo reconhecido como um dos *hotspots* mundiais de biodiversidade (Resende et al., 2024). Originalmente, a cobertura vegetal dessa floresta ocupava cerca de 15% do território nacional. Em decorrência do intenso processo de urbanização, atualmente passou a representar apenas 1,86% do território brasileiro (Martins et al., 2021).

Como resposta ao avanço do desmatamento, observa-se a ampliação de iniciativas voltadas ao reflorestamento e à criação de unidades de conservação na Mata Atlântica. Paralelamente, tem-se intensificado o incentivo ao cultivo comercial de espécies nativas, o que evidencia a necessidade de consolidar conhecimentos silviculturais específicos para essas espécies (Krainovic, Resende & Amazonas, 2023). Nesse contexto, torna-se igualmente fundamental aprofundar os estudos sobre as propriedades tecnológicas de suas madeiras, a fim de subsidiar o manejo adequado e ampliar as possibilidades de uso sustentável (Rolim & Piotto, 2018).

A madeira, por ser um material de origem biológica, apresenta comportamento heterogêneo, variando entre diferentes espécies, entre indivíduos distintos, e, dentro de um mesmo indivíduo (Silva; Jesus & Valle, 2025). Fatores como o uso de diferentes materiais genéticos, os tratos silviculturais e a aplicação de insumos, podem provocar alterações fisiológicas que afetam diretamente a formação da madeira (Matos et al., 2003). Essas mudanças podem modificar a arquitetura da árvore, bem como os padrões e as taxas de crescimento, refletindo nas características tecnológicas da madeira.

Uma das propriedades tecnológicas da madeira altamente relevante é a densidade básica, que representa a quantidade de matéria lenhosa seca presente na madeira por unidade de volume saturado da mesma. Sendo uma propriedade física fundamental, ela constitui um dos principais parâmetros para inferir o potencial de uso e qualidade da madeira, estando diretamente relacionada ao seu desempenho mecânico, à resistência e ao rendimento industrial (Nock et al., 2009; Cabral et al., 2022). Além disso, permite estimar a quantidade de biomassa e estoque de carbono presente na árvore, sendo amplamente utilizada em estudos de manejo florestal e balanço de carbono (Romero et al., 2024).

O conhecimento da variação da densidade básica na madeira é fundamental para aprimorar processos em que essa propriedade é determinante. Para a produção de celulose, por

exemplo, madeiras de menor densidade são preferidas, pois proporcionam maior rendimento e eficiência no processo de polpação (Gonçalves, 2007). Já na produção de carvão vegetal, densidades mais elevadas são desejáveis, uma vez que carvões mais densos apresentam maior energia por unidade de volume e maior resistência mecânica em altos-fornos (Santos et al., 2025). Para a fabricação de móveis, a densidade ideal pode variar conforme o tipo de produto a ser desenvolvido (Kelleci et al, 2025).

No contexto das espécies florestais nativas brasileiras, especialmente da Mata Atlântica, ainda é reduzido o número de estudos que abordam suas propriedades tecnológicas. Diante dessa lacuna, o presente trabalho tem como objetivo avaliar a variação da densidade básica da madeira de cinco espécies nativas da Mata atlântica, incluindo o Pau-paraíba (*Simarouba versicolor* A. St.-Hil.), Monzê (*Pseudalbizzia polycephala* (Benth.) E.J.M. Koenen), Amescla (*Protium heptaphyllum* (Aubl.) Marchand), Janaúba (*Himatanthus drasticus* (Mart.) Plumel) e Claraíba (*Cordia* spp.).

2. Material e métodos

As amostras de madeira foram coletadas na zona rural do município de Itacaré no sul da Bahia, nas proximidades da comunidade João Rodrigues (15°05'13.4"S; 39°00'34.4"W). Foram selecionadas, de forma aleatória, cinco espécies nativas da região. Sendo elas: *Simarouba versicolor* A. St.-Hil., *Pseudalbizzia polycephala* (Benth.) E.J.M. Koenen, *Protium heptaphyllum* (Aubl.) Marchand, *Himatanthus drasticus* (Mart.) Plumel e *Cordia* spp. Por se tratar de espécies nativas, não houve abate de árvores para fins desta pesquisa. Assim, foram utilizados exclusivamente indivíduos naturalmente derrubados.

Para cada espécie, foram utilizados três indivíduos caídos naturalmente, totalizando quinze árvores amostradas. Para cada indivíduo, foram obtidos os valores de diâmetro à altura do peito (DAP) e altura total, além da estimativa de idade, realizada por meio de informações fornecidas por moradores locais. Esses dados estão apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 – Caracterização dendrometria e idade estimada dos indivíduos amostrados por espécie, incluindo diâmetro à altura do peito (DAP), altura total e idade estimada para os três indivíduos avaliados (A1, A2 e A3).

Espécie	família	Dap (cm)			Altura (m)			Idade
		A1	A2	A3	A1	A2	A3	
Simarouba versicolor	Simaroubaceae	33,10	40,06	38,95	10	12	11	40
Pseudalbizzia	Fabaceae	22,36	26,96	24,78	8,2	9,6	8,9	30

polycephala								
Protium heptaphyllum	Burseraceae	25,46	25,15	29,28	11	11	12	30
Himatanthus drasticus	Apocynaceae	23,25	25,15	27,06	7	8,5	9	30
Cordia spp.	Boraginaceae	25,15	27,06	22,92	13	15	12	40

Elaborado pelos autores

De cada árvore foi retirado um disco à altura do peito, com aproximadamente 5 cm de espessura. Em seguida, o material foi encaminhado à serraria da Comissão Executiva do Plano da Lavoura Cacaueira (CEPLAC) para a confecção dos corpos de prova. Conforme a norma NBR 11941 (ABNT, 2003), e representação da Figura 1, os discos foram seccionados em cunhas, sendo obtidas e selecionadas cunhas em lados opostos. Cada cunha foi subdividida em três frações radiais, uma próxima à medula (M), uma intermediária entre medula e casca (IN) e outra próxima à casca (CA). No total foram obtidas seis amostras por posição radial para cada espécie, correspondentes a duas cunhas provenientes de cada um dos três indivíduos avaliados, totalizando 18 amostras por espécie e 90 amostras para o conjunto das cinco espécies.

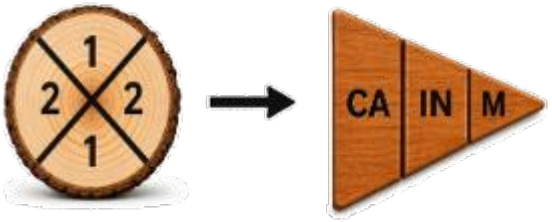


Figura 1 – Secção dos discos em DAP em cunhas, posteriormente fragmentadas na região próxima a medula (M), intermediário entre a casca e a medula (IN) e próximo a casca (CA). Fonte: Elaborado pelos autores.

A avaliação da densidade básica foi realizada no Laboratório Central de Tecnologia e Produtos Florestais (LCTPF), localizado no Centro de Formação em Ciências Agroflorestais (CFCAF) da Universidade Federal do Sul da Bahia (UFSB). As amostras foram inicialmente saturadas em água, permanecendo submersas até atingirem massa constante. O volume saturado foi determinado pelo método de imersão em água, conforme descrito por Vital (1984). Em seguida, as amostras foram acondicionadas em estufa a 103 °C ± 2 °C até atingirem massa seca constante. A densidade básica foi calculada conforme a Equação 1.

$$Db\left(g/cm^3\right)=\frac{Ms}{V} \quad (1)$$

Onde:

Db = Densidade básica (g/cm^3);

Ms = Massa seca (g);

V = Volume saturado (cm^3).

Os dados foram submetidos à análise estatística descritiva, sendo calculados a média, o desvio padrão e o coeficiente de variação. Para cada espécie, as médias de densidade básica entre as posições radiais (medula, intermediária e casca) foram comparadas por análise de variância (ANOVA), ao nível de 5% de probabilidade. Entre as posições radiais, aplicou-se o teste de Tukey ($p \leq 0,05$) para comparação das médias. As análises foram realizadas no software RStudio.

3. Resultados e discussão

Os valores referentes à variação radial da densidade básica das madeiras estudadas estão apresentados na Tabela 2. De acordo com a classificação proposta pela IAWA (1989), *Simarouba versicolor* enquadra-se na categoria de baixa densidade, enquanto, *Pseudalbizzia polycephala*, *Protium heptaphyllum*, *Himatanthus drasticus* e *Cordia* spp. são classificadas como madeiras de média densidade.

Tabela 2 – Valores médios da densidade básica, desvio padrão, coeficiente de variação, p-value e classificação segundo IAWA (1989) para as posições radiais medula (M), intermediária (IN) e casca (CA) das espécies avaliadas

Espécie	Posição	p-value	Densidade (g/cm^3)	Classificação (IAWA, 1989)
Simarouba versicolor	M		0,297 (±0,011; 3,55%) b	Baixa densidade
	IN	0,0469	0,322 (±0,015; 4,51%) ab	Baixa densidade
	CA		0,347 (±0,027; 7,69%) a	Baixa densidade
Pseudalbizzia polycephala	M		0,337 (±0,023; 6,72%) c	Baixa densidade
	IN	0,0005	0,403 (±0,026; 6,36%) b	Média densidade
	CA		0,486 (±0,017; 3,56%) a	Média densidade
Protium heptaphyllum	M		0,579 (±0,016; 2,82%) a	Média densidade
	IN	0,1519	0,626 (±0,036; 5,78%) a	Média densidade
	CA		0,632 (±0,037; 5,86%) a	Média densidade
Himatanthus drasticus	M		0,479 (±0,043; 9,08%) a	Média densidade
	IN	0,4268	0,508 (±0,025; 4,92%) a	Média densidade
	CA		0,514 (±0,027; 5,34%) a	Média densidade
Cordia ssp.	M		0,457 (±0,012; 2,70%) a	Média densidade
	IN	0,0623	0,434(±0,007; 1,69%) a	Média densidade
	CA		0,426(±0,017; 3,96%) a	Média densidade

Médias seguidas de letras iguais nas colunas de cada grupo não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey, a 5% Desvio padrão (±). Coeficiente de variação (%).
Fonte: Elaborado pelos autores.

De modo geral, madeiras de baixa densidade apresentam menor resistência mecânica e maior instabilidade dimensional, sendo mais indicadas para a produção de painéis, móveis leves, embalagens e pequenos objetos de madeira (Cabral et al., 2022). As de densidade média apresentam melhor resistência e estabilidade dimensional quando comparada à de baixa densidade, sendo amplamente empregadas em móveis, marcenaria, lâminas, compensados e construção leve (Melo, 2021). Para espécies madeireiras com maior densidade, estas são geralmente mais valorizadas para usos estruturais, uma vez que a resistência é um requisito fundamental nessas aplicações (Cabral et al., 2022).

Os valores de densidade básica observados neste estudo estão próximos aos encontrados na literatura. Carvalho (2006) relatou densidade de 0,40 g/cm³ para madeira de *S. versicolor*. Silva, Vale & Miguel (2015) encontraram valor próximo de 0,69 g/cm³ para a madeira de *Protium heptaphyllum*. Para *Himatanthus drasticus* e *Pseudalbizzia polycephala* não foram encontrados muitos estudos sobre suas densidades, o pouco relatado aponta densidade básica de 0,50 a 0,62 g/cm³ para o gênero *Pseudalbizzia* spp. 0,40 a 0,54 g/cm³, para *Himatanthus* spp. e para o gênero *Cordia* spp. 0,48 a 0,70 g/cm³ (Reyes et al., 1992)

Essa leve diferença de valores observados neste estudo com os relatados na literatura pode ser explicado pela diferença de idade, sítio e tratos silviculturais das árvores, além de fatores genéticos, uma vez que essas variáveis influenciam diretamente as propriedades da madeira (Silva, Jesus & Valle, 2025).

A densidade básica pode variar significativamente no sentido radial da madeira, em muitos casos observa-se o aumento da medula em direção à casca, pois a região interna é composta por lenho juvenil, geralmente menos denso, enquanto a porção externa corresponde ao lenho adulto, com maior densidade em função de suas características anatômicas (Nock et al., 2009). Entretanto, esse padrão não é universal. A literatura descreve três principais comportamentos de variação radial, positivo, quando a densidade aumenta para a casca, podendo ser observado nas madeiras de *Simarouba versicolor Pseudalbizzia polycephala*, *Protium heptaphyllum* e *Himatanthus drasticus*. Variação Negativa, quando diminui da medula para a casca, observada na madeira de *Cordia* spp. e por fim variação não monotônica, quando apresenta oscilações ao longo do raio (Melo, 2021). Entretanto, apenas as madeiras de *Simarouba versicolor* e *Pseudalbizzia polycephala* apresentaram diferenças estatisticamente significativas entre as posições radiais. Para *Protium heptaphyllum*, *Himatanthus drasticus* e

Cordia spp., as diferenças numéricas observadas não foram estatisticamente significativas, indicando ausência de evidência de variação radial significativa nas condições avaliadas.

A madeira de *Simarouba versicolor*, apresentou aumento da densidade da medula para a casca (Tabela 2), evidenciando uma transição gradual entre medula e a região próximo a casca. Apesar do incremento, a espécie manteve-se classificada como madeira de baixa densidade em todas as posições. Esse comportamento pode estar associado à transição entre regiões de lenho formadas em diferentes fases do desenvolvimento da árvore, com possíveis alterações na proporção e nas características dos elementos anatômicos ao longo do raio (Trevisan et al., 2024).

Em *Pseudalbizzia polycephala*, a variação radial foi ainda mais expressiva (Tabela 2), com incremento significativo e diferença estatística entre todas as posições evidenciando clara separação entre as frações, indicando forte gradiente radial. Destaca-se que a espécie passou da classificação de baixa densidade na medula para média densidade nas porções mais externas. Esse comportamento possivelmente está associado às mudanças ontogenéticas durante o desenvolvimento da árvore. Com o avanço da idade cambial, alterações nas características anatômicas, como espessura da parede celular e dimensões das fibras, podem modificar a densidade da madeira (Adutwum et al., 2023). Entretanto, esse padrão não é universal, podendo variar entre espécies em função de diferenças nas estratégias ecológicas, exigências mecânicas e hidráulicas e da formação de madeira juvenil e adulta (Trevisan et al., 2024).

Por outro lado, *Protium heptaphyllum*, *Himatanthus drasticus* e *Cordia* spp. (Tabela 2) não apresentaram diferenças estatisticamente significativas entre as posições radiais. Embora pequenas variações numéricas sejam observadas nos gráficos, as sobreposições entre os intervalos indicam comportamento radial mais homogêneo. *Protium heptaphyllum* apresentou leve tendência de aumento em direção à casca, enquanto *Himatanthus drasticus* demonstrou incremento discreto. Já *Cordia* spp. indicou tendência sutil de redução da densidade da medula para a casca, sugerindo padrão negativo suave, embora sem significância estatística. Assim, esse comportamento não deve ser interpretado como uma variação radial significativa para a espécie.

Os resultados demonstram que a variação radial da densidade básica não segue um padrão único entre as espécies estudadas. A análise do incremento radial percentual da densidade básica (CA vs. M) reforça os padrões observados anteriormente e permite quantificar a magnitude dessas variações entre as espécies (Figura 2).

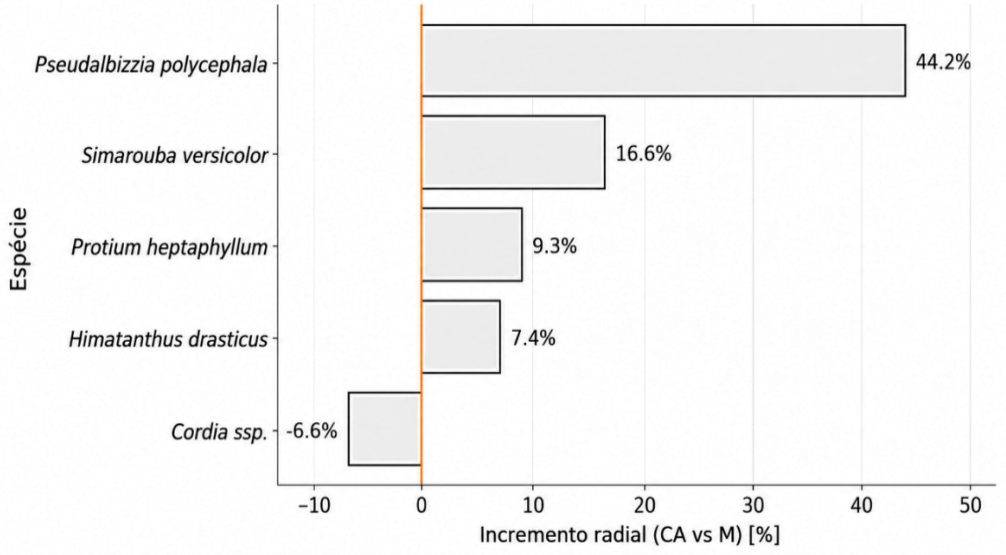


Figura 2 – Incremento radial percentual da densidade básica da madeira da medula (M) para a casca (CA) nas espécies *Simarouba versicolor*, *Pseudalbizzia polycephala*, *Protium heptaphyllum*, *Himatanthus drasticus* e *Cordia* spp. Fonte: Elaborado pelos autores.

Conforme apresentado na Figura 2, a madeira de *Pseudalbizzia polycephala* apresentou o maior incremento radial, com aumento de 44,2% da medula para a casca, evidenciando forte gradiente estrutural ao longo do raio. *S. versicolor* também apresentou incremento positivo expressivo (16,6%), embora em menor magnitude. Já *Protium heptaphyllum* (9,3%) e *Himatanthus drasticus* (7,4%) exibiram aumentos mais discretos. Por outro lado, *Cordia* spp. apresentou redução de 6,6% da densidade da medula para a casca, caracterizando tendência negativa, ainda que de baixa magnitude e sem significância estatistica.

4. Conclusões

As espécies *S. versicolor* e *Pseudalbizzia polycephala* apresentaram diferenças estatisticamente significativas na densidade básica ao longo da direção radial, com aumento dos valores da medula para a casca. Para *Protium heptaphyllum, Himatanthus drasticus* e *Cordia* spp., não foram observadas diferenças estatisticamente significativas entre as posições radiais. Os resultados demonstram que a magnitude e a direção da variação radial da densidade básica diferem entre as espécies avaliadas.

5. Referências bibliográficas

Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2003). NBR 11941: Madeira – Determinação da densidade básica.

Adutwum, J. O., Sakagami, H., Koga, S., & Matsumura, J. (2023). An application of mixed-effects model to evaluate the role of age and size on radial variation in wood specific gravity in Tectona grandis. Journal of Wood Science, 69, 9. https://doi.org/10.1186/s10086-023-02076-3

Cabral, J. P., Kafle, B., Subhani, M., Broman, O., Fredriksson, M., & Sandberg, D. (2022). Densification of timber: A review on the process, material properties, and application. Journal of Wood Science, 68, 20. https://doi.org/10.1186/s10086-022-02028-3.

Carvalho, P. E. R. (2006). Espécies arbóreas brasileiras (Vol. 2). Embrapa Florestas.

Gonçalves, M. P. M., Coffler, R., Carvalho, A. M., & Garcia, R. A. (2007). Variação radial da densidade básica e comprimento das fibras da madeira de Tectona grandis L. Floresta e Ambiente, 14(1), 70–75.

International Association of Wood Anatomists. (1989). List of microscopic features for hardwood identification. IAWA Bulletin, 10, 220–332.

Krainovic, P. M., Resende, A. F. de, Amazonas, N. T., Almeida, C. T. de, Almeida, D. R. A. de, Silva, C. C., Andrade, H. S. F. de, Rodrigues, R. R., & Brancalion, P. H. S. (2023). Potential native timber production in tropical forest restoration plantations. Perspectives in Ecology and Conservation, 21(4), 294–301. https://doi.org/10.1016/j.pecon.2023.10.002

Kelleci, O., Köksal, S. E., Sözen, E., Kayahan, K., & Aydemir, D. (2025). Manufacturing and characterization of innovative lightweight wooden furniture from polystyrene core wood sandwich panels. Scientific Reports, 15, 33960. https://doi.org/10.1038/s41598-025-11044-4

Martins, F. C. H., Weber, C. J., Neppel, G., Junqueira, M. E. G., Oliveira, R. P., & Cidade, F. W. (2021). Mata Atlântica: Da formação original à fragmentação e o atual estado de conservação em Santa Catarina. Estrabão, 2, 188–191. https://doi.org/10.53455/re.v2i.45

Matos, P. P. de, Botosso, P. C., Ferreira, C. A., Silva, H. D. da, Bellote, A. F. J., & Martins, E. G. (2003). Coleta de amostras para estudos da influência de tratos silviculturais na qualidade da madeira (Comunicado Técnico 91). Embrapa Florestas. https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/.

Melo, A. (2021). Radial variations in wood density and their implications for above-ground biomass estimations in a tropical high-Andean forest. Dendrobiology, 86, 19–28. https://doi.org/10.12657/denbio.086.003

Nock, C. A., Geihofer, D., Grabner, M., Baker, P. J., Bunyavejchewin, S., & Hietz, P. (2009). Wood density and its radial variation in six canopy tree species differing in shade-tolerance in western Thailand. Annals of Botany, 104(2), 297–306. https://doi.org/10.1093/aob/mcp118

Reyes, G., Brown, S., Chapman, J., & Lugo, A. E. (1992). Wood densities of tropical tree species. USDA Forest Service.

Resende, A. F., Gavioli, F. R., Chaves, R. B., Metzger, J. P., Guedes Pinto, L. F., Piffer, P. R., Krainovic, P. M., Fuza, M. S., Rodrigues, R. R., Pinho, M., Almeida, C. T., Almeida, D. R. A., Molin, P. G., Silva, T. S. F., & Brancalion, P. H. S. (2024). How to enhance Atlantic Forest protection? Dealing with biodiversity and environmental services in a threatened hotspot. Journal of Environmental Management, 345, 118756. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.118756

Rolim, S. G., & Piotto, D. (2018). Silvicultura e tecnologia de espécies da Mata Atlântica. Editus. https://www.researchgate.net/publication/326262183

Romero, F. M. B., de Nazaré Oliveira Novais, T., Jacovine, L. A. G., Bezerra, E. B., de Castro Lopes, R. B., de Holanda, J. S., Reyna, E. F., & Fearnside, P. M. (2024). Wood basic density in large trees: Impacts on biomass estimates in the southwestern Brazilian Amazon. Forests, 15(5), 734. https://doi.org/10.3390/f15050734

Silva, M. P., Jesus, C. C., & Valle, M. L. A. (2025). Variação longitudinal e radial da densidade básica na madeira de Tapirira guianensis Aubl. Brazilian Journal of Biological Sciences, 12(27), e546. https://doi.org/10.21472/bjbs.v12n27-034

Silva, C. J., Vale, A. T., & Miguel, E. P. (2015). Densidade básica da madeira de espécies arbóreas de cerradão no estado de Tocantins**.** Pesquisa Florestal Brasileira, 35(82).

Santos, P. L.; Lima, M. D. R.; Bufalino, L.; Hein, P. R. G.; Silveira, E. A.; Candelier, K.; Trugilho, P. F.; Protásio, T. P. (2025). Exploring the effects of slow pyrolysis temperature and species on the quality of charcoal from Amazonian woody wastes. Renewable Energy, 240, 122257. https://doi.org/10.1016/j.renene.2024.122257

Trevisan, R., Candaten, L., Costa, H. W. D., Bandera, E., Mangini, T. S., Zanchetta, L. S., & Eloy, E. (2024). Dimensões das fibras de Eucalyptus grandis em diferentes estratos e posição radial. Pesquisa Florestal Brasileira, 44, e202202248. https://doi.org/10.4336/2024.pfb.44e202202248

Vital, B. R. (1984). Métodos de determinação da densidade da madeira. Sociedade de Investigações Florestais.

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Avaliação do Potencial de Degradação Biológica de Madeira por Fungos Prospectados em Área de Cerrado

Cleomar Pereira Lima[1]; Kamila Oliveira Santos[1]; Lauane Alves Oliveira[1]; André Luiz Firmino[1]; Daniele Aparecida Alvarenga Arriel[1]; Eduardo Rogério Favaro[1]; Regina Maria Gomes[1].

[1] Universidade Federal de Uberlândia

Resumo: A prospecção de fungos do Cerrado com potencial de degradação surge como uma estratégia para entender a durabilidade dessa matéria-prima e identificar cepas de interesse biotecnológico. O objetivo foi avaliar a capacidade de deterioração da madeira de eucalipto frente à ação de duas cepas fúngicas em um ensaio de apodrecimento acelerado, comparando a influência de dois suportes nutricionais: Batata Dextrose Ágar (BDA) e Extrato de Malte Ágar (MEA). A técnica consistiu na inoculação dos corpos de prova contendo os meios de indução, onde a madeira foi exposta às cepas fúngicas por um período de 12 semanas. Os resultados indicam que os isolados fúngico e meio de cultura influenciam significativamente, sendo a maior média de biodegradação a cepa F11 em meio BDA (6,24%). O potencial de degradação é determinado pela eficiência de cada cepa. A resposta ao suporte nutricional mostra a necessidade de caracterizações prévias das fontes de carbono para otimizar a biodeterioração.

Palavras-chave: Biodegradação da madeira; Apodrecimento acelerado; Interação nutricional.

Evaluation of the Biological Degradation Potential of Wood by Fungi Prospectively Isolated from a Cerrado Area

Abstract: Fungal bioprospecting in the Cerrado with degradation potential emerges as a strategy to understand the durability of this raw material and identify strains of biotechnological interest. The objective was to evaluate the deterioration capacity of eucalyptus wood against the action of two fungal strains in an accelerated decay test, comparing the influence of two nutritional substrates: Potato Dextrose Agar (PDA) and Malt Extract Agar (MEA). The technique consisted of inoculating wood test specimens containing the induction media, where the wood was exposed to the fungal strains for a 12-week period. The results indicate that the fungal isolates and culture medium significantly influence wood weight loss, with the highest average biodegradation observed for the F11 strain in PDA medium (6.24%). The degradation potential is determined by the efficiency of each strain. The response to the nutritional substrate highlights the need for prior characterization of carbon sources to optimize.

Keywords: Wood biodegradation; Accelerated decay; Nutritional interaction.

1. Introdução

A colonização biológica por basidiomicetos xilófagos altera as propriedades tecnológicas do material lenhoso, resultando em modificações cromáticas, perda de massa, aumento da permeabilidade e redução da resistência mecânica residual, o que inviabiliza o

emprego da madeira para fins tecnológicos e industriais (Camargo, 2019). Para avaliação do potencial de uso desse recurso florestal, torna-se indispensável realizar ensaios laboratoriais de apodrecimento acelerado, conforme descrito por Santos et al. (2019).

O primeiro passo para a realização de ensaios de apodrecimento acelerado é o emprego de culturas fúngicas puras, as quais podem ser obtidas de isolados laboratoriais ou prospectadas de ambientes naturais. No Cerrado, a prospecção de microrganismos nativos tem revelado cepas fúngicas capazes de colonizar e degradar componentes da parede celular da madeira, como celulose, hemicelulose e lignina (Carvalho et al., 2015; Regio et al., 2024).

Isolados fúngicos prospectados de áreas de Cerrado podem ser empregados para acelerar a ciclagem de nutrientes e aumentar a disponibilidade de nutrientes minerais no solo, assim os microrganismos se apresentam como uma alternativa promissora devido a suas capacidades de sobrevivência e potencial de degradação (Melo et al., 2018; Mendes; Alves, 1988). Nesse contexto, avaliações direcionadas a partir do isolamento de cepas nativas indicam que a eficiência desse ataque biológico é condicionada por fatores ambientais e nutricionais, como a disponibilidade de nutrientes, o teor de umidade, a temperatura e o pH do substrato (Moreschi, 2013).

O objetivo do trabalho foi avaliar o potencial de degradação biológica de resíduos da madeira de *Eucalyptus* sp. frente ao ataque de duas cepas fúngicas do Cerrado (F9 e F11) em dois meios de cultura distintos: Batata Dextrose Ágar - BDA e Extrato de Malte Ágar - MEA. Baseando na hipótese nula de que a perda de massa da madeira de *Eucalyptus spp*. não é influenciada pelos isolados fúngicos, pelos meios de cultura (BDA e MEA) ou pela interação entre esses fatores.

2. Material e métodos

2.1 Microrganismos e preparo de inóculo

Para a realização do presente trabalho foram utilizados dois isolados fúngicos prospectados por Oliveira (2025) de uma região de cerrado e que se encontram armazenados no Laboratório de Microbiologia e Fitopatologia da Universidade Federal de Uberlândia – LAMIF FU. Os fungos empregados foram chamados de F9 e F11, os quais foram cultivados, nos respectivos meios de cultura, a 26ºC por 7 dias, visando garantir o crescimento de cada inóculo para condução do experimento.

2.2 Preparo dos corpos de prova

No experimento foram empregados corpos de prova previamente confeccionados com dimensões de aproximadamente 1,2 x 1,2 x 1,2 cm de madeira comercial de *Eucalyptus* sp., sendo todas as amostras obtidas de um único caibro. O material foi lixado para a retirada de aparas, pesado em balança de precisão e medidos nas 3 faces utilizando paquímetro digital, para a determinação de massa e volume inicial.

Os corpos de prova empregados no ensaio de apodrecimento acelerado tiveram suas dimensões iniciais determinadas com o intuito de se minimizar a influência do volume da madeira no procedimento laboratorial. Os resultados de média de volume inicial dos corpos de prova encontram-se apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 – Valores de média, desvio padrão - DP e coeficiente de variação - CV do volume inicial dos corpos de prova empregado em cada tratamento

Tratamento	**Volume inicial**		
	Média (mm³)	**DP (mm³)**	**CV (%)**
BDA C	1712,53	71,84	4,20
MEA C	1632,03	121,17	7,42
F9 BDA	1777,32	81,37	4,58
F9 MEA	1709,99	94,60	5,53
F11 BDA	1672,68	62,53	5,53
F11 MEA	1670,10	99,78	5,97
Total	1695,77	101,62	5,99

2.3 Ensaio de apodrecimento de madeira acelerado em laboratório

O ensaio de apodrecimento de madeira acelerado em laboratório foi adaptado da metodologia de Monteiro (1997), chamado “mini-agar-block”. O ensaio foi realizado em placa petri, onde foram empregados 2 meios de cultura diferentes: BDA e Extrato de Malte Aga (MEA) e 2 isolados fúngicos diferentes (F9 e F11) e um tratamento controle, caracterizando delineamento inteiramente casualizado (DIC) arranjado em esquema fatorial 2 x 3, onde tratamentos foram identificados como:

- BDA C: tratamento controle em meio de cultura BDA;
- MEA C: tratamento controle em meio de cultura MEA;
- F9 BDA: tratamento com inoculação do fungo F9 em meio de cultura BDA;
- F9 MEA: tratamento com inoculação do fungo F9 em meio de cultura MEA;
- F11 BDA: tratamento com inoculação do fungo F11 em meio de cultura BDA;

- F11 MEA: tratamento com inoculação do fungo F11 em meio de cultura MEA.

Em cada placa petri foram adicionados 5 corpos de prova, previamente esterilizados, e cada tratamento foi realizada com 2 placas petri, totalizando 10 repetições de cada. Os fungos foram inoculados em câmara de fluxo laminar. Após a inoculação, o experimento foi mantido em câmara climatizada tipo BOD por 3 meses à 27°C, com acompanhamento visual semanal.

Ao final do tempo, os corpos de prova foram lavados em água corrente, com o auxílio de uma escova para retirada do excesso de resquícios fúngicos e meio de cultura. As amostras de madeira pós ensaio foram mantidas em estufa a 60°C, por 24 horas, e depois foram pesadas até peso constante, e por último anotou-se o peso final das amostras e calculou-se a perda de massa, conforme norma AWPA E10-16 (2020).

2.4 Análise de dados

Os dados obtidos no experimento foram submetidos à análise de variância (ANOVA) através do Python, para observar se há diferença significativa entre os tratamentos. Quando significativas ($p < 0,05$), as médias foram comparadas por teste Tukey ao nível de probabilidade de 5%.

3. Resultados e discussão

Pela Figura 1 é possível acompanhar os registros desde a inoculação (A) até a etapa final de incubação (D), mostrando o estabelecimento e o avanço contínuo da colonização micelial sobre os corpos de prova. Nos estágios iniciais foi possível observar a fixação das hifas e a exploração superficial do suporte nutricional (B). Com o avanço das semanas, a cobertura macroscópica tornou-se densa e vigorosa, caracterizando a fase de colonização ativa (C).

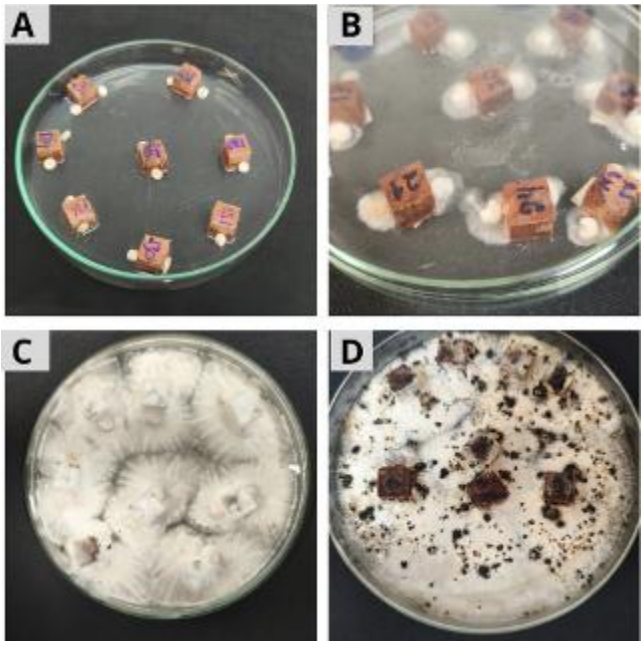


Figura 1: Progressão da colonização fúngica ao longo do experimento: A) Dia 01; B) Dia 07 C) Dia 14; D) Dia 90

O acompanhamento ao longo do ensaio de apodrecimento acelerado é importante para visualizar a colonização do material pelo isolado fúngico e avaliar os potenciais efeitos do ataque de fungos na estrutura a madeira, similar ao relatado por Cappellazzi et al. (2020) e adotado nos procedimentos experimentais de Oliveira (2025).

Realizou-se a análise de variância com os resultados de perda de massa obtidos após a condução do ensaio laboratorial, conforme pode ser observado na Tabela 2.

Tabela 2: ANOVA para perda de massa da madeira

Fonte de Variação	Soma de Quadrados (SQ)	Graus de Liberdade (GL)	Valor F	p-valor (PR>F)
Fungo	184.198405	2	118.529786	1.766528e-20
Meio	9.659127	1	12.431099	8.695994e-04
Fungo × Meio (Interação)	3.896633	2	2.507444	9.092197e-02
Resíduo	41.958710	54	—	—
Total	239,7128	59	—	—

Pela Tabela 2 nota-se que o p-valor se encontra abaixo do nível de significância de 5% ($p < 0,05$) para todas as fontes de variação, rejeitando-se assim a hipótese de nulidade, evidenciando que a perda de massa da madeira é influenciada pela cepa fúngica, pelo meio de

cultura e pela interação entre a cepa fúngica e o suporte nutricional fornecido. Como se observou interação positiva, realizou-se o desdobramento da interação que foi verificada pelo teste Tukey (Figura 2).

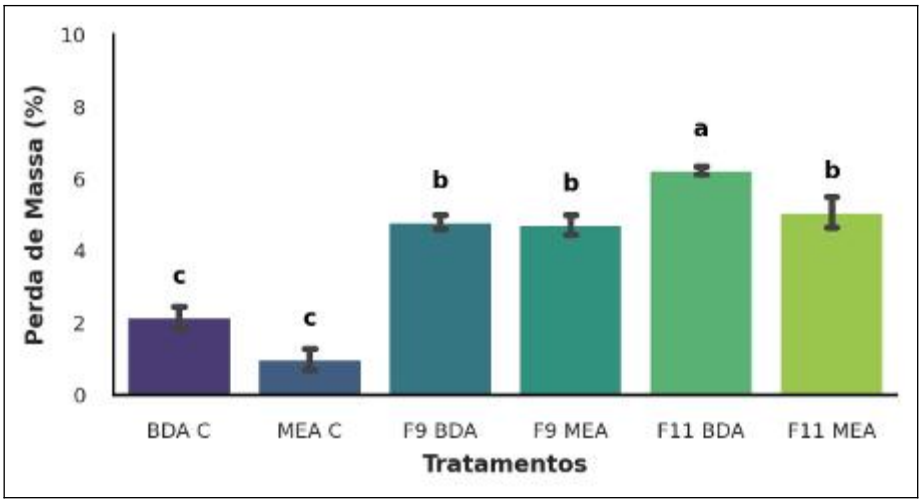


Figura 2: Indice de degradação da madeira por tratamento

Pela figura 2, ao se analisar os tratamentos controle (MEA C e BDA C), verifica-se médias de perdas de massa de 0,99% e 2,15%, respectivamente. Essa perda, livre de micélio ativo, está associada a fatores ambientais do ensaio, como processos de lixiviação de extrativo durante as etapas de esterilização e condução do experimento em laboratório. A taxa de decaimento da madeira resulta de uma combinação de fatores biológicos e físicos, sendo comuns essas oscilações basais nos grupos de controle (Lasota et al., 2018).

A cepa F9 quando induzido pelo meio Extrato de Malte (F9 MEA) apresentou uma perda de massa média de 4,72%, não diferindo estatisticamente ao resultado obtido pela mesma cepa em meio BDA (4,81%).

Já a cepa F11 demonstrou maior agressividade e sensibilidade ao estímulo do substrato. O tratamento F11 BDA exibiu a maior capacidade de ataque do ensaio, atingindo 6,24% de perda de massa, mostrando que o meio BDA tendeu a favorecer significativamente o seu vigor metabólico. Ao transferir essa mesma cepa para o meio MEA (F11 MEA), houve uma redução estatisticamente significativa em sua capacidade de biodegradação, que decresceu para 5,07%, sendo estatisticamente semelhante à perda de massa da cepa F9.

Segundo Negrão (2011), os meios BDA e MEA são utilizados com frequência em experimentos laboratoriais, no entanto, eles podem retardar a atividade metabólica dos fungos

degradadores de madeira, afetando a velocidade do seu crescimento e a colonização do material. No referido estudo, a autora verificou que diferentes cepas fúngicas se desenvolvem de modo diferente a depender do meio de cultura e da temperatura empregada durante a realização do ensaio.

Costa (2014), ao avaliar a capacidade de degradação de xilófagos em corpos de prova de *Eucalyptus* spp., observou que a escolha do meio de indução e o preparo do substrato interferem na atividade metabólica do micélio, evidenciando que a resposta do fungo à matriz nutricional em ambiente controlado é um indicador determinante do seu potencial real de biodeterioração.

Os resultados obtidos no presente estudo evidenciam a interação entre meio de cultura e atividade fúngica. Embora Costa (2014) e Monteiro (1997) relatem que o método “mini-agar-block” seja uma forma mais simples de se selecionar fungos com maior potencial de degradação da madeira, para posteriormente serem empregados em ensaio de apodrecimento acelerado, torna-se necessário a realização de ensaios prévios sobre qual o melhor meio de cultura a ser empregado para cada cepa fúngica.

924. Conclusões

O potencial de biodegradação da madeira de *Eucalyptus* sp. é influenciado de forma significativa pelos fatores biológicos e nutricionais. O isolado F9 caracterizou-se por estabilidade metabólica, mantendo índices equivalentes de perda de massa do lenho tanto em meio MEA (4,72%) quanto em meio BDA (4,81%), o que mostra um maquinário enzimático estável e com atividade contínua, independente da fonte imediata de carbono. Em contrapartida, o isolado F11 manifestou maior agressividade e vigor metabólico, atingindo a maior média de degradação do ensaio quando associado ao meio BDA (6,24%), e decrescendo para 5,07% em meio MEA.

Essa divergência comportamental confirma a existência de plasticidade metabólica e estratégias bioquímicas distintas entre as cepas. Conclui-se que, embora o método de mini-agar-block seja uma ferramenta eficaz e simplificada para a seleção de microrganismos xilófagos, a triagem prévia e a caracterização dos requerimentos nutricionais isolados de cada cepa são etapas fundamentais para prever e otimizar a capacidade de ataque fúngico sobre o tecido vegetal, subsidiando de forma robusta futuros estudos.

5. Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com o apoio da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG).

6. Referências bibliográficas

Camargo, T. F. (2019). Resistência natural das madeiras de Liquidambar styraciflua L. e Pinus patula Schltdl. & Cham ao ensaio de apodrecimento acelerado em laboratório (Trabalho de Conclusão de Curso). Universidade Federal de Santa Catarina, Curitibanos.

Cappellazzi, J., Konkler, M., Sinha, A., & Morrell, J. (2020). Potential for decay in mass timber elements: A review of the risks and identifying possible solutions. Wood Material Science & Engineering, 15(1), 1-10. https://doi.org/10.1080/17480272.2020.1720804

Carvalho, D., Santini, E., Gouveia, F., & Rocha, M. P. da. (2015). Resistência natural de quatro espécies florestais submetidas a ensaio com fungos apodrecedores. Floresta e Ambiente, 22(2), 271-276.

Costa, Lais Gonçalves da. Seleção de fungos com capacidade de degradação de tocos de Eucalyptus spp. para utilização na destoca biológica. 2014. 69 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Centro de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Espírito Santo, Jerônimo Monteiro, ES, 2014.

Lasota, J., Błońska, E., Piaszczyk, W., & Wiecheć, M. (2018). How the deadwood of different tree species in various stages of decomposition affected nutrient dynamics?. Journal of Soils and Sediments, 18(1), 1-11. https://doi.org/10.1007/s11368-017-1858-2

Melo, M., Araujo, A., Chogi, M., & Duarte, I. (2018). Cellulolytic and lipolytic fungi isolated from soil and leaf litter samples from the Cerrado (Brazilian Savanna). Revista de Biología Tropical, 66(1), 237-245. https://doi.org/10.15517/rbt.v66i1.27768

Mendes, A. S., & Alves, M. V. S. A degradação da madeira e sua preservação. Brasília: IBDF/LPF, 1988. 56p.

Monteiro, M. B. B. (1997). Método alternativo de ensaio acelerado para avaliação da resistência natural de madeiras ao ataque de fungos apodrecedores (Dissertação de mestrado). Universidade de São Paulo.

Moreschi, J. C. (2013). Biodegradação e preservação da madeira: Biodegradação da madeira (v. 1, n. 4). UFPR, Departamento de Engenharia e Tecnologia Florestal.

Negrão, Djanira Rodrigues. Seleção de fungos degradadores de madeira para uso na destoca biológica de Eucalyptus spp. 2011. xiii, 95 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia/Proteção de Plantas) – Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Campus de Botucatu, Botucatu, 2011.

Oliveira, L. A. (2025). Avaliação física e microscópica da madeira de Eucalyptus sp. frente ao ataque de fungos prospectados do Cerrado (Trabalho de Conclusão de Curso). Universidade Federal de Uberlândia, Monte Carmelo.

Oliveira, L. S., & Müller, M. T. (2024). Agentes de biodeterioração da madeira [recurso eletrônico] – Pelotas: Ed. da UFPel, 2024. 70 p. E-book PDF. ISBN 978-85-60696-50-5.

Regio, N. D. C., Palacio, M., Westphalen, M. C., Feuerstein, S. C., Silveira, R. M. B. d., & Felipe, M. (2023). Contributions to the fungal diversity of the Cerrado: new records of lignocellulolytic Agaricomycetes. Plazi.org taxonomic treatments database. https://doi.org/10.21826/2446-82312024v79e20241102

Santos, A. P. C. dos, Chiossi, C. C., Souza, J. T. de, Talgatti, M., Silveira, A. G. da, Menezes, W. M. de, & Coldebella, R. (2019). Durabilidade natural da madeira de espécies florestais exóticas e nativas. Scientia Agraria Paranaensis, 18(1), 28-32.

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Avaliação do potencial energético de fuste, galhos e raízes de *Corymbia citriodora*

Karolayne Ferreira Saraiva[1]; Júlia Gabriela do Nascimento Mendes[1]; Thatiele Pereira Eufrazio[1]; Maria Eduarda Pinto dos Santos[1]; Carlos Eduardo Lima Sousa[1]; Lorrayne Rodrigues da Costa[1]; Bruna Duque Guirardi[1] Raquel Marchesan[1]

[1] Universidade Federal do Tocantins (UFT), Laboratório de Tecnologia e Utilização de Produtos Florestais (LabTecFlor), Gurupi, Tocantins, Brasil.

Resumo: O objetivo deste estudo foi caracterizar e analisar a qualidade das biomassas de *Corymbia citriodora*, avaliando seu potencial para geração de energia. As amostras de fuste, galho e raiz foram coletadas no município de Formoso do Araguaia e submetidas a análises químicas, físicas e energéticas em laboratório. Os dados mostraram que todas as biomassas têm viabilidade para uso energético. O fuste destacou-se por apresentar maiores valores de densidade básica, densidade energética e estoque de carbono, confirmando elevado potencial. Tanto o fuste quanto a raiz mostrou-se promissores devido aos altos teores de lignina, carbono e poder calorífico, reforçando sua aptidão para geração de energia. O galho apresentar potencial moderado, com densidade media, porém com o maior teor médio de hidrogênio. Conclui-se que todas as biomassas avaliadas possuem características favoráveis para a geração de energia, reforçando a viabilidade do uso total da espécie, sendo o fuste com o maior potencial e com maior densidade.

Palavras-chave: Biomassa Florestal; Densidade energética; Energia.

Assessment of the energy potential of the stem, branches, and roots of *Corymbia citriodora*

Abstract: The objective of this study was to characterize and analyze the biomass quality of *Corymbia citriodora*, evaluating its potential for energy generation. Stem, branch, and root samples were collected in the municipality of Formoso do Araguaia and subjected to chemical, physical, and energetic laboratory analyses. The data showed that all biomass types are viable for energy use. The stem stood out by presenting higher values for basic density, energy density, and carbon stock, confirming high potential. Both the stem and the root proved to be promising due to high levels of lignin, carbon, and calorific value, reinforcing their suitability for energy generation. The branch presented moderate potential, with average density, but with the highest average hydrogen content. It is concluded that all evaluated biomasses have favorable characteristics for energy generation, reinforcing the viability of full use of the species, with the stem having the highest potential and highest density.

Keywords: Forest Biomass; Energy Density; Energy.

1. Introdução

À medida que a busca por modelos energéticos sustentáveis se intensifica, a biomassa florestal destaca-se como uma das alternativas de energia renovável. Diferentemente dos combustíveis fósseis, sua utilização ocorre dentro de um ciclo de carbono equilibrado, no qual o CO_2 liberado durante a combustão é novamente absorvido pelas plantas ao longo do crescimento (El-Fawal et al., 2025). Essa característica de origem biogênica confere à biomassa o potencial de ser considerada uma fonte de energia neutra em carbono, desde que sejam asseguradas práticas adequadas de cultivo e manejo sustentável (El-Fawal et al., 2025).

A biomassa florestal proveniente de florestas plantadas contribui significativamente para a matriz energética sustentável mundial. O setor florestal, em especial, é apontado como estratégico para a expansão da energia renovável, sobretudo por meio do desenvolvimento de plantações energéticas (Siarudin et al., 2023). A compreensão da interação entre as características estruturais e químicas da biomassa e suas propriedades de ignição e combustão pode orientar a seleção de espécies com maior eficiência para a produção de energia. Esses dados são essenciais para programas de melhoramento genético voltados à expansão de áreas plantadas destinadas à bioenergia (Vieira et al., 2023).

Entre as espécies de destaque, *Corymbia citriodora* apresenta elevada capacidade de sobrevivência, resistência a doenças e pragas endêmicas, além de alta produtividade de madeira (Tambarussi et al., 2018). Sua ampla distribuição e versatilidade permitem o uso da madeira como matéria-prima para móveis, postes, cercas, construção civil e combustível (Hung et al., 2016).

O manejo da biomassa sólida para fins de aquecimento, por meio da queima direta, contribui para a redução da demanda por combustíveis fósseis em sistemas de aquecimento e cogeração, configurando-se como uma alternativa eficaz e de baixo custo para a produção de energia renovável (da Silva et al., 2018). No caso dos resíduos florestais, observa-se que grande parte permanece nas áreas de exploração, após a extração da madeira, sendo frequentemente empilhada e queimada ou descartada devido ao elevado custo de coleta e transporte (Ghosh, 2024).

Além disso, esses resíduos representam uma fonte renovável de combustível, justificando seu aproveitamento tanto por razões ecológicas quanto energéticas, devido ao seu potencial energético. Conhecer as propriedades é essencial para determinar o melhor uso, reduzindo o desperdício de recursos. Diante desse contexto, o presente trabalho tem como objetivo caracterizar e analisar a qualidade energética das biomassas fuste, galho e raiz de

Corymbia citriodora, com o intuito de caracterizar e identificar os seus potenciais para geração de energia e uso no setor energético.

2. Material e métodos

A matéria-prima utilizada no estudo foi proveniente de um povoamento florestal de *C. citriodora* localizado no município de Formoso do Araguaia, estado do Tocantins. As toras foram coletadas aleatoriamente em pilhas submetidas à secagem natural por 90 dias. A partir dessas toras, retiraram-se discos, além da seleção de galhos e raízes das mesmas pilhas.

O preparo e as análises foram realizados no Laboratório de Tecnologia e Utilização de Produtos Florestais I da Universidade Federal do Tocantins (UFT), Campus Gurupi. As diferentes biomassas foram transformadas em cavacos: parte deles foi destinada à determinação da densidade básica (Db), obtida seguindo os critérios estabelecidos pela NBR 7190 (2022), por submersão em água, enquanto o restante foi convertido em palitos. Os palitos foram posteriormente triturados (Tramontina, modelo TRE25) e moídos em moinho de facas (SL30 – Solab), obtendo-se as partículas destinadas às análises. Antes da utilização, as partículas passaram por peneiramento, sendo selecionadas aquelas que atravessaram a malha de 40 mesh e ficaram retidas na de 60 mesh.

Os teores de extrativos totais, lignina, holocelulose e solubilidade em NaOH foram determinados conforme Wastowski (2018), utilizando três repetições por amostra em cada análise química. O teor de umidade (TU) em base seca foi obtido segundo o mesmo autor, utilizando cinco cadinhos de porcelana previamente pesados em balança analítica. Em cada cadinho foram adicionados 2 g de partículas com granulometria de 60 mesh. As amostras foram submetidas à secagem em estufa a 103 ± 2 °C até atingirem peso constante, resfriadas em dessecador e novamente pesadas para cálculo do TU. O teor de extrativos totais foi obtido por meio de extração com 200 mL da solução etanol-tolueno (1:2) durante 8 horas, seguida de extração em 200 mL de etanol a 95% por 6 horas e, posteriormente, 1 hora em banho-maria.

Para a análise de lignina total, foram utilizados 0,3 g de madeira previamente livre de extrativos. A amostra recebeu 3 mL de ácido sulfúrico a 72% e permaneceu em repouso por 1 hora. Em seguida, adicionaram-se 84 mL de água destilada quente, e as soluções foram autoclavadas a 120 °C por 1 hora. Após esse processo, as amostras foram filtradas em cadinhos filtrantes, utilizando 700 mL de água destilada quente. O líquido residual foi coletado e analisado em espectrofotômetro para a determinação da lignina solúvel.

A holocelulose foi determinada pela relação entre os teores de lignina total e extrativos totais, subtraídos de 100. Para a avaliação da solubilidade em NaOH a 1% foi determinada pela adição de 100 mL da solução de NaOH a 1% à amostra de madeira, seguida de banho-maria por 1 hora. Após essa etapa, as amostras foram neutralizadas com 50 mL de ácido acético a 10% e lavadas com água destilada quente.

A análise química imediata (AQI) foi realizada conforme a norma D1762–84 (ASTM, 2013), obtendo os teores de materiais voláteis (MV) (850°C), cinzas (CZ) (700°C por 6 h) e, por diferença, o carbono fixo (CF). A análise elementar seguiu Parikh et al. (2007). O poder calorífico superior (PCS) foi determinado segundo Ferreira et al. (2014), e o inferior (PCI), foi utilizada a equação proposta por Brand (2010). Já a densidade energética (De) pela metodologia de Jesus et al. (2017), multiplicando a densidade básica pelo poder calorífico. O estoque de carbono (EC) foi realizado de acordo com Protásio et al. (2013), multiplicando a Db pelo teor de carbono elementar dividido por 100.

O experimento foi conduzido em delineamento inteiramente casualizado (DIC), utilizando cinco repetições de cada biomassa (fuste, galho e raiz), para cada parâmetro analisado. Para as análises estatísticas, utilizaram-se os programas Statgraphics Centurion XVI.I e SISVAR 5.6. Após a análise de variância (ANOVA), aplicou-se o teste de Tukey para comparação das médias, ao nível de 5% de probabilidade, nos casos em que houve diferença significativa entre os fatores. O programa Excel 2007® foi empregado para a tabulação dos dados e para o cálculo do coeficiente de variação (CV%).

3. Resultados e discussão

Na Tabela 1 são apresentadas as médias das propriedades físicas, químicas e energéticas das diferentes biomassas advindas da espécie *C. citriodora*. Analisando os parâmetros de forma geral fica claro que as biomassas se diferem estatisticamente ao nível de 5% de significância, onde o único resultado que não apresentou diferença significativa foi a média do teor de cinzas (CZ).

Tabela 1 – Médias das propriedades físicas, químicas e energéticas das três biomassas do *C. citriodora*

Parâmetros	Fuste	Galho	Raiz	Pr>Fc
TU (%)	6,40 a	6,24 a	6,60 b	*

	(0,96)	(0,61)	(1,36)	
Db (g/cm³)	0,71 a (12,69)	0,56 b (10,66)	0,48 c (8,82)	*
Sol. NaOH (%)	20,07 c (0,87)	29,36 a (0,61)	25,12 b (0,47)	*
Extrativos totais (%)	17,62 a (2,48)	9,02 c (4,58)	15,31 b (2,13)	*
Lignina total (%)	29,28 a (0,61)	21,94 c (0,88)	28,73 a (3,26)	*
Holoceluloses (%)	53,10 b (1,15)	69,05 a (0,33)	55,96 b (2,15)	*
MV (%)	77,15 b (1,74)	83,16 a (0,55)	77,92 b (0,84)	*
CF (%)	22,71 a (5,84)	16,66 b (2,71)	21,93 a (3,19)	*
CZ (%)	0,14 a (11,63)	0,18 a (11,70)	0,16 a (39,62)	ns
C (%)	49,57 a (0,48)	48,45 b (0,17)	49,42 a (0,30)	*
H (%)	5,97 b (0,24)	6,02 a (0,08)	5,97 b (0,08)	*
O (%)	43,63 b (0,57)	44,65 a (1,77)	43,75 b (0,23)	*
PCS (Kcal/kg)	4770,34 a (0,54)	4647,88 b (0,19)	4753,76 a (0,34)	*
PCI (Kcal/kg)	4446,34 a (0,58)	4323,88 b (0,21)	4429,76 a (0,34)	*
De (Kcal/cm³)	3398,03 a (0,54)	2611,17 b (0,19)	2277,02 c (0,34)	*
EC (Kg/m³)	353,11 a (0,48)	272,19 b (0,17)	236,72 c (0,30)	*

Nota: Médias seguidas pela mesma letra minúscula na linha não diferem estatisticamente (Teste de Tukey – P≥0,05). TU (%): Teor de umidade; Db (g/cm3) Densidade básica; MV (%) Materiais voláteis; CF (%) Carbono fixo; CZ (%) Cinzas; C (%) Carbono; H (%) Hidrogênio; O (%) Oxigênio; PCS (Kcal/kg) Poder calorifico superior; PCI (Kcal/kg) Poder calorífico inferior; De (Kcal/cm³) Densidade energética; EC (Kg/m³) Estoque de carbono; Valores entre parêntesis representam o coeficiente de variação. *Diferença significativa ao nível de 5% de probabilidade; ns não significativo ao nível de 5% de probabilidade.

No que se refere ao teor médio de umidade (TU), verifica-se que fuste e galho não apresentam diferenças estatísticas significativas entre si, ambos exibindo índices percentuais inferiores em relação à raiz. Ainda assim, encontram-se dentro da faixa recomendada para a queima. Pois quanto menor o teor de umidade, maior é o potencial energético da biomassa, já que a água presente na madeira consome parte da energia liberada durante a combustão no processo de evaporação, reduzindo a eficiência energética (Halim; Muhammad, 2025). Dessa

forma, as três biomassas analisadas apresentaram resultados satisfatórios, situando-se em torno de 6% de umidade.

A densidade básica é um dos parâmetros de grande importância para a produção de energia, constituindo uma variável relevante na escolha da espécie, pois biomassas mais densas concentram maior quantidade de massa por volume, resultando em mais massa para geração de energia. Neste estudo, verificou-se que tanto o fuste quanto o galho podem ser classificados como de média densidade, apresentando valores de 0,71 g/cm³ e 0,56 g/cm³, respectivamente, conforme parâmetros do Serviço Florestal Brasileiro (SFB, 2026), que considera como média densidade a faixa entre 0,50 e 0,72 g/cm³. Já a raiz, por sua vez, enquadra-se como de baixa densidade, com índice de 0,48 g/cm³.

A solubilidade em NaOH é um parâmetro usado para indicar a presença de extrativos e carboidratos, como celulose degradada e polioses. Esse índice reflete o grau de deterioração da biomassa, sobretudo por fungos. Ao analisar os resultados da Tabela 1, observa-se que o fuste apresentou o menor valor (20,07%), seguido pela raiz (25,12%). Valores mais baixos de solubilidade indicam menor degradação da biomassa. O galho, por sua vez, demonstrou maior suscetibilidade, registrando o valor mais elevado (29,36%). Esses resultados evidenciam o grau de resistência das biomassas frente ao ataque de organismos xilófagos e reforçam a importância da caracterização para avaliar sua viabilidade energética e estrutural.

Em relação aos teores de extrativos totais, o fuste apresentou o maior percentual (17,62%), superando as demais frações analisadas. Já os galhos registraram o menor valor (9,02%), o que indica menor resistência natural. Esse resultado é importante, pois os extrativos atuam como compostos de defesa natural da planta, reduzindo a suscetibilidade da biomassa ao ataque biológico. Dessa forma, maiores teores de extrativos tendem a conferir maior durabilidade e resistência.

Quanto à lignina, o fuste e a raiz apresentaram valores de 29,28% e 28,73%, respectivamente, superiores aos observados nos galhos (21,94%). O mesmo padrão foi verificado para o carbono elementar e o carbono fixo, ambos mais elevados no fuste e na raiz. Esse comportamento decorre da elevada concentração de carbono na estrutura da lignina, resultando em maiores teores de carbono elementar nessas biomassas (Lima et al., 2026).

Considerando que o carbono é um elemento de elevado conteúdo energético, cuja combustão libera grande quantidade de calor, a maior presença de lignina na biomassa contribui diretamente para o aumento do teor de carbono e, consequentemente, para um maior poder calorífico (Cirilo et al., 2023, p. 1211). Essa tendência foi observada no fuste e na raiz,

cujos valores de poder calorífico superior e inferior superaram os registrados nos galhos. Os resultados demonstram, portanto, que o fuste e a raiz apresentam maior eficiência energética, enquanto os galhos se configuram como a fração de menor potencial entre as biomassas avaliadas. Essa diferença reforça o papel da composição química na determinação das propriedades energéticas, impactando diretamente o desempenho das biomassas.

A holocelulose consiste na soma dos teores de hemiceluloses e celulose, sendo assim quanto menor o teor de lignina, maior será o de holocelulose, em relação a massa total da biomassa. No estudo esse fato fica evidente tendo em vista que a biomassa galho apresentou o menor teor de lignina (21,94%) e consequentemente o maior teor de holocelulose (69,05%).

No que se refere à análise química imediata da madeira, observa-se que no parâmetro materiais voláteis os percentuais das biomassas fuste e raiz não diferiram estatisticamente (77,15% e 77,92% respectivamente) e o galho por sua vez apresentou valor superior de 83,16%, indicando a facilidade de queima de cada biomassa quando é exposta à altas temperaturas, sendo assim quanto maior o MV, mais rápido a queima durante o processo de combustão.

Em relação ao parâmetro de cinzas (CZ), este representa a fração de matéria inorgânica originada após o processo de queima da madeira, constituindo um resíduo sólido. Nesse caso, foi o único parâmetro em que as três biomassas não apresentaram diferença significativa entre si: o fuste apresentou 0,14%, seguido da raiz com 0,16% e dos galhos com 0,18%. Para fins de geração de energia, é desejável que o teor de cinzas seja baixo, uma vez que se trata de um material inorgânico que não participa do processo de combustão. Por isso, quanto maior o teor de cinzas, menor tende a ser o poder calorífico do combustível, estabelecendo-se uma relação inversa entre esses dois parâmetros (Reis et al., 2012).

A densidade energética (De) é um parâmetro de importância indiscutível quando se quantifica o desempenho de uma biomassa e analisa-se o seu rendimento de queima. É um demonstrativo da quantidade de energia de um certo volume de madeira, algumas propriedades influenciam esse parâmetro como a lignina, densidade básica, extrativos e cinzas (Barros, 2019). O fuste se destacou mostrando ser a biomassa mais eficiente, com valor de 3398,03 Kcal/cm³ para De, e quando relacionado com os resultados dos parâmetros que possuem influência, principalmente a densidade básica, o resultado condiz com o esperado.

Os valores médios para estoque de carbono da madeira do clone de *C. citriodora* foram de 353,11 Kg/m³ para o fuste, seguida do galho que apresentou valor de 272,19 Kg/m³ e em sequência a raiz com 236,72 Kg/m³. O fuste apresentou os maiores valores nos diversos

parâmetros analisados se mostrando a melhor biomassa para fins energéticos, mas as outras duas biomassas também apresentaram certo potencial podendo ser uma opção alternativa viável.

4. Conclusões

As biomassas de *C. citriodora* apresentaram características favoráveis à geração de energia. O fuste apresentou os melhores índices de qualidade, destacando-se em densidade básica, densidade energética e estoque de carbono. A raiz apresentou resultados relevantes, especialmente nas propriedades químicas e energéticas. Os valores de teor de lignina, carbono elementar, carbono fixo e poder calorífico foram estatisticamente semelhantes aos do fuste, evidenciando que, mesmo com menor densidade energética e estoque de carbono, a raiz mantém elevado potencial para fins energéticos. Já os galhos exibiram comportamento inverso ao da raiz: alcançaram o segundo maior estoque de carbono e densidade energética, mas apresentaram menor poder calorífico e teor de lignina.

5. Agradecimentos

Agradecemos à Universidade Federal do Tocantins (UFT), campus de Gurupi, e ao Laboratório de Tecnologia e Utilizações de Produtos Florestais I, pelo apoio e colaboração.

6. Referências bibliográficas

American Society for Testing and Materials. (2013). *D1762-84: Standard test method for chemical analysis of wood charcoal*. ASTM International.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2022). *NBR 7190: Projeto de estruturas de madeira*. ABNT.

Barros, M. L., da Silva, R. G. C., Padilha, M. C. S., & de Sá, V. A. (2019). Caracterização energética de Eucalyptus sp. provenientes de dois tratamentos do solo em Alagoas. IV Congresso Brasileiro de Eucalipto, Salvador/BA, 4–7.

Brand, M. A. (2010). Energia de biomassa florestal. *Interciência*, 214. https://doi.org/10.37885/978-65-87196-84-8

Cirilo, N. R. M., Cupertino, G. F. M., Medeiros, N. C. G., Santos, V. B., Silvares, P. H. S., Nunes, S. M. V., Araújo, B. D. L., & Medeiros Neto, P. N. (2023). Lenha ou carvão vegetal? Avaliando o potencial energético da espécie Prosopis juliflora para indústria de

cerâmica vermelha. Em Editora Científica Digital (Org.), Open Science Research XI (pp. 1204–1218). Editora Científica Digital.

da Silva, C. M. S., de Cássia Oliveira Carneiro, A., Vital, B. R., Figueiró, C. G., de Freitas Fialho, L., de Magalhães, M. A., Carvalho, A. G., & Cândido, W. L. (2018). Biomass torrefaction for energy purposes—Definitions and an overview of challenges and opportunities in Brazil. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82, 2426–2432. https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.08.095

El-Fawal, E. M., Naggar, A. E. M. A., El-Zahhar, A., Alghandi, M. M., Morshedy, A. S., Sayed, H. E. A., & Mohammed, A. (2025). Biofuel production from waste residuals: comprehensive insights into biomass conversion technologies and engineered biochar applications. *RSC Advances*, 15, 11942–11974. https://doi.org/10.1039/d5ra00857c

Ferreira, I. T. M., Schirmer, W. N., Machado, G. de O., & Gueri, V. D. (2014). Estimativa do potencial energético de resíduos celulósicos de fabricação de papel através de análise imediata. *Revista Brasileira de Energias Renováveis*, 3(4), 284–297. https://doi.org/10.5380/rber.v3i4.38618

Ghosh, D., Page-Dumroese, D. S., Han, H., & Anderson, N. (2024). Role of biochar made from low-value woody forest residues in ecological sustainability and carbon neutrality. *Soil Science Society of America Journal*, 89, e20793. https://doi.org/10.1002/saj2.20793

Halim, N. Y. A., & Muhammad, N. I. S. (2025). Correlation of moisture content and heating value of refuse-derived fuel. *Journal of Physics: Conference Series*, 3003, 012019. https://doi.org/10.1088/1742-6596/3003/1/012019

Hung, T. D., Brawner, J. T., Lee, D. J., Meder, R., & Dieters, M. J. (2016). Genetic variation in growth and wood-quality traits of Corymbia citriodora subsp. variegata across three sites in south-east Queensland, Australia. *Southern Forests*, 78(3), 225–239. https://doi.org/10.2989/20702620.2016.1183095

Jesus, M. S., Costa, L. J., Ferreira, J. C., Freitas, F. P., Santos, L. C., & Rocha, M. F. V. (2017). Caracterização energética de diferentes espécies de Eucalyptus. *Floresta*, 47(1), 11–16. https://doi.org/10.5380/rf.v47i1.48418

Lima, V. O., Saraiva, K. F., Marchesan, R., Oliveira, W. F. C., Eufrazio, T. P., Santos, M. E. P., Colares, C. J. G., Almeida, V. C., & Moraes, C. B. (2026). Energy quality of different biomasses from Eucalyptus sp. and *Myracrodruon urundeuva* All. species. *Ciência Florestal*, 36, 1–20. https://doi.org/10.5902/1980509894740

Parikh, J. K., Channiwala, S. A., & Ggosal, G. K. (2007). A correlation for calculating elemental composition from proximate analysis of biomass materials. *Fuel*, 86(12), 1710–1719. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2006.12.029

Protásio, P. T., Couto, A. M., dos Reis, A. A., Trugilho, P. F., & Godinho, T. P. (2013). Potencial siderúrgico e energético do carvão vegetal de clones de Eucalyptus spp aos 42 meses de idade. *Pesquisa Florestal Brasileira*, 33(74), 137–149. https://doi.org/10.4336/2013.pfb.33.74.448

Reis, A. A., Protásio, T. P., Melo, I. C. N. A., Trugilho, P. F., & Carneiro, A. C. (2012). Composição da madeira e do carvão vegetal de Eucalyptus urophylla em diferentes locais de plantio. *Pesquisa Florestal Brasileira*, 32(71), 277–290. https://doi.org/10.4336/2012.pfb.32.71.277

Siarudin, M., Awang, S., Sadono, R., & Suryanto, P. (2023). Renewable energy from secondary wood products contributes to local green development: the case of small-scale privately owned forests in Ciamis Regency, Indonesia. *Energy, Sustainability and Society*, 13. https://doi.org/10.1186/s13705-023-00383-7

Serviço Florestal Brasileiro – SFB. (2026). Banco de dados de madeiras brasileiras. https://lpf.florestal.gov.br/pt-br/madeiras-brasileiras

Tambarussi, E. V., Pereira, F. B., da Silva, P. H. M., Lee, D., & Bush, D. (2018). Are tree breeders properly predicting genetic gain? A case study involving Corymbia species. *Euphytica*, 214(8), 150. https://doi.org/10.1007/s10681-018-2229-9

Vieira, T. A. S., Trugilho, P. F., Carabineiro, S. A. C., Zanuncio, A. J. V., Carvalho, A. G., & Branco-Vieira, M. (2023). Impact of chemical composition on Eucalyptus wood clones for sustainable energy production. *Forests*, 14, 2240. https://doi.org/10.3390/f14112240

Wastowski, A. D. (2018). Química da madeira (1ª ed.). Editora Interciência.

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Avaliação do Risco de Queda de *Inga sessilis* na Arborização Urbana por Tomografia de Impulso

Iris Izabel da Silva Cavalcante[1]; Shara Dias de Amorim[1]; Vitória Laurinda de Souza[1]; Karen Tawany de Abreu Viana[1]; Erica Vitoria de Almeida[1]; Jéssica Nunes Silva[2]; Leila Priscila Peters[1]; Patrícia Gomes Ribeiro[1]

[1]Universidade Federal do Acre
[2]Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia

Resumo: A avaliação da integridade estrutural de árvores urbanas é fundamental para identificar defeitos internos que podem comprometer sua estabilidade e aumentar o risco de queda. Este estudo teve como objetivo avaliar a condição estrutural de 20 indivíduos de *Inga sessilis* localizado no estacionamento do campus-sede da Universidade Federal do Acre, utilizando a tomografia de impulso como método não destrutivo. Os indivíduos foram selecionados com base em características associadas ao risco potencial de queda e circunferência à altura do peito igual ou superior a 60 cm. As análises foram realizadas com o equipamento Arbotom®, que gera tomogramas a partir da velocidade de propagação de ondas mecânicas na madeira. A maioria das árvores apresentou predominância de madeira íntegra, indicando boas condições internas. Entretanto, parte das arvores avaliadas apresentou alterações internas associadas à redução da velocidade de propagação das ondas mecânicas, indicando possíveis regiões de deterioração ou descontinuidade do lenho, com diferentes níveis de comprometimento estrutural. A técnica mostrou ser eficiente para avaliação de risco e o manejo da arborização urbana.

Palavras-chave: Integridade estrutural; Ensaio não destrutivo; Deterioração da madeira.

Assessment of Tree Failure Risk in *Inga sessilis* Using Impulse Tomography in Urban Forestry

Abstract: Assessing the structural integrity of urban trees is crucial for identifying internal defects that may compromise their stability and increase the risk of tree failure. This study aimed to evaluate the structural condition of 20 *Inga sessilis* trees located in the parking lot of the Federal University of Acre's main campus, using sonic tomography as a non-destructive assessment method. The trees were selected based on characteristics associated with potential failure risk and a circumference at breast height (CBH) of 60 cm or greater. Analyses were performed using Arbotom® equipment, which generates tomograms based on the propagation speed of mechanical waves through the wood. Most trees showed a predominance of sound wood, indicating satisfactory internal conditions. However, some of the evaluated trees exhibited internal anomalies associated with reduced mechanical wave propagation speeds, suggesting possible areas of wood deterioration or discontinuity, with varying degrees of structural compromise. The technique proved to be effective for detecting internal anomalies and supporting risk assessment and urban tree management.

Keywords: Structural integrity; Non-destructive testing; Wood deterioration.

1. Introdução

A arborização urbana está relacionada à construção de um ambiente mais sustentável nas cidades, sendo baseada principalmente no paisagismo urbano. De acordo com o Instituto Água e Terra (2023), a arborização urbana desempenha um papel fundamental não apenas na estética das cidades, mas também no meio ambiente, atuando no controle da poluição do ar, na estabilização do solo por meio das raízes das plantas e na interceptação das águas da chuva, reduzindo o escoamento superficial. Dessa forma, a arborização é considerada um dos elementos que contribuem para a qualidade de vida nas áreas urbanas, uma vez que ambientes arborizados proporcionam diversos benefícios à saúde humana (Fontes, 2023).

Nesse contexto, *Inga sessilis* (Vell.) Mart., espécie pertencente à família Fabaceae, desempenha importante papel ecológico e com potencial para utilização em projetos de arborização urbana e recuperação de áreas degradadas. Além de fornecer abrigo e alimento para diversas espécies da fauna, a espécie contribui para a melhoria da fertilidade do solo e para a manutenção da biodiversidade (Campos Filho; Sartorelli, 2015). Sua ocorrência em áreas urbanas, incluindo estacionamentos e outros espaços com intenso fluxo de pessoas e veículos, reforça a importância de estudos voltados à avaliação de suas condições fitossanitárias e estruturais, visando à segurança dos usuários.

Desse modo, o desenvolvimento e a aplicação de novas tecnologias voltadas ao manejo e à manutenção da arborização urbana são de grande importância, principalmente para a prevenção de acidentes relacionados à queda de árvores, que podem causar danos sociais, patrimoniais e até mesmo a perda de vidas (Santos, 2022). Para isso, diferentes métodos têm sido empregados na avaliação da integridade estrutural de árvores, entre eles os tomógrafos de impulso (Guardia, 2020; Dudkiewicz & Durlak, 2021). No Brasil, as tecnologias de tomografia de impulso e resistografia têm se destacado como ferramentas de apoio na tomada de decisão para o manejo de árvores em florestas urbanas, sendo empregadas principalmente em avaliações realizadas nos troncos (Emerick, 2021).

Nos centros urbanos, a presença de árvores em áreas de circulação intensa, como ruas, praças, estacionamentos e áreas institucionais, exige estratégias eficientes de monitoramento, uma vez que alterações estruturais internas podem permanecer ocultas durante inspeções visuais. Nesse contexto, métodos não destrutivos, como a tomografia de impulso, apresentam grande potencial para auxiliar órgãos gestores na tomada de decisão, permitindo a identificação precoce de problemas estruturais e contribuindo para a manutenção segura do patrimônio arbóreo urbano.

Assim, essa técnica baseia-se na medição da velocidade de propagação de ondas mecânicas por meio de sensores fixados no tronco ou em galhos, gerando imagens tomográficas que permitem identificar alterações internas da madeira, como regiões degradadas (Rinntech, 2018). Quando associada à avaliação visual, que fornece informações sobre as condições externas da árvore, a tomografia de impulso possibilita diagnósticos mais precisos, contribuindo para uma tomada de decisão mais segura quanto ao manejo e ao risco de queda de indivíduos arbóreos (Carvalho, 2019).

Nesse contexto, a tomografia de impulso é uma importante ferramenta para a avaliação não destrutiva da integridade estrutural de árvores em áreas urbanas. A detecção de defeitos internos possibilita a adoção de medidas preventivas, contribuindo para a segurança dos usuários e para o manejo adequado da arborização. Assim, este estudo teve como objetivo avaliar as condições fitossanitárias e estruturais de árvores localizadas no estacionamento da reitoria da Universidade Federal do Acre por meio da técnica de tomografia de impulso.

2. Material e métodos

O estudo foi conduzido no estacionamento da reitoria do campus sede da Universidade Federal do Acre, localizado no município de Rio Branco, AC, onde foram avaliados 20 indivíduos de *Inga sessilis*. A seleção das árvores foi realizada com base na identificação prévia de características indicativas de potencial risco de queda, incluindo inclinação acentuada do fuste, presença de danos visíveis e sinais de comprometimento estrutural. Adicionalmente, foram considerados apenas indivíduos com circunferência à altura do peito (CAP) igual ou superior a 60 cm. As variáveis dendrométricas mensuradas, bem como os principais indícios de comprometimento observados nos indivíduos avaliados, estão apresentados na Tabela 1.

As avaliações foram realizadas com o auxílio de um tomógrafo de impulso Arbotom®, conectado a um computador portátil, além de martelo e fita métrica para as medições em campo. Inicialmente, determinou-se a circunferência à altura do peito (CAP) dos indivíduos amostrados. Com base nessa medida, quatro sensores foram posicionados ao redor do tronco, distribuídos uniformemente ao longo de sua circunferência.

Para minimizar possíveis interferências na propagação das ondas mecânicas e aumentar a confiabilidade dos resultados, foi adotada uma distância mínima de 15 cm entre sensores adjacentes. Todos os sensores foram instalados a 1,30 m do nível do solo, altura convencionalmente utilizada para avaliações dendrométricas.

Tabela 1 – Parâmetros dendrométricos e condições fitossanitárias de indivíduos de *Inga sessilis* avaliados (ABNT NBR 16246-3/2013)

Código	Nome científico	CAP (cm)	Condição fitossanitária/estrutural	Risco
1	*Inga sessilis*	108	Perfuração + poda inadequada	Médio
2	*Inga sessilis*	106	Perfuração + bifurcação	Médio
3	*Inga sessilis*	93	Perfuração	Baixo
4	*Inga sessilis*	124	Poda inadequada	Médio
5	*Inga sessilis*	100	Inclinação	Médio
6	*Inga sessilis*	121	Inclinação + poda inadequada	Médio
7	*Inga sessilis*	77	Inclinação + poda inadequada	Médio
8	*Inga sessilis*	93	Poda inadequada	Médio
9	*Inga sessilis*	109	Perfuração + poda inadequada	Médio
10	*Inga sessilis*	102	Inclinação	Médio
11	*Inga sessilis*	83	Inclinação	Baixo
12	*Inga sessilis*	118	Inclinação + rachadura	Alto
13	*Inga sessilis*	84	Inclinação + ausência de casca + tortuosidade	Alto
14	*Inga sessilis*	106	Presença de formigueiro + bifurcação	Alto
15	*Inga sessilis*	128	Presença de formigueiro + tortuosidade	Alto
16	*Inga sessilis*	139	Bifurcação	Médio
17	*Inga sessilis*	109	Bifurcação	Médio
18	*Inga sessilis*	124	Bifurcação	Médio
19	*Inga sessilis*	100	Sem observações	Baixo
20	*Inga sessilis*	94	Inclinação + bifurcação	Médio

Posteriormente, foram inseridos pregos ao redor do tronco para possibilitar a fixação dos sensores. Com os sensores devidamente posicionados, realizaram-se impactos mecânicos em cada ponto de medição por meio de um martelo, permitindo a captura dos dados tomográficos (Figura 1).

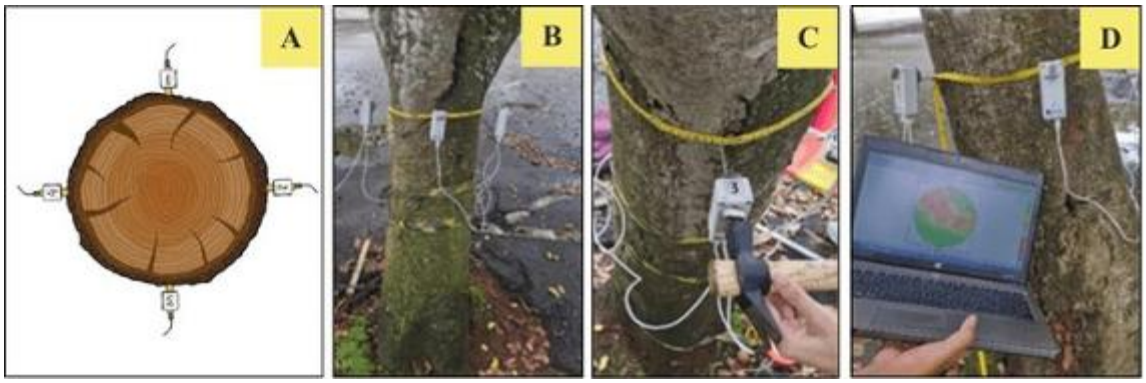


Figura 1 - Etapas do estudo de tomografia em espécie arbórea. A) Esquema da disposição dos sensores na seção transversal do tronco; B) instalação dos sensores ao redor do tronco; C) geração de ondas de impacto por meio de martelo; D) visualização dos resultados no software de análise.

Os impactos aplicados permitiram a propagação de ondas mecânicas pelo interior do tronco, sendo os sinais captados pelos sensores posicionados ao longo de sua circunferência. Com base nos tempos de transmissão obtidos, o software ARBOTOM® realizou o cálculo das velocidades de propagação das ondas e gerou os tomogramas correspondentes à seção transversal de cada árvore. (Medeiros et al., 2017).

A análise das imagens tomográficas baseia-se na variação da propagação das ondas no interior do tronco. Como a velocidade de deslocamento das ondas é influenciada pelas características físicas da madeira, diferenças observadas nos tomogramas podem indicar mudanças em sua integridade estrutural. Dessa forma, áreas com indícios de degradação ou descontinuidade interna apresentam comportamento distinto em relação às regiões de madeira sem alterações significativas.

3. Resultados e discussão

A análise tomográfica realizada nos 20 indivíduos permitiu identificar diferentes padrões de distribuição da velocidade de propagação das ondas no interior do tronco, refletindo distintos níveis de integridade estrutural (Figura 2 e 3). De maneira geral, a maior parte das árvores apresentou predominância de cores verdes nos tomogramas, indicando regiões com maiores velocidades de propagação e, consequentemente, madeira com melhores condições estruturais e menor probabilidade de deterioração interna.

A predominância de áreas em tons de verde na maioria dos indivíduos sugere que a madeira apresenta condições estruturais satisfatórias, pois as maiores velocidades de propagação das ondas estão ligadas a tecidos íntegros e com menor grau de deterioração. De acordo com Allison et al. (2020), a tomografia de impulso é uma das principais técnicas não destrutivas utilizadas para avaliar a integridade estrutural de árvores urbanas, possibilitando a detecção de mudanças internas que nem sempre são visíveis em inspeções visuais.

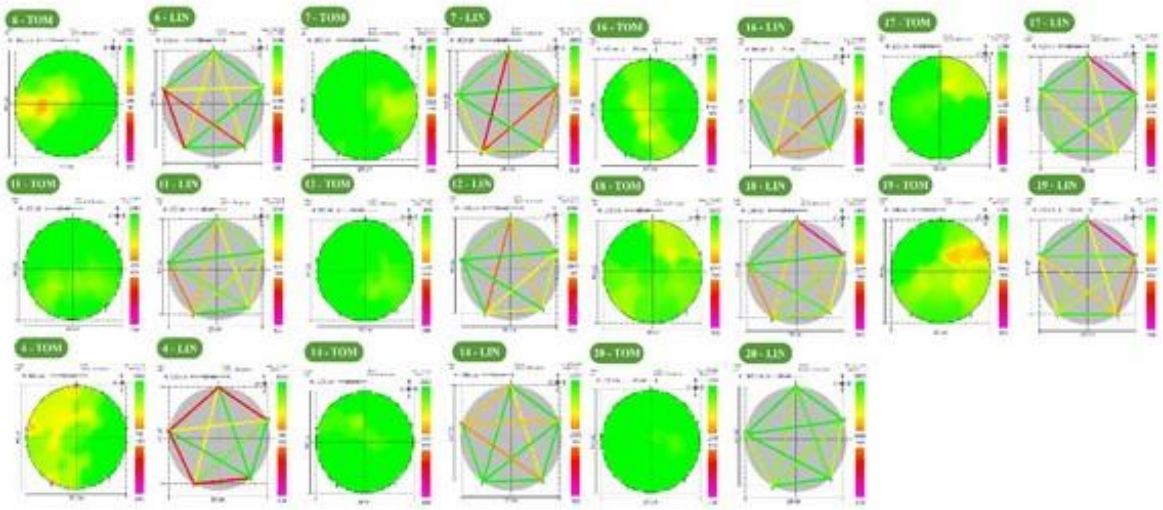
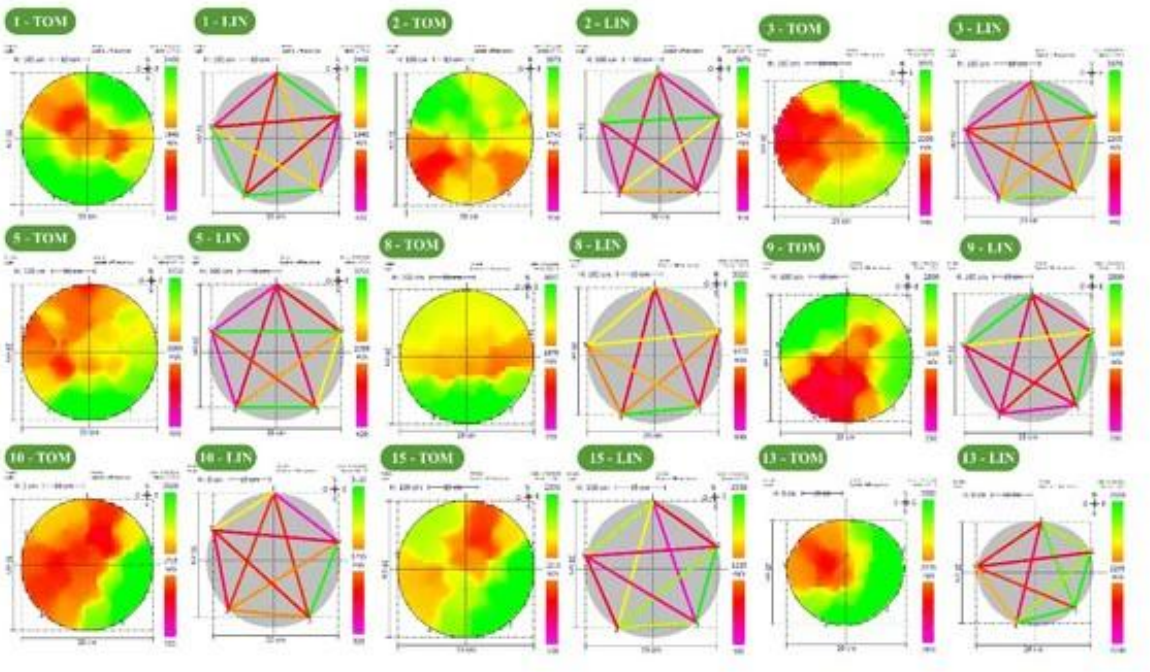


Figura 2: Imagens tomográficas (TOM) e diagramas de ligação entre sensores (LIN) dos 13 indivíduos de *Inga sessilis*. As tonalidades verdes indicam maiores velocidades de propagação das ondas e condições estruturais mais homogêneas do lenho.

Os indivíduos 6, 7, 11, 12, 14, 16, 17, 18, 19 e 20 (Figura 2) apresentaram distribuição predominantemente homogênea, com predomínio de tonalidades verdes e poucas variações internas, sugerindo boa conservação do lenho e ausência de defeitos estruturais significativos. Nesses indivíduos, os gráficos de ligação entre sensores também apresentaram trajetórias com velocidades relativamente uniformes, corroborando a condição de integridade observada nos tomogramas.

Por outro lado, os indivíduos 1, 2, 3, 5, 8, 9, 10, 13 e 15 (Figura 3) apresentaram áreas com tonalidades amarelas, laranjas e vermelhas, indicando redução na velocidade de propagação das ondas em determinadas regiões do tronco. Essas variações podem estar associadas à presença de descontinuidades internas, degradação do lenho, cavidades, rachaduras ou estágios iniciais de deterioração, resultando em heterogeneidade estrutural. Entre as árvores avaliadas, foram observadas diferentes intensidades de alterações internas, variando desde pequenas regiões de heterogeneidade no lenho até áreas mais extensas com redução da velocidade de propagação das ondas. Essas alterações indicam diferentes níveis de



comprometimento estrutural e reforçam a importância da utilização de métodos instrumentais complementares à inspeção visual.

Os resultados observados nesses indivíduos sugerem que as áreas onde a velocidade de propagação das ondas é reduzida podem estar relacionadas à existência de cavidades, fissuras ou deterioração dos tecidos lenhosos. Ademais, o uso de técnicas instrumentais complementa a avaliação visual, melhorando a precisão na detecção de defeitos internos e auxiliando em diagnósticos mais seguros sobre a condição estrutural das árvores.

Entre os indivíduos avaliados, foram observadas árvores com maior extensão de áreas caracterizadas por baixas velocidades de propagação das ondas, indicando maior heterogeneidade interna do lenho e necessidade de acompanhamento mais criterioso. Nesses casos, foram identificadas áreas extensas com tonalidades alaranjadas e vermelhas distribuídas ao longo da seção transversal analisada.

Figura 3: Imagens Tomográficas (TOM) e diagramas de propagação das ondas (LIN) dos indivíduos que apresentaram maiores indícios de comprometimento estrutural interno. As tonalidades quentes indicam redução da velocidade das ondas mecânicas e possíveis.

Ademais, observou-se que alguns indivíduos com sinais visuais de possíveis problemas estruturais, como inclinação do fuste, fissuras e ausência de casca, também apresentaram alterações identificadas nos tomogramas. No entanto, nem todas as árvores com defeitos externos mostraram sinais significativos de deterioração interna, destacando o papel da

tomografia de impulso como um recurso adicional à inspeção visual na análise da estabilidade de árvores urbanas.

Resultados semelhantes foram observados por Palermo (2022), em que a predominância de baixas velocidades de propagação de ondas mecânicas esteve associada à presença de cavidades no lenho e aos tecidos danificados, refletindo percentuais de danos mais elevados. Além disso, o autor destaca que as áreas representadas pela coloração vermelha apresentam uma transição para a tonalidade rosa, enquanto as regiões alaranjadas apresentam uma combinação das cores rosa e vermelha, indicando diferentes níveis de comprometimento estrutural da madeira.

Diante disso, a presença de cavidades no interior do tronco pode influenciar a propagação das ondas, causando alterações em sua velocidade. Essas mudanças podem ser utilizadas para identificar possíveis defeitos internos e auxiliar na estimativa do tamanho dessas cavidades, demonstrando a eficiência do arbotom na avaliação não destrutiva da condição interna das árvores (Secco, 2011).

4. Conclusões

A tomografia de impulso mostrou-se uma ferramenta eficiente para a avaliação não destrutiva da integridade estrutural de indivíduos de *Inga sessilis* presentes na arborização urbana da Universidade Federal do Acre. A maioria das árvores avaliadas apresentou predominância de madeira íntegra e distribuição homogênea das velocidades de propagação das ondas mecânicas, indicando condições estruturais satisfatórias. Entretanto, parte das árvores avaliadas apresentou regiões internas com redução da velocidade de propagação das ondas, indicando possíveis alterações estruturais do lenho e necessidade de monitoramento ou intervenções de manejo.

As avaliações visuais identificaram diferentes condições fitossanitárias e estruturais, como inclinação do fuste, perfurações, rachaduras, ausência de casca, bifurcações e presença de formigueiros. Contudo, nem todos os indivíduos que apresentaram defeitos externos exibiram comprometimento interno significativo, evidenciando que a inspeção visual isolada pode não ser suficiente para a adequada estimativa do risco de queda.

Dessa forma, a associação entre avaliação visual e tomografia de impulso aumenta a confiabilidade dos diagnósticos, permitindo identificar indivíduos que demandam monitoramento ou intervenções de manejo. Os resultados demonstram que a técnica constitui

uma importante ferramenta para subsidiar a gestão da arborização urbana, contribuindo para a redução do risco de acidentes, a segurança dos usuários e a conservação do patrimônio arbóreo.

5. Agradecimentos

Os autores expressam seu agradecimento à Universidade Federal do Acre (UFAC) pelo apoio institucional e pelas condições oferecidas para o desenvolvimento desta pesquisa. Estendem seus agradecimentos aos técnicos e colaboradores que auxiliaram nas atividades de campo e na operação dos equipamentos utilizados, contribuindo para a obtenção dos resultados apresentados. A todos que colaboraram, direta ou indiretamente, para a realização deste trabalho.

6. Referências bibliográficas

Campos Filho, E. M., & Sartorelli, P. A. R. (2015). *Guia de árvores com valor econômico*. Agroicone; Iniciativa INPUT.

Carvalho, C. A. (2019). *Tomógrafo de impulso como método não destrutivo para determinação da sanidade de árvores plantadas às margens do rio Carahá no município de Lages/SC* (Dissertação de mestrado, Universidade do Estado de Santa Catarina).

Dudkiewicz, M., & Durlak, W. (2021). Sustainable management of very large trees with the use of acoustic tomography. *Sustainability*, 13. https://doi.org/10.3390/su13063304

Emerick, T. G. (2021). *Risco de queda de árvores urbanas: A associação entre os parâmetros da análise visual, tomogramas e ocorrência de queda* (Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Viçosa).

Fontes, Y. M. (2023). Saúde ambiental no ambiente urbano: A importância da arborização e jardinagem urbana e o direito ao meio ambiente saudável. *Pensar Acadêmico*, 21(3).

Guardia, I. (2020). *Velocidade de onda mecânica na avaliação de raízes de ancoragem de árvores nas cidades* (Dissertação de mestrado, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo).

Instituto Água e Terra. (2026). *Florestas urbanas (arborização urbana)*. https://www.iat.pr.gov.br/Pagina/Florestas-Urbanas-Arborizacao-Urbana

Medeiros, R. G. S., Nascimento, C. C., Barros, S. V. S., Kroessin, A., Paula, E. V. C. M., & Higuchi, N. (2017). Tomografia de impulso na avaliação da sanidade e rendimento de *Micrandopsis scleroxylon* W. Rodr. Nativa, 5(Especial), 649–655. https://doi.org/10.5935/2318-7670.v05nespa28

Palermo, L. F. (2022). *Comparação de dois métodos de avaliação de danos internos no fuste de árvores urbanas* (Monografia de graduação, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro).

Rinntech.(2018).Arbotom®.http://www.rinntech.de/content/view/7/35/lang,english/index.html

Santos, V. R. N. (2022). *Comparação entre métodos geofísicos e a tomografia sônica aplicados na análise de troncos e raízes de árvores* (Monografia de graduação, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro).

Secco, C. B. (2011). *Detecção de ocos em toras utilizando métodos de propagação de ondas ultrassônicas* (Dissertação de mestrado, Universidade Estadual de Campinas).

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Avaliação exploratória do potencial tecnológico de espécies madeireiras nativas da Amazônia

Rita Vinhal[1]; Waldelaine Rodrigues Hoffmann [1]; José Nivaldo Garcia[2]

[1] Programa de Pós-Graduação em Recursos Florestais – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz da Universidade de São Paulo
[2] Departamento de Ciências Florestais – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz da Universidade de São Paulo

Resumo: A Floresta Amazônica constitui a maior extensão de floresta tropical do mundo, sendo considerada um *hotspot* de diversidade. Em paralelo, algumas espécies passam por processo de superexploração seletiva. Um gargalo para essa exploração seletiva é a baixa disponibilidade de informações das propriedades mecânicas das espécies amazônicas, especialmente as alternativas as espécies mais exploradas. Este estudo tem o objetivo de realizar uma caraterização preliminar das propriedades de resistência à compressão paralela às fibras e densidade aparente de 19 espécies de madeiras nativas da Amazônia, caracterizando o potencial tecnológico da madeira, avaliando a variabilidade dos resultados e as relações entre propriedades apoiando o uso racional e sustentável dos recursos madeireiros. Foram realizados ensaios de resistência à compressão paralela às fibras e determinação da densidade aparente. Foi observada uma correlação significativa, diretamente proporcional entre a densidade aparente média e a resistência compressão paralela as fibras, com as análises estatísticas foram confirmadas as correlações.

Palavras-chave: Propriedade mecânica; Compressão paralela às fibras; Densidade aparente.

Exploratory assessment of the technological potential of native Amazonian timber species

Abstract: The Amazon Rainforest is the world's largest tropical forest and is considered a biodiversity hotspot. At the same time, some species are subject to selective overexploitation. A major obstacle to this selective exploitation is the limited availability of information on the mechanical properties of Amazonian species, especially those that could serve as alternatives to the most heavily exploited species. This study aims to conduct a preliminary characterization of the compressive strength parallel to the grain and bulk density of 19 native Amazonian wood species, characterizing the wood's technological potential, evaluating the variability of the results and the relationships between properties, and supporting the rational and sustainable use of timber resources. Tests were conducted to measure compressive strength parallel to the grain and to determine bulk density. A significant, directly proportional correlation was observed between the average bulk density and compressive strength parallel to the grain; statistical analyses confirmed these correlations.

Keywords: Mechanical properties; Compression parallel to the fibers; Apparent density.

1. Introdução

Dentre as ações para a mitigação das mudanças climáticas, a presença das florestas tropicais, naturais e plantadas contribuem na captura e retenção de carbono da atmosfera, isto nos motiva a ampliar os estudos das propriedades da madeira. A Floresta Amazônica constitui a maior extensão de floresta tropical do mundo (Hoang e Kanemoto, 2021) e estima-se que ela comporte aproximadamente 12.000 espécies arbóreas (Ter-Steege et al., 2016). Essa vasta diversidade desperta a atenção do comércio global de madeira tropical. Paralelamente, há um desafio quanto a superexploração seletiva de algumas espécies florestais. No ano de 2024, foram comercializados cerca de 6,5 milhões de m³ de madeira nativa em tora proveniente da Amazônia Legal Brasileira, e desse montante, quase 22% do volume total esteve distribuído em quatro espécies, sendo elas *Manilkara elata* (8,18%), *Dinizia excelsa* (5,93%), *Goupia glabra* (4,83%) e *Dipteryx odorata* (3,31%) (IMAFLORA, 2025).

Vários estudos vêm procurando identificar fatores que afetam as propriedades físico-mecânicas da madeira alguns desses são externos, depende do ambiente onde a árvore se desenvolve, clima, solo e posição geográfica; outros são inerentes à própria madeira, genética, densidade básica, largura dos anéis, quantidade de nós, quantidade de extrativos e teor de umidade.

Como material de engenharia, a madeira possui relevância histórica, sendo amplamente empregada em diversas aplicações estruturais e não estruturais. Sua utilização é justificada pela combinação de características como renovabilidade, baixa energia incorporada, estética e ótimas propriedades mecânicas (Lima et al., 2010). No contexto brasileiro, a biodiversidade florestal oferece uma variedade de espécies nativas com potencial ainda inexplorado ou subutilizado, o que ressalta a importância de estudos sobre suas propriedades.

A caracterização tecnológica da madeira é fundamental para otimizar seu uso, garantir a segurança das estruturas e promover a valoração econômica das espécies florestais, vários autores utilizam as propriedades físicas para qualificar a utilização e explicar o comportamento da madeira. As propriedades da madeira são afetadas por diversos fatores, que refletem em variações no lenho, resistência mecânica e densidade (HOFFMANN, 2025). Dentre as propriedades mais relevantes, destacam-se a resistência mecânica e a densidade, que estão intrinsecamente correlacionadas e influenciam diretamente o desempenho da madeira. A densidade, em particular, é frequentemente utilizada como um indicador da qualidade da madeira, apresentando forte correlação com a maioria das propriedades mecânicas (Rocha, 1994). É importante que a variabilidade da densidade e outras propriedades mecânicas sejam

estudadas, entre outras propriedades, para a segurança e o desempenho de estruturas de madeira (Garcia et al., 2003).

Tradicionalmente, a determinação das propriedades mecânicas da madeira é realizada por meio de ensaios destrutivos em corpos de prova padronizados, conforme normas técnicas como a ABNT NBR 7190-3 (ABNT, 2022). No entanto, a disponibilidade limitada de material para espécies nativas, especialmente as de ocorrência mais restrita ou de difícil acesso, impõe desafios metodológicos. Nesse cenário, a utilização de corpos de prova de pequenas dimensões surge como uma alternativa viável para a caracterização tecnológica, permitindo a obtenção de dados importantes mesmo com amostras reduzidas. Este estudo busca fornecer informações para a engenharia e tecnologia da madeira, apoiando o uso racional e sustentável dos recursos madeireiros.

Dessa forma, a redução da pressão exercida sobre as espécies madeireiras superexploradas pode ser mitigada por meio da utilização de espécies alternativas com propriedades madeireiras semelhantes, considerando aquelas que possuam estoque florestal para sustentar a exploração de forma sustentável. Entretanto, a baixa disponibilidade de informações tecnológicas sobre espécies madeireiras amazônicas ainda é um gargalo a ser superado quanto o conhecimento das propriedades físicas e mecânicas das espécies madeireiras amazônicas. Nessa perspectiva, o objetivo deste trabalho é realizar uma caraterização preliminar das propriedades de resistência à compressão paralela às fibras e densidade aparente de 19 espécies de madeiras nativas amazônicas, avaliando a variabilidade dos resultados e as relações entre essas propriedades.

2. Material e métodos

Nesse estudo, foram utilizadas dezenove espécies madeireiras da Amazônia brasileira, coletadas de discos da região basal após a derrubada das árvores, proveniente da cidade Rolim de Moura, no estado de Rondônia, coletadas e fornecidas pelo Laboratório de Ecologia Isotópica do Centro de Energia Nuclear na Agricultura da USP (CENA). Para a determinação das propriedades de resistência à compressão paralela às fibras e densidade aparente, foram utilizados corpos de prova com dimensões aproximadas de 2 x 2 x 3 cm, retiradas dos discos da base das árvores. A escolha por essas dimensões reduzidas foi devido à necessidade de otimizar o uso do material disponível de ocorrência limitada. Os ensaios foram conduzidos seguindo adaptações de metodologias padronizadas, considerando as especificações para corpos de prova isentos de defeitos, conforme diretrizes da ABNT NBR 7190-3 (ABNT, 2022).

As amostras foram climatizadas em ambiente controlado (UR = 65%; T = 20 °C), em equilíbrio higroscópico (teor de umidade, TU ≈ 12%). Os ensaios de resistência à compressão paralela às fibras foram realizados utilizando uma máquina de ensaios universal (modelo Amsler-Wolpert). Para determinar a densidade aparente, foi determinado o volume dos corpos de prova com paquímetro digital (precisão de 0,01 mm) e a massa por meio de balança analítica (precisão de 0,01 g). A densidade aparente ao ar (teor de umidade, TU ≈ 12%) foi então calculada como a razão entre a massa e o volume das amostras, de acordo com a norma brasileira ABNT NBR 7190 (2022).

Os dados obtidos foram submetidos a análise estatística para identificar padrões e correlações entre as propriedades avaliadas. Foi utilizado delineamento inteiramente casualizado com dezenove tratamentos (espécies) e quatro repetições (corpos de prova). Pra testar a homogeneidade e normalidade de variância foram utilizados os testes de Bartlett e Shapiro-Wilk, respectivamente, com nível de significância de 5%. A análise de variância (ANOVA) foi realizada seguida do teste de Scott-Knott com nível de significância de 5%. Por fim, foi realizada a análise de regressão linear e a determinação dos coeficientes de correlação de Pearson entre as variáveis estudadas.

3. Resultados e discussão

A Tabela 1 apresenta os resultados da avaliação inicial em relação a resistência a compressão paralela às fibras (fc,0) e a densidade aparente das espécies avaliadas. A análise de variância (ANOVA) indicou que houve diferença significativa ($p < 0,05$) entre espécies nas propriedades avaliadas. Os valores variaram de 27,2 a 111,6 MPa para a propriedade de resistência a compressão paralela às fibras e de 0,396 a 1,171 g/cm³ (Tabela 1). Dentre os materiais foram verificadas diferenças significativas ($p < 0,05$) para o Módulo de Ruptura (MOR) no ensaio de compressão paralela às fibras das espécies amazônicas avaliadas. Ao realizar o teste de agrupamento de médias, foi possível obter oito grupos de resistência, variando de “a” a “h” (Tabela 1).

Tabela 1 – Densidade aparente e resistência a compressão paralela às fibras da madeira de espécies da Amazônia brasileira

Espécie	Nome popular	$f_{c,0}$ (MPa)	Densidade (g/cm³)
Dialium guianense	Pororoca	92,8 (3,9) b	1,069 (0,033) b
Peltogyne paniculata	Roxinho	87,8 (4,3) b	1,131 (0,027) a
Nectranda spp.	Canela	60,8 (2,5) e	0,680 (0,042) f
Martiodendron elatum	Tamarindo	107,8 (1,8) a	1,016 (0,029) c

Castilla elastica	Caucho	35,9 (4,6) h	0,476 (0,013) h
Dipteryx odorata	Cumaru	111,6 (10,0) a	1,171 (0,047) a
Cedrela odorata	Cedro	27,2 (3,3) h	0,506 (0,010) h
Hymenaea courbaril	Jatobá	69,2 (6,0) d	1,016 (0,041) c
Couratari oblongifolia	Tauari Branco	65,4 (7,2) d	0,824 (0,041) e
Endopleura uchi	Uxi	51,6 (7,6) f	0,802 (0,029) e
Hymenolobium modestum	Angelim Pedra	65,7 (14,0) d	0,989 (0,042) c
Aspidosperma polyneuron	Peroba	77,9 (5,5) c	0,933 (0,043) d
Vatairea spp.	Angelim Amargoso	65,2 (3,9) d	0,819 (0,055) e
Andira stipulacea	Angelim coco	61,5 (2,9) e	0,829 (0,034) e
Ruizterania albiflora	Catuaba	45,9 (3,8) g	0,635 (0,049) g
Clarisia racemosa	Guariúba	54,4 (4,9) f	0,708 (0,037) f
Tabebuia cassinoides	Caxeta	28,5 (1,4) h	0,396 (0,004) i
Apuleia leiocarpa	Garapeira	70,3 (6,0) d	0,834 (0,016) e
Pouteria sp.	Abiurana	72,2 (3,6) d	1,024 (0,041) c

Sabe-se que existem significativas variações entre as espécies e que a correta utilização de um material está associada às suas características físico-mecânicas (TREVISAN 2008). Os maiores valores de resistência à compressão paralela às fibras foram observados para as espécies *Dipteryx odorata* e *Martiodendron elatum* (grupo a), com médias de 111,60 MPa e 107,8 MPa, respectivamente (Tabela 1). Esses valores são considerados elevados para o material madeira, indicam um excelente potencial dessas espécies para aplicações estruturais que exigem alta resistência mecânica (Arriaga et al., 2023). O grupo de espécies que resistiram menos ao esforço ensaiado (grupo h) foram *Castilla elástica (*35,9 MPa*), Tabebuia cassinoides* (28,5 MPa) e *Cedrela odorata* (27,2 MPa) (Tabela 1). Contudo, essas espécies ainda possuem potencial de uso, sendo importante direcionar seu uso para esforço que demandem menor resistência a compressão paralela as fibras. Na construção civil, por exemplo, o uso de vigas de madeira requer maior resistência a compressão paralela as fibras, enquanto em pilares a compressão maior ocorre no mesmo sentido das fibras. as aplicações de madeiras de menor densidade deve ser direcionadas a usos não estruturais ou de baixas solicitações mecânicas.

A expressiva amplitude entre a maior resistência média (111,60 MPa) e o menor valor (27,18 MPa) reforça a heterogeneidade e diversidade de resistências da madeira das espécies amazônicas, o que deve ser considerado para a correta destinação tecnológica da madeira, os

valores de resistência à compressão paralela às fibras obtidos situam-se em conformidade com a amplitude descrita na literatura.

Valores normalmente observados são próximos ao esperado, a variação de algumas propriedades como densidade e resistência podem ser explicadas devido a madeira ser um material heterogêneo, portanto variando de espécies para espécie, em função da idade do material e posicionamento de coleta das amostras (Schulz, 2020).

Na densidade aparente da madeira das espécie avaliadas, os maiores valores foram registrados para as espécies *Dipteryx odorata* e *Peltogyne paniculata* (grupo a), com médias que variaram de 1,171 g/cm³ a 1,131 g/cm³ (Tabela 1). Considerando a classificação de densidade da madeira proposta por Csanády et al. (2015), as amostras avaliadas estão distribuídas em diversas classes de densidade, em que os materiais dos grupos 'a', 'b' e 'c' (*Dipteryx odorata*, *Peltogyne paniculata*, *Dialium guianense*, *Pouteria* sp., *Hymenaea courbaril* e *Martiodendron elatum*) apresentaram densidade classificada como muito pesada. Em contrapartida, a *Castilla elastica* (0,476 g/cm³; grupo h) e *Tabebuia cassinoides* (0,396 g/cm³; grupo i) apresentaram densidade classificada como leve. A densidade é um parâmetro decisivo para o mercado de madeira serrada (Rocha et al., 2020), e espécies com maiores valores de densidade estão associadas a maiores resistências mecânica e estabilidade dimensional, características importantes para móveis e construção civil (Rocha et al., 2020; Boschetti et al., 2020; Arriaga et al., 2023; Hoffmann et al., 2025).

Em relação à densidade aparente, a variação encontrada reflete o amplo espectro característico da flora arbórea da Amazônia. Os valores mais altos observados são de um grupo madeiras classificadas como muito pesadas. Da mesma forma, as baixas densidades confirmam o padrão físico esperado para essas espécies, validando a representatividade da amostragem em corpos de prova de pequenas dimensões.

Avaliando a relação entre a densidade média e a resistência compressão paralela as fibras, são observadas uma alta correlação significativa ($r = 0,906$; $p < 0,05$) (Figura 1), e ainda confirmando que maiores valores de densidade resultam em maior resistência da madeira das espécies avaliadas. O modelo também apresentou capacidade preditiva elevada, ($R^2 = 0,821$), indicando que 82,1% da variação da resistência compressão paralela as fibras são explicadas pela variação da densidade. Esses resultados foram muito próximos ao encontrado por Souza et al. (2025), que avaliaram as propriedades físicas, mecânicas e de combustão de 12 espécies amazônicas.

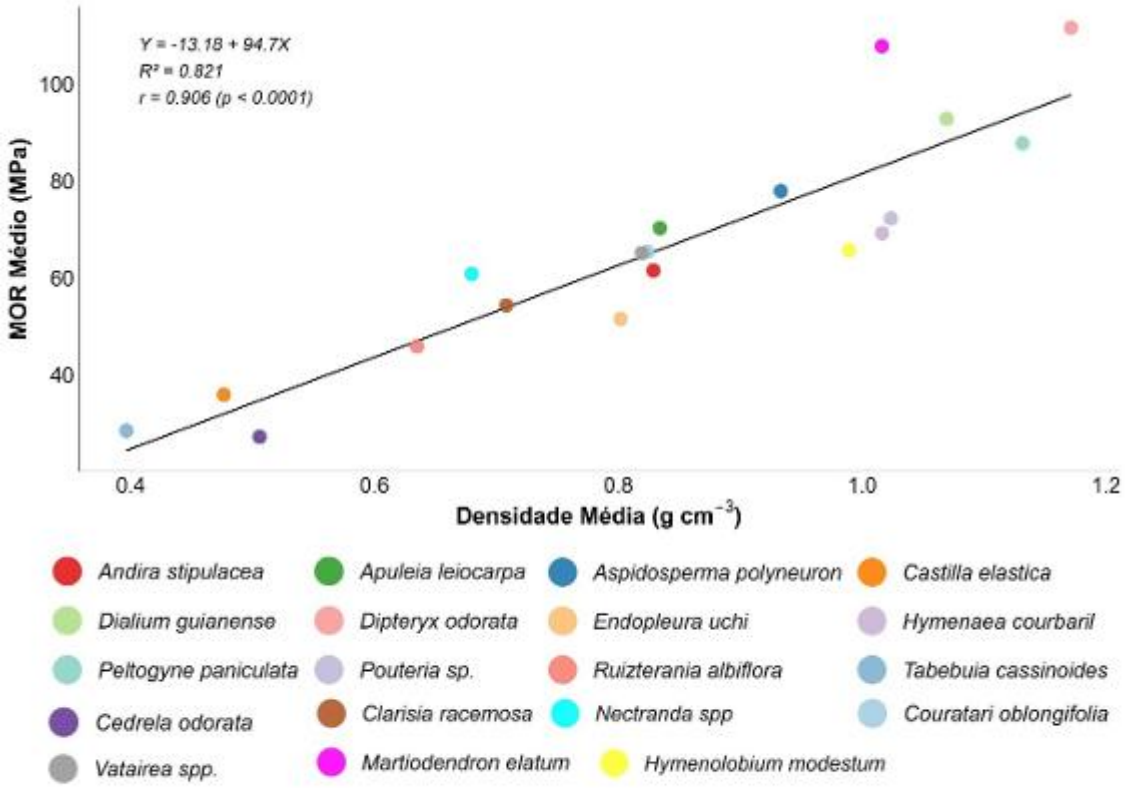


Figura 1 – Relação entre a densidade e a resistência à compressão paralela às fibras, com ajuste por regressão linear e coeficiente de correlação de Pearson (r).

Do aspecto tecnológico, as espécies de *Castilla elástica* e *Tabebuia cassinoides*, que apresentaram densidade classificada com leve, estão entre as que apresentaram os menores valores de resistência. Essa relação está associada as características de formação do lenho e anatomia. Madeiras menos densas possuem maior proporção de espaços celulares vazios, apresentado lumens maiores e paredes celulares mais delgadas, que reduz a quantidade de matéria sólida por volume para resistir aos esforços de compressão (Arriaga et al., 2023). Na mesma perspectiva, as espécies de maiores densidades, alcançaram maior resistência mecânica.

A forte correlação positiva entre a densidade e a resistência à compressão confirma a densidade aparente como um indicador prático e confiável para a estimativa da capacidade mecânica de espécies amazônicas nativas. A identificação de agrupamentos com propriedades físicas e mecânicas equivalentes evidencia o potencial de inserção de espécies alternativas no mercado florestal, estimulando a diversificação do uso madeireiro e o manejo florestal sustentável.

4. Conclusões

Nos ensaios de compressão paralela às fibras e quanto a densidade, foram verificadas diferenças significativas entre as espécies amazônicas, além disso foi observada uma correlação significativa, diretamente proporcional entre a densidade média e a resistência compressão paralela as fibras.

5. Agradecimentos

Os autores agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), código 001; ao Professor Doutor Luiz Antonio Martinelli do Laboratório de Ecologia Isotópica do Centro de Energia Nuclear na Agricultura da USP (CENA), por fornecer o material e ao Laboratório de Ensaios Mecânicos de Madeira e Derivados da ESALQ/USP, onde os ensaios foram conduzidos. Agradecem ainda ao Departamento de Ciências Florestais da ESALQ/USP pelo apoio relacionado a infraestrutura.

6. Referências bibliográficas

Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2022). Projeto de estruturas de madeira - Parte 3: Métodos de ensaio para corpos de prova isentos de defeitos para madeiras de florestas nativas (NBR 7190-3). ABNT.

Boschetti, W. T. N., Vidaurre, G. B., Silva, J. G. M., et al. (2020). Densidade e sua variação na madeira de eucalipto. In G. B. Vidaurre, J. G. M. Silva, J. C. Moulin, & A. C. O. Carneiro (Orgs.), Qualidade da madeira de eucalipto proveniente de plantações no Brasil (pp. 137–158). Edufes.

Csanády, E., Magoss, E., & Tolvaj, L. (2015). Quality of machined wood surfaces. Springer.

Garcia, J. N., et al. (2003). Correlações lineares entre as principais características tecnológicas da madeira de clones de *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus urophylla*. Scientia Forestalis, (63), 115-125.

Hoang, N. T., & Kanemoto, K. (2021). Mapping the deforestation footprint of nations reveals growing threat to tropical forests. Nature Ecology & Evolution, 5(6), 845-853.

Hoffmann, W. R. (2025). Influência do sítio na qualidade do lenho de árvores de *Tectona grandis* de plantações de rápido crescimento (Dissertação de mestrado). Universidade Federal de Mato Grosso.

Hoffmann, W. R., Campos, C. M., Pereira, B. L. C., & Oliveira, A. C. (2026). Properties of *Eucalyptus* clonal wood from a tropical region for application in civil construction. Discover Civil Engineering, 3, 77. https://doi.org/10.1007/s44290-026-00469-z

Instituto de Manejo e Certificação Florestal e Agrícola. (2025). Anuário Timberflow: Diagnóstico da Madeira Nativa na Amazônia Legal em 2024. IMAFLORA. https://admin.imaflora.org/public/media/biblioteca/anuario_timberflow_2025_vf.pdf

Lima, I. L., Longui, E. L., Andrade, I. M., & Garcia, J. N. (2010). Efeito da procedência em algumas propriedades da madeira de *Gallesia integrifolia* (Spreng.) Harms. Revista do Instituto Florestal, 22(2), 250-262.

Rocha, J. S. (1994). A segurança de estruturas de madeira determinada a partir da variabilidade da densidade básica e de propriedades mecânicas de madeiras amazônicas (Dissertação de mestrado). Universidade de São Paulo.

Rocha, S. M. G., Vidaurre, G. B., Pezzopane, J. E. M., Almeida, M. N. F., Carneiro, R. L., Campoe, O. C., Scolforo, H. F., Alvares, C. A., Neves, J. C. L., Xavier, A. C., & Figura, M. A. (2020). Influence of climatic variations on production, biomass and density of wood in eucalyptus clones of different species. For Ecol Manag, 473, 118290. https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118290

Schulz, H.R., Gallio, E., Acosta, A.P., Gatto, D.A., et al., revista Matéria, v.25, n.3, 2020. https://doi.org/10.1590/S1517-707620200003.1095

Souza, L. V. C., Zanatta, B. P., Siqueira, A. B., Corradi Pereira, B. L., Lengowski, E. C., & Oliveira, A. C. (2025). Physical, mechanical, and combustion properties of twelve wood species from the Brazilian Amazon. Maderas. Ciencia y Tecnología, 27, 12. https://doi.org/10.22320/S0718221X/2025.12

Ter Steege, H., Vaessen, R., Cárdenas-López, D., Sabatier, D., Antonell, A., Oliveira, S. M., et al. (2016). A descoberta da flora arbórea amazônica com uma lista atualizada de todos os táxons arbóreos conhecidos. Sci Rep, 6, 29549. https://doi.org/10.1038/srep29549

Trevisan, R., Haselein, C.R., Melo, R.R., et al. “Variação radial da massa específica básica da madeira de Eucalyptus grandis W. Hill ex Maiden”. Floresta, n.3, pp. 553-559, 2008.

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Avaliação longitudinal dos extrativos da madeira e da casca de *Eucalyptus* e *Corymbia*

Stéfany Vieira Silva[1]; Dalton Longue Júnior[1]; Laura da Silva Rocha[1]; Matildes Santos Borges[1]; Elen de Sousa Barbosa[1]

[1] Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia

Resumo: Os extrativos são componentes químicos da madeira que causam problemas no processo de polpação e entender como a distribuição de extrativos ao longo do fuste ocorre pode amenizar problemas. O objetivo da pesquisa foi avaliar a distribuição dos extrativos na madeira e na casca ao longo das diferentes posições do fuste de *Eucalyptus* e *Corymbia*. Para a realização da pesquisa, as serragens dos clones dos gêneros avaliados foram submetidas a extrações em equipamento tipo Soxhlet utilizando solvente simples (acetona), conforme norma Tappi T 204 cm-17, e dois solventes (acetona + água). A partir desta análise foi possível detectar que na base da madeira de maiores idades estão concentrados os maiores teores de extrativos, bem como na casca nas posições base e meio das árvores. A relação entre o teor de extrativos da madeira e da casca de *Eucalyptus* e *Corymbia* varia em função da espécie, devendo ser verificadas cada uma separadamente.

Palavras-chave: Acetona, Qualidade da Madeira, Composição química.

Longitudinal evaluation of the extractives in the wood and the bark of *Eucalyptus* and *Corymbia*

Abstract: Extractives are chemical components of wood that cause problems during the pulping process; than understanding their distribution along the stem can help mitigate these issues. The objective of the research was to evaluate the distribution of extractives in the wood and bark along different positions of the *Eucalyptus* and *Corymbia* stems. For the study, the sawdust from the clones of the evaluated genera was subjected to extraction using Soxhlet-type equipment with a single solvent (acetone), in accordance with TAPPI T 204 cm-17, and two solvents (acetone + water). The analysis revealed that the highest extractive contents were concentrated at the base of the wood in older trees, as well as in the bark at the base and middle sections. The relationship between extractive content in the wood and bark of *Eucalyptus* and *Corymbia* varies by species, requiring each to be assessed individually.

Keywords: Acetone; Wood Quality; Chemical composition.

1. Introdução

Desde os primórdios a madeira tem sido um dos materiais mais utilizados pelo homem devido sua versatilidade e fácil manuseio. Inicialmente era utilizada como combustível para gerar fogo (aquecimento), e com o passar do tempo, ela passou a ser utilizada em construções devido sua capacidade de isolamento térmico, em confecção de móveis por sua beleza, e na indústria por sua diversa composição química. (Lehr, M, 2021)

A madeira é um material heterogêneo constituído em sua maior parte por celulose e hemicelulose, fração de polissacarídeos da parede celular, e por lignina. Em menor parte, é composta por componentes externos a parede celular como os extrativos e os minerais (Silvério, 2008). Na indústria, os principais compostos da árvore a serem utilizados são a celulose para produção de polpa e papel e a lignina para a produção de carvão, porém os extrativos influenciam significativamente os produtos e os processos dessas indústrias.

Os extrativos são compostos complexos, formados por taninos, fenóis, terpenos, ácidos graxos, ceras, gorduras e ácidos resinóicos, em sua maioria solúveis em soluções alcalinas (Sixta, 2006). Eles estão distribuídos ao longo do fuste tanto na madeira quanto na casca. Esse monitoramento se torna importante para o processo industrial pois permite prever problemas e pode controlar os problemas com uso de reagentes químicos específicos.

Por esse motivo, o objetivo desta pesquisa foi avaliar o teor de extrativos presentes na madeira e na casca de árvores do gênero de *Eucalyptus* e *Corymbia* e sua relação ao longo do fuste de indivíduos de diferentes idades.

2. Material e métodos

2.1. Coleta do material

Para a realização do presente estudo, os materiais utilizados foram toretes de clones do gênero *Eucalyptus* e *Corymbia* advindos de plantios comerciais localizados na região Litoral Norte da Bahia. As análises foram realizadas no Laboratório de Tecnologia de Produtos Florestais (*WoodTech*) da Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia, Vitória da Conquista. Foram coletados um clone de *Eucalyptus* com duas idades (3 e 7 anos) e um clone de *Corymbia* com três idades (3, 7 e 9 anos).

2.2. Preparo da serragem de madeira e casca

Os toretes de madeira foram cortados em discos, depois transformados em palitos com o auxílio de um facão, descartando pedaços com presença de nós, fungos, casca, entre outros componentes que poderiam afetar os resultados. A casca separada da madeira foi guardada. Em

seguida, os materiais foram separados conforme a posição na árvore (base, meio e topo), clone (dois) e a idade (diversas).

Os palitos de madeira e os fragmentos da casca passaram por um moinho de facas tipo Willey, separadamente, o que resultou na serragem (Figura 1). A serragem passou por um peneiramento utilizando um agitador de peneiras a 10 hertz por 10 minutos, sendo a fração utilizada a que passou pela peneira de 40 mesh e retida na peneira de 60 mesh (fração aceite) conforme a norma TAPPI T 257 cm-85.

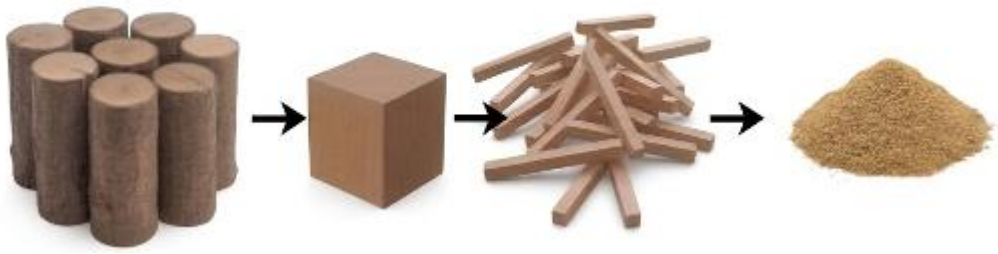


Figura 1 – Esquema de fragmentação da madeira e da casca dos clones de *Eucalyptus* e *Corymbia*.

2.3. Extração dos compostos

Após obtida a serragem, a umidade foi determinada pela norma TAPPI 412 om-16 e as amostras foram pesadas em uma balança analítica de precisão. As extrações realizadas foram denominadas extração simples, utilizando apenas acetona, e a extração dupla, utilizando acetona + água. A extração simples foi realizada apenas no aparelho tipo Soxhlet, onde as amostras permaneceram por 5 horas, conforme a norma TAPPI 204 cm-17, enquanto na extração dupla, os sachês com as serragens, após extração no Soxhlet, foram retirados das cornetas e colocadas em um béquer com água quente, em banho maria a 100 °C por mais 1 h de extração.

Após a segunda extração em banho maria, a serragem foi filtrada em cadinhos filtrantes com o auxílio de um kitasato aderido a uma bomba de vácuo, e a solução filtrada foi colocada em béqueres de 500 ml.

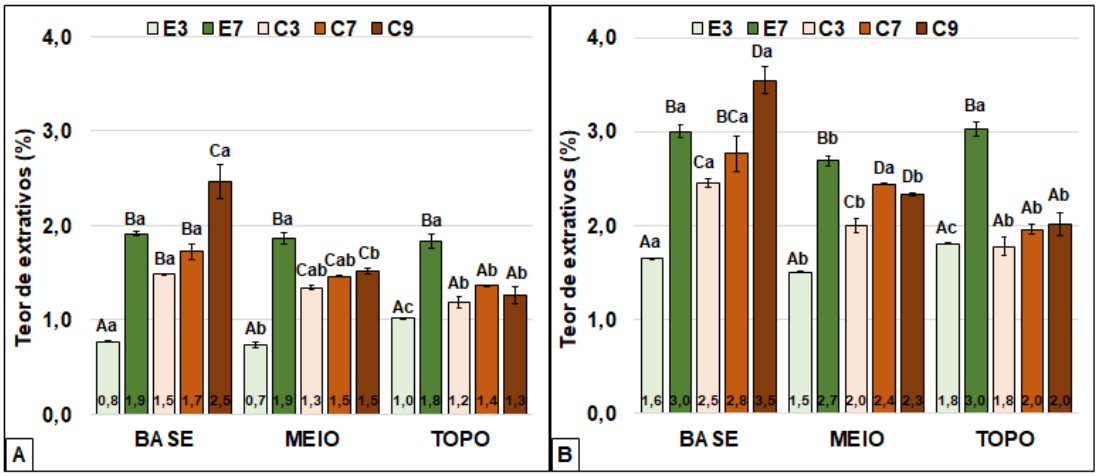
Os balões contendo os resíduos do extrator Soxhlet foram colocados em uma estufa de circulação de ar por 1 h, até que o conteúdo que estava nele fosse completamente evaporado, restando apenas os extrativos. E os béqueres contendo os resíduos obtidos no banho maria (extração dupla) foram deixados em estufa por 24 h para evaporação total do conteúdo.

2.4. Delineamento experimental e análise estatística

O experimento foi conduzido em delineamento inteiramente casualizado (DIC) com três repetições por tratamento, a análise estatística foi feita pelo teste de Tukey a 95% de probabilidade através do software Past 4.03, sendo feitas duas comparações, a primeira comparação foi realizada entre os clones de uma mesma posição e a segunda foi realizada entre os mesmos clones em diferentes posições e para a confecção dos gráficos para análise visual e identificação dos resultados foi utilizado o software do Excel.

3. Resultados e discussão

Pelos dados obtidos nas extrações de madeira, foi possível observar que utilizando apenas acetona como solvente, os clones de maior idade apresentaram maiores teores de extrativos, com destaque ainda mais pronunciado para a madeira da base de *Corymbia* de 9 anos e o *Eucalyptus* de 7 anos, sendo estes significativamente diferentes das demais idades e posições (Figura 2A). O mesmo comportamento foi observado na extração dupla (acetona + água), conforme Figura 2B. Esse comportamento dos extrativos da madeira se concentrarem na base acontece principalmente devido ao seu acúmulo para proteção do tecido de sustentação da árvore, o xilema (Gao, 2024).

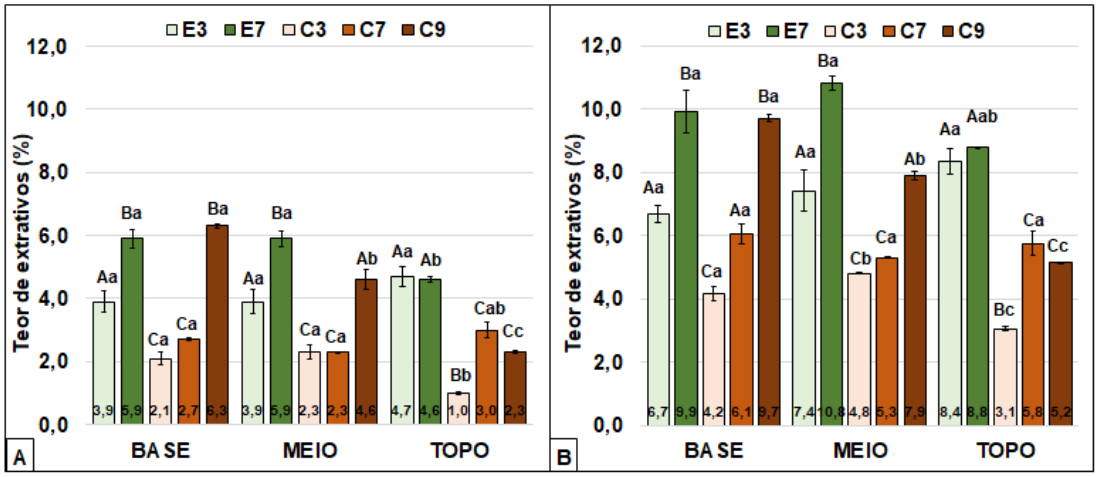


Letra maiúsculas idênticas não possuem diferença significativa dentro da mesma posição.
Letra minúscula idênticas não possuem diferença significativa em diferentes posições considerando o mesmo clone, pelo teste de Tukey a 95% de probabilidade.

Figura 2 –Teor de extrativos da madeira de *Eucalyptus* e *Corymbia* utilizando: (A) extração simples (acetona) e (B) extração dupla (acetona e água).

Na casca, utilizando extração simples-acetona (Figura 3A), foi possível notar que os maiores teores de extrativos estavam concentrados nos indivíduos de maiores idades (*Corymbia* de 9 anos e de *Eucalyptus* de 7 anos), nas posições base e meio das árvores, que foram considerados iguais estatisticamente, sendo que o material *Eucalyptus* apresentou maiores valores em madeiras mais jovens quando comprado ao material *Corymbia*. Da mesma forma, no método do balão em acetona + água (Figura 3B), as posições da base e do meio se destacaram pelos maiores teores de extrativo. Notadamente, a extração dupla apresentou valores muito superiores aos valores obtidos pela extração simples.

Essa presença elevada de extrativos na casca é explicada pelo fato de os extrativos atuarem como uma barreira química na proteção contra micro-organismos e insetos e pela grande quantidade de células de armazenamento de substâncias nutritivas (Gao, 2024).



Letra maiúsculas idênticas não possuem diferença significativa dentro da mesma posição.
Letra minúscula idênticas não possuem diferença significativa em diferentes posições considerando o mesmo clone, pelo teste de Tukey a 95% de probabilidade.

Figura 3 –Teor de extrativos da casca de *Eucalyptus* e *Corymbia* utilizando: (A) extração simples (acetona) e (B) extração dupla (acetona e água).

Analisando a relação entre o teor de extrativos da casca e da madeira de *Eucalyptus* e *Corymbia* utilizando solvente acetona (Figura 4A), é possível concluir que existe uma relação particular para cada grupo de árvores, e que por isso, os dados devem ser avaliados separadamente. O aumento no teor de extrativos da casca em relação a madeira de *Corymbia* foi mais intenso (coeficiente angular = 3,50) do que o observado na madeira de *Eucalyptus* (coeficiente angular = 1,34). Entretanto, avaliando a relação obtida pela extração dupla com solventes acetona e

água, os dados apresentaram o mesmo comportamento, (aumento do teor de extrativos da casca em relação ao teor de extrativos da madeira), porém os dois grupos de madeiras apresentaram aumentos proporcionais no teor de extrativos da casca em relação ao teor de extrativos da madeira. (coeficientes angulares mais próximos), conforme Figura 4B.

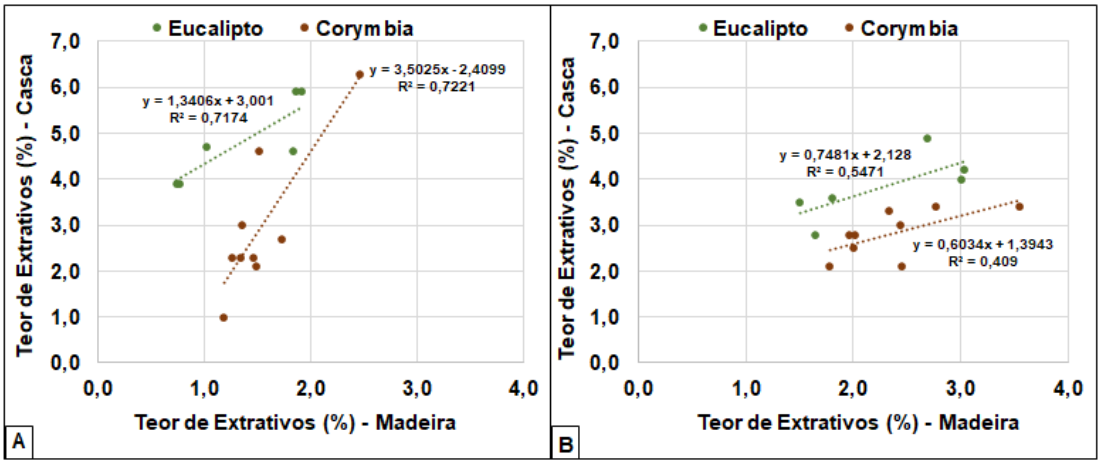


Figura 4 – Relação do teor de extrativos da casca e da madeira de *Eucalyptus* e *Corymbia*: (A) utilizando extração simples (acetona) e (B) utilizando extração dupla (acetona e água).

Na extração simples (acetona) do *Eucalyptus*, a relação do teor de extrativos casca/madeira das posições base e do meio aumentou de forma similar, enquanto a posição do topo se mostrou bastante diferente (Figura 5A), indicando forte efeito da idade nas posições mais basais da madeira. Na extração dupla (acetona + água) do *Eucalyptus*, a relação do teor de extrativos casca/madeira das três posições estudadas foi bastante parecida, com aumento do teor de extrativos da casca bastante proporcional ao teor de extrativos da madeira (Figura 5B).

Na extração simples (acetona) de *Corymbia*, a relação do teor de extrativos casca/madeira das três posições foram parecidas e apresentaram aumentos proporcionais (Figura 5C), e esse aumento foi muito mais acentuado do que aquele observado para *Eucalyptus* (Figura 5A). Na extração dupla (acetona + água), a relação do teor de extrativos casca/madeira das três posições estudadas também foi bastante parecida (Figura 5D) e menos acentuada que aquela observada na extração com somente acetona (Figura 5C).

O teor de extrativos na madeira apresentaram uma relação direta com o teor de extrativos na casca, tanto nos clones de *Eucalyptus* quanto nos de *Corymbia*, indicando idade e posição da madeira importantes na formação desses compostos.

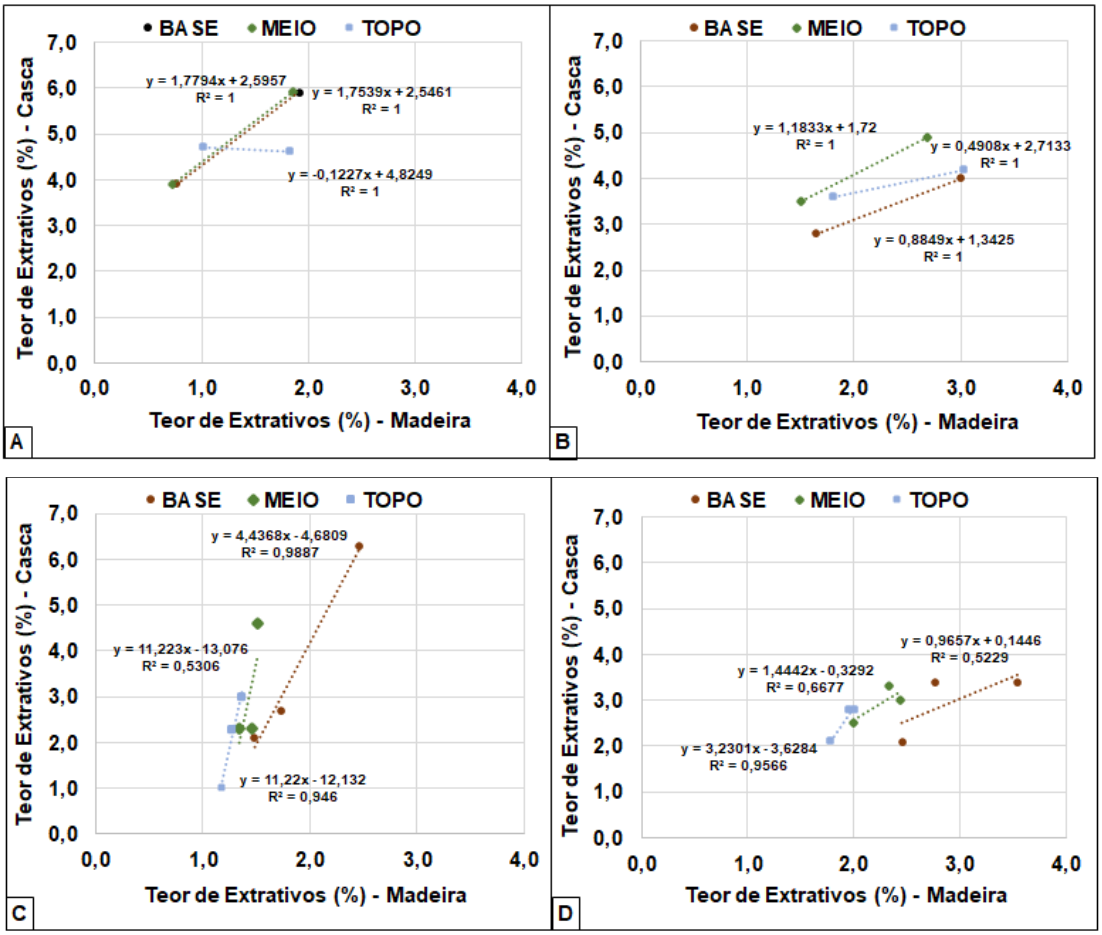


Figura 5 - Relação do teor de extrativos da casca e da madeira de *Eucalyptus* utilizando: (A) extração simples (acetona) e (B) utilizando extração dupla (acetona e água); e para *Corymbia* utilizando: (C) extração simples (acetona) e (D) utilizando extração dupla (acetona e água).

4. Conclusões

Foi possível perceber que a idade foi o fator mais determinante para o aumento do teor de extrativos da madeira, e que a base da madeira é a região de maior acúmulo dessas substâncias. *Eucalyptus* em menores idades apresentaram maiores teores de extrativos na madeira e na casca quando comparado a *Corymbia*.

5. Agradecimentos

A Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia pela infraestrutura para realização da pesquisa e ao Grupo de Pesquisa em Tecnologia de Produtos Florestais (Woodtech) pelo suporte científico.

6. Referências bibliográficas

Gao, C., Cui, X.-Y., & Matsumura, J. (2024). Multidimensional Exploration of Wood Extractives: A Review of Compositional Analysis, Decay Resistance, Light Stability, and Staining Applications. Forests. https://doi.org/10.3390/f15101782.

Júnior, F. G. S.; Brito, J. O (2008). Polpação. Em M. C. Area (Ed.), Panorama de la industria de celulosa y papel en Iberoamérica 2008 (pp. 61-102). Editora Maria Cristina Area.

Lehr, M., Miltner, M. & Friedl, A (2021). Removal of wood extractives as pulp (pre-)treatment: a technological review. SN Applied Science., 3(886). https://doi.org/10.1007/s42452-021-04873-1.

Silvério, F. O., Barbosa, L. C. A., Gomide, J. L., Reis, F. P., & Piló-Veloso, D (2006). Metodologia de extração e determinação do teor de extrativos em madeiras de eucalipto. Revista árvore, 40(6), p. 1009-1016. https://www.scielo.br/j/rarv/a/3MVjqkCFTKWHCs4bDrFJsQw/?format=pdf&lang=pt.

Sixta, H. (2006). Chemical Pulping Processes. Em H. Sixta (Ed.), Handbook of pulp (pp. 109-475). Editora Wiley-VCH.

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Características morfológicas das fibras de *Corymbia henryi* e potenciais aplicações para indústria celulósica

Graciela de Amaral Merheb[1], Felipe Zanon Lima[1], Waldelaine Rodrigues Hoffmann[1], Paulo Henrique Muller da Silva, Bruno Balboni[1], Francides Gomes da Silva Júnior[1], Humberto de Jesus Eufrade Junior[1]

[1] Universidade de São Paulo – ESALQ

Resumo: Este trabalho teve como objetivo caracterizar as fibras da madeira *Corymbia henryi* e avaliar sua aptidão para uso na indústria de celulose e papel. Foi realizada a análise morfológica das fibras da madeira *Corymbia henryi* provenientes de plantio experimental na EECFI/IPEF aos nove anos de idade. Para isso, duas amostras de diferentes porções do lenho (madeira juvenil e adulta) foram constituídas, e assim foram determinados o comprimento, largura, diâmetro do lúmen e espessura de parede, além de fração de parede, índice de Runkel, coeficiente de flexibilidade, índice de enfeltramento e coeficiente de Mulsteph. Os resultados foram comparados por meio da ANOVA hierárquica, com fibras aninhadas em lâminas e lâminas em amostras. Houve diferença significativa entre amostras e consistência entre lâminas dentro de cada amostra. Em comparação a estudos com híbridos de *Corymbia*, as fibras apresentaram maior fração de parede e índice de Runkel, menor flexibilidade e maior enfeltramento, indicando paredes mais espessas e rígidas, com menor capacidade de colapso, porém com maior potencial de resistência ao rasgo.

Palavras-chave: Anatomia da madeira; Coeficientes tecnológicos; Polpa kraft.

Morphological characteristics of *Corymbia henryi* fibers and potential applications in the pulp and paper industry

Abstract: This study aimed to characterize the wood fibers of Corymbia henryi and to evaluate their suitability for use in the pulp and paper industry. Morphological analyses were carried out on wood fibers of Corymbia henryi obtained from a nine-year-old experimental plantation at EECFI/IPEF. For this purpose, two samples representing distinct portions of the xylem (juvenile and mature wood) were selected, and fiber length, width, lumen diameter, and wall thickness were determined, in addition to wall fraction, Runkel index, flexibility coefficient, felting index, and Mulsteph coefficient. The results were compared using hierarchical ANOVA, with fibers nested within slides and slides nested within samples. There was a significant difference between samples, and consistency among slides within each sample. In comparison with studies on Corymbia hybrids, the fibers showed a higher wall fraction and Runkel index, lower flexibility, and higher felting index, indicating thicker and stiffer walls, with reduced capacity for collapse, but greater potential resistance to tearing.

Keywords: Wood anatomy; Technological indices; Kraft pulp

1. Introdução

A madeira é um conjunto heterogêneo de diferentes tipos de células com propriedades específicas para desempenharem as funções vitais da planta (Burger & Richter,1991). Ela constitui um material biológico complexo, resultante da organização estrutural do xilema secundário, formado a partir da atividade do câmbio vascular (Wiedenhoeft, 2013; Burger & Richter, 1991). Essas características estruturais determinam, em grande medida, as propriedades físicas, químicas e tecnológicas da madeira, influenciando diretamente seu comportamento em processos industriais.

No âmbito da indústria de celulose e papel, especialmente no processo kraft, a anatomia da madeira assume papel central na determinação da eficiência do processo e da qualidade da polpa produzida. As dimensões e proporções das fibras, como comprimento, largura, espessura da parede celular e diâmetro do lúmen, influenciam diretamente propriedades fundamentais da polpa, incluindo resistência mecânica, flexibilidade e capacidade de ligação interfibrilar (Gonçalves et al., 2014; Souza de Jesus et al., 2019). Índices tecnológicos derivados dessas características, como o índice de Runkel, coeficiente de flexibilidade e fração de parede, são amplamente utilizados como parâmetros preditivos do desempenho da madeira na produção de celulose (Runkel, 1952; Foelkel & Barrichelo ,1975; Foelkel, Barrichelo & Milanez, 1975).

Além disso, nas últimas décadas, as pesquisas na área de tecnologia da madeira têm destacado, em particular, o papel de espécies e híbridos de *Corymbia* ssp. como alternativa estratégica para expansão dos plantios em regiões não tradicionais e para mitigação dos efeitos das mudanças climáticas, devido à sua elevada produção de biomassa, qualidade da madeira e maior tolerância a ventos e a distúrbios fisiológicos (Assis, 2015; Reis et al., 2013; Loureiro et al., 2019; Sousa Jr et al., 2025; Silva et al, 2026). Embora os híbridos de *Corymbia* ssp. ainda sejam relativamente menos explorados em programas de melhoramento e em uso industrial, evidências recentes indicam que seu emprego pode atender à demanda de madeira para múltiplas aplicações, incluindo produção de celulose e papel, painéis reconstituídos, madeira serrada, mourões, estacas e carvão vegetal (Assis, 2015; Silva et al., 2023; Souza Jr et al., 2025; Silva et al, 2026).

Sendo assim, o presente trabalho estudou características anatômicas das fibras de cavacos de *Corymbia henryi*, de forma a compreender os coeficientes tecnológicos dessa matéria prima para produção de celulose.

2. Material e métodos

Para a realização e desenvolvimento desse trabalho, foram coletados aleatoriamente cavacos provenientes de uma classe diamétrica média, da espécie *Corymbia henryi* aos 9 anos. Com base no inventário florestal prévio do plantio A árvore de diâmetro à altura do peito de 18,20 cm e densidade básica ponderada de 0,776 g/cm^3, foi obtida de uma das parcelas experimentais de 0,5 ha a 1 ha da EECFI (Estação experimental de Ciências Florestais de Itatinga) implantadas no espaçamento 3 m × 2,6 m pelo Programa Cooperativo sobre Melhoramento Florestal (PCMF) do Instituto de Pesquisa e Estudos Florestais (IPEF).

Para abranger diferentes estágios de formação do lenho na análise das fibras de *Corymbia henryi*, foram retiradas duas amostras de cavacos, selecionadas pela coloração: uma porção mais avermelhada, representando o cerne, e outra mais clara, correspondente ao alburno, de modo a garantir a representatividade de fibras oriundas de regiões associadas ao lenho juvenil e adulto. Essa opção se fundamenta em evidências de que o lenho juvenil tende a apresentar fibras mais curtas e com maior variabilidade dimensional, ao passo que o lenho adulto exibe fibras mais longas, de maior homogeneidade, com paredes mais espessas e melhor desempenho tecnológico, afetando propriedades como resistência mecânica e estabilidade dos produtos de madeira (Vidaurre et al, 2011; Palma et al., 2010; Zobel, 1980; Krahmer, 1985).

Para a determinação das características morfológicas de comprimento e largura do material, foi realizada maceração química das duas amostras, com peróxido de hidrogênio 30% e ácido acético glacial, na proporção de 1:1, por 48 horas em estufa a 60ºC, seguindo o método de Franklin (1945).

As dimensões das fibras foram determinadas por dois métodos: mensuração manual, realizada em lâminas ao microscópio óptico, e mensuração automatizada, utilizando o analisador de fibras MorFi.

Após a maceração química, as fibras de cada amostra foram lavadas com água destilada e montadas 3 lâminas de cada amostra (no total de 6 lâminas), com glicerina bidestilada, safranina 1%, segundo a norma NBR 15066, e encaminhadas à leitura em microscópio óptico (Figura 1A) com câmera digital acoplada e *software* Captur 2.2. Foram realizadas medições para avaliar o comprimento e largura das fibras, largura do lúmen e espessura da parede celular.

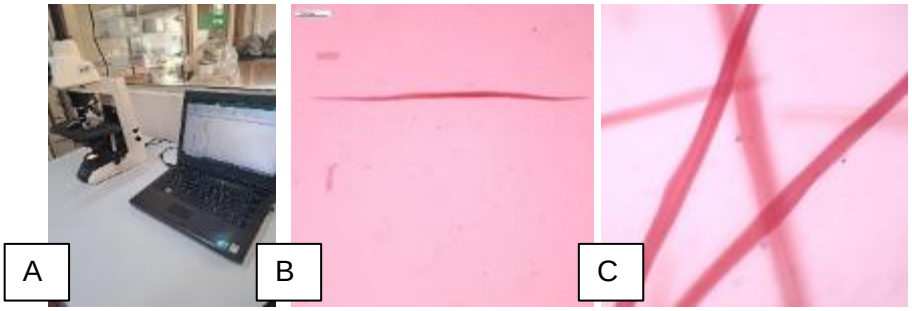


Figura 1 – (A) Microscópio óptico, (B) e (C) foto da fibra de *Corymbia henryi.*

Para ilustração da diferença entre as medidas de comprimentos e larguras das duas amostras, foram realizadas leituras dessas fibras no equipamento MorFi Neo ISO16065-2 da Techpap (Figura 2), onde em torno de 1g do macerado de fibras, de cada amostra, foi colocado em um dos béqueres, totalizando 2 béqueres por amostra, junto com água (1 litro/béquer).



Figura 2 – (A) Equipamento MorFiNeo, utilizado no estudo das características morfológicas das fibras *Corymbia henryi*; (B) Foto das fibras durante a análise do MorFiNeo.

Com as medições das fibras de *Corymbia henryi*, foi possível calcular: fração-parede; índice de Runkel, coeficiente de flexibilidade, índice de enfeltramento e o coeficiente de Mulsteph, respectivamente pelas Equações de 1 a 5 (Runkel, 1952; Foelkel & Barrichelo ,1975; Foelkel, Barrichelo and Milanez, 1975).

$$Fração\ de\ Parede = \frac{2E}{D}.100 \quad (1)$$

$$Índice\ de\ Runkel = \frac{2E}{d} \quad (2)$$

$$Coeficiente\ de\ Flexibilidade = \frac{d}{D}.100 \quad (3)$$

$$Índice\ de\ Enfeltramento = \frac{C}{LD}.100 \quad (4)$$

$$Coeficiente\ de\ Mulsteph = \frac{D^2 - d^2}{D^2} \quad (5)$$

Onde,

E = espessura da parede (µm);

D = Diâmetro da fibra (µm);

d = diâmetro do lúmen (µm).

C = comprimento da fibra (mm)

As análises estatísticas foram conduzidas com o uso de um modelo hierárquico (ANOVA hierárquica/nested), no qual as medições de fibras foram consideradas aninhadas em lâminas, e estas aninhadas em amostras. Esse modelo permite particionar corretamente as fontes de variação, distinguindo os efeitos entre amostras da variabilidade intra-amostral associada às lâminas e às medições individuais. O modelo estatístico segue abaixo:

$$Y_{ijk} = \mu + A_i + L_{j(i)} + \varepsilon_{k(ij)} \quad (6)$$

Onde:

A_i= efeito da amostra

$L_{j(i)}$= lâmina dentro da amostra

ε= variação entre fibras

3. Resultados e discussão

Os resultados da análise estatística descritiva, em relação aos comprimentos, diâmetros das fibras e diâmetros dos lúmens das duas amostras (Tabela 1), indicam que a amostra 1 apresentou comprimentos de fibra 1,20 vezes maiores que os da amostra 2. Segundo Palma et al (2010), essa variação pode ser, geralmente, a diferença encontrada entre os comprimentos das fibras de madeira juvenil e adulta em folhosas. Complementarmente, Palma et al. (2010) destaca que o comprimento das células nas folhosas pode ser de 1,5 a 2 vezes menor na madeira juvenil que na adulta e de 3 a 4 vezes nas coníferas (ZOBEL, 1980).

Tabela 1 - Estatística descritiva do comprimento, diâmetro das fibras e diâmetro do lúmen, por amostra de *Corymbia henryi*.

Parâmetro analisado	Amostra	Nº fibras	Média (µm)	Mínimo (µm)	Máximo (µm)	Desv Pad	C.V. (%)
Comprimento	**1**	30	930,85	703,13	1145,96	100,15	10,76
	2	30	775,12	591,67	927,68	96,80	12,49
Diâmetro da fibra	**1**	30	15,40	10,33	21,43	3,33	21,64
	2	30	15,12	9,79	24,27	3,54	23,43

Diâmetro do lúmen	**1**	30	5,54	2,9	10,52	2,09	37,63
	2	30	6,78	2,71	11,32	2,56	37,71

Outro ponto a ser observado, em relação aos aspectos anatômicos analisados, (Tabela 1), é em relação aos diâmetros do lúmen, que foram 1,22 vezes menores na amostra 1. Segundo Vidaurre et al (2013) ao se comparar a madeira juvenil com a madeira adulta, Bendtsen (1978) e Senft et al. (1985) afirmaram que os ângulos microfibrilares da camada S2 , o diâmetro do lúmen, o conteúdo de lignina, o lenho de reação e a contração longitudinal são maiores na madeira juvenil.

Em comparação com os valores apresentados na literatura, Melo et al. (2024) relataram para *C. henryi* (6 anos), comprimentos médios de fibras da ordem de 995–1063 µm e espessuras de parede em torno de 5,14–5,22 µm, resultados próximos aos encontrados nesse estudo, segundo Tabela 1.

Na Tabela 2, pode-se observar que para a fonte de variação C (Amostra), para o comprimento, o valor do p-valor é menor que 0.05, que significa que existe uma diferença significativa no comprimento das fibras entre a Amostra 1 e a Amostra 2. Entretanto, para o C(Amostra):C(Lâmina), o p-valor encontrado foi de 0.9602, o que indica que não há diferença significativa no comprimento das fibras entre as diferentes lâminas dentro de cada amostra, sugerindo que as lâminas são homogêneas em relação ao comprimento das fibras dentro de cada amostra.

Em relação ao diâmetro das fibras, a análise da Tabela 2 revelou que tanto o efeito da C(Amostra), quanto o efeito C(Amostra):C(Lâmina) não foram estatisticamente significativos (p-valor > 0,05), , indicando que as médias não diferiram entre a largura média das fibras e entre as lâminas dentro das amostras.

Para o diâmetro do lúmen (Tabela 2) houve efeito estatisticamente significativo da C(Amostra) (p-valor < 0,05), indicando que o diâmetro médio do lúmen varia significativamente entre as amostras. Entretanto, assim como para o comprimento e o diâmetro da fibra, o efeito da C(Amostra):C(Lâmina) não foi significativo (p-valor > 0,05), o que reforça a homogeneidade das lâminas em relação a esta característica dentro de cada amostra.

Tabela 2 - Anova hierárquica para as amostras de *Corymbia henryi* quanto ao comprimento, diâmetro das fibras e diâmetro do Lúmen

Parâmetro analisado	**Fonte de Variação**	**GL**	**SQ**	**QM**	**F**	**p_valor**

Comprimento	**C(Amostra)**	1,0	$3{,}64.10^{5}$	$3{,}64.10^{5}$	35,32	$2{,}10.10^{-7}$
	C(Amostra):C(Lâmina)	4,0	$6{,}36.10^{3}$	1.591,2	0,1545	0.9602
	Residual	54,0	$5{,}56.10^{5}$	$1{,}03.10^{4}$	nan	nan
Diâmetro das fibras	**C(Amostra)**	1,0	1,118	1,118	0,09	0,766
	C(Amostra):C(Lâmina)	4,0	11,739	2,935	0,235	0,917
	Residual	54,0	674,067	12,483	nan	nan
Diâmetro do Lúmen	**C(Amostra)**	1,0	23,064	23,064	4,232	0,045
	C(Amostra):C(Lâmina)	4,0	21,54	5,385	0,988	0,422
	Residual	54,0	294,319	5,45	nan	nan

Legenda: C (Amostra): Comprimento ou Diâmetro da fibra ou Diâmetro do Lúmen, entre fibras da amostra 1 da amostra 2; C(Amostra):C(Lâmina): Comprimento ou Diâmetro das fibras ou Diâmetro do lúmen, das fibras entre as diferentes lâminas dentro de cada amostra.

Os coeficientes tecnológicos (Tabela 3) obtidos para as fibras de *Corymbia henryi* (9 anos), indicam a predominância de fibras com elevada fração de parede (≈60%), índice de Runkel acima de 1 (média 1,70), coeficiente de flexibilidade relativamente baixo (≈39,74%) e coeficiente de Mulsteph alto (≈0,83), caracterizando um conjunto de fibras estruturalmente rígidas, com baixa propensão ao colapso e maior contribuição individual para a sustentação da rede fibrosa.

Tabela 3 - Análise estatística descritiva geral para os coeficientes tecnológicos das amostras de *Corymbia henryi.*

Variável	Nº de fibras	Média	Min	25%	50%	75%	Max	CV (%)
Fração de parede (%)	60	60,26 (10,5)	34,71	52,40	60,77	67,99	78,40	17,43
Índice de Runkel	60	1,70 (0,75)	0,53	1,10	1,55	2,13	3,63	44,17
Coef flexibilidade (%)	60	39,74 (10,50)	21,60	3,01	39,23	47,60	65,29	26,43
Coef Mulsteph	60	0,83 (0,09)	0,57	0,77	0,84	0,90	0,95	10,64
Índice de enfeltramento (%)	60	58,59 (15,23)	32,24	47,32	55,83	68,96	94,76	26,00

Legenda: (...) = Desvio Padrão

Em comparação aos híbridos de *Corymbia* (6,75 anos) avaliados por Sousa Júnior et al. (2025), que apresentaram fração de parede em torno de 50,3%, índice de Runkel de 1,02,

coeficiente de flexibilidade de 49,3%, índice de enfeltramento de 51,9% e coeficiente de Mulsteph de 0,76, as fibras de *C. henryi* deste estudo exibem paredes relativamente mais espessas e menos flexíveis, com maior fração de parede e maior resistência ao colapso, indicando menor potencial de formação de ligações interfibras. Por outro lado, o maior índice de enfeltramento observado neste estudo (58,59), superior ao valor médio de 51,9 relatado por Sousa Júnior et al. (2025), sugere fibras relativamente mais esbeltas e com maior capacidade de entrelaçamento na folha, o que, aliado à maior rigidez conferida pela alta fração de parede, tende a favorecer a resistência ao rasgo e o volume específico aparente.

Os resultados sugerem menor capacidade de colapsamento e de formação de ligações interfibras, o que pode limitar a resistência mecânica da folha. Entretanto, essas mesmas características podem favorecer maior volume específico e porosidade, atributos potencialmente interessantes para determinadas aplicações, como papéis tissue de alta maciez ou papéis para embalagem. Dessa forma, a aptidão da espécie para diferentes produtos deve ser confirmada por meio de ensaios de polpação, refino e fabricação de papel.

Para finalizar a análise de comparação entre as amostras, foi realizada a leitura no MoFiNeo, e os resultados colocados em um gráfico comparativo (Figura 3). Pode-se notar que para a Amostra 1, observa-se a maior frequência nos comprimentos de 766-959 mm, e para a amostra 2, de 613-766 mm, o que também representa as medidas encontradas nas leituras das lâminas.

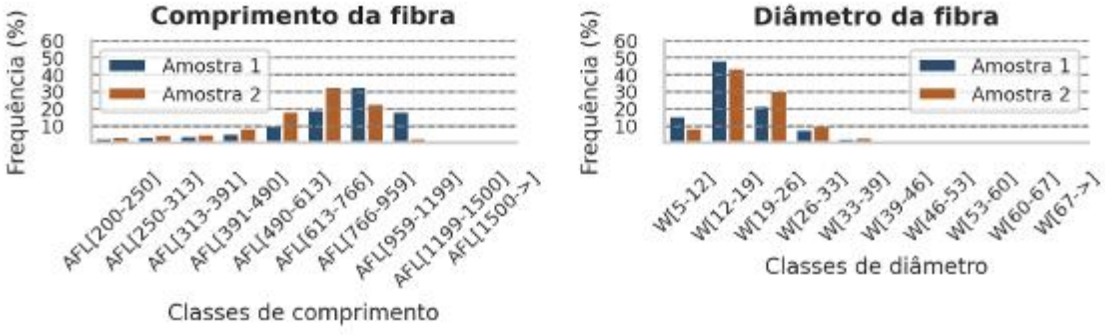


Figura 3 - Distribuição de frequência do comprimento e da diâmetro das fibras das amostras de *Corymbia henryi*.

No presente estudo, o gráfico gerado pelo MorFiNeo, complementa a análise anatômica tradicional ao evidenciar diferenças no padrão de distribuição do comprimento e diâmetro das fibras entre as amostras, mostrando que, embora ambas apresentem concentração em classes

intermediárias, há deslocamentos na frequência das classes que ajudam a interpretar melhor a variabilidade intraespecífica.

4. Conclusões

Os coeficientes tecnológicos das fibras de *Corymbia henryi* indicaram predominância de fibras com paredes espessas e baixa capacidade de colapsamento, menor conformabilidade das fibras e, consequentemente, a tendência de formação de uma rede fibrosa com menor número de ligações interfibras. Em conjunto, esses resultados indicam que as fibras de *C. henryi* apontam potencial para aplicações em papéis para embalagem e papel-cartão, nas quais maior volume específico, rigidez e resistência à compressão são atributos desejáveis. No entanto, sua aptidão para a produção de celulose e papel deve ser confirmada por meio de ensaios de polpação, branqueamento e avaliação das propriedades físico-mecânicas dos papéis obtidos.

5. Agradecimentos

Agradeço à CAPES pela bolsa concedida para o desenvolvimento do trabalho (Financiamento 001), ao IPEF por disponibilizar a matéria prima e a Techpap/Regmed por nos fornecer o equipamento MorfiNeo para teste e análises.

6. Referências bibliográficas

Assis, T. F. (2015). Melhoramento genético de *Eucalyptus*: desafios e perspectivas. In *Anais do 3º Encontro Brasileiro de Silvicultura*.

Bendtsen, B. A. (1978). Properties of wood from improved and intensively managed trees. *Forest Products Journal*, 28(10), 61–71.

Bhat, K. M., Bhat, K. V., & Dhamodaran, T. K. (1990). Wood density and fiber length of *Eucalyptus grandis* grown in Kerala, India. *Wood and Fiber Science*, 22(1), 54–61.

Burger, L. M., & Richter, H. G. (1991). *Anatomia da madeira*. Nobel.

Fengel, D., & Wegener, G. (1989). *Wood: Chemistry, ultrastructure, reactions*. Walter de Gruyter.

Foelkel, C. E. B., & Barrichelo, L. E. G. (1975). Relações entre características da madeira e propriedades da celulose e papel. *O Papel*, 36(9), 49–53.

Foelkel, C. E. B., Barrichelo, L. E. G., & Milanez, A. F. (1975). Estudo comparativo das madeiras de *Eucalyptus saligna*, *E. paniculata*, *E. citriodora*, *E. maculata* e *E. tereticornis* para a produção de celulose sulfato. *Scientia Forestalis*, (10), 17–37.

Gonçalves, F. G., Santos, G. L., Silva Júnior, F. G., Martins, I. S., & Costa, J. A. (2014). Wood fiber size and density relationship along the stem of *Eucalyptus urograndis*. *Scientia Forestalis*, 42(101), 81–89.

Krahmer, R. (1985). Fundamental anatomy of juvenile and mature wood. In *Juvenile wood – What does it mean to forest management and forest products? Technical workshop proceedings* (pp. 12–16). Forest Products Research Society.

Loureiro, B. A., Vieira, J. A. S., Costa, L. J., Silva, A. B., Assis, M., & Trugilho, P. F. (2019). Selection of superior clones of *Corymbia* hybrids based on wood and charcoal properties. *Maderas. Ciencia y Tecnología*, 21(4). https://doi.org/10.4067/S0718-221X2019005000417

Melo, A. B., Silva, P. H. M., Araujo, S. L., Silva, J. G. M., Ferraz, A. V., Rocha, S. M. G., Almeida, M. N. F., Araujo, M., Godinho, T., Castor Neto, T. C. C., Moulin, J. C., & Vidaurre, G. B. (2024). Productivity and wood quality traits of *Corymbia* and *Eucalyptus* species in two soil water deficit sites. *Industrial Crops and Products*, 219, 119141. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2024.119141

Niemz, P., Teischinger, A., & Sandberg, D. (Eds.). (2023). *Springer handbook of wood science and technology* (Chapter 3: Wood biology—U. Schmitt, G. Koch, P. Hietz, & D. Tholen). Springer Nature Switzerland AG.

Palma, L. H. A., Leonello, E. C., & Ballarin, W. A. (2010). Demarcação da madeira juvenil e adulta de *Corymbia citriodora*. *CERNE*, 16(2), 141–148.

Reis, C. A. F., Assis, T. F., Santos, A. M., & Filho, E. P. (2013). *Corymbia citriodora: Estado da arte de pesquisas no Brasil* (Documento 255). Embrapa Florestas.

Runkel, R. O. H. (1952). Pulp from tropical wood. *TAPPI Journal*, 35(4), 174–178.

Sousa Júnior, W. P., Carvalho, A. M. M. L., Carneiro, A. C. O., Demuner, I. A. F., Oliveira, R. S., Reis, L. A. C., Aparecida, L., Lopes, L. A., & Moretti, S. D. A. (2025). Fiber quality indices of *Corymbia* spp. and *Eucalyptus* spp. wood for the selection of genetic materials for pulp production. *Revista Árvore*, 49, e4904.

Silva, P. H. M., Assis, T. F., Alvares, C. A., Reis, C. A. F., Rocha, G. M., & Lee, D. J. (2026). *Corymbia*: Taxonomy, productivity, resistance, and potential contributions to resilient plantation forestry. *Forest Ecology and Management*, 603, 123444. https://doi.org/10.1016/j.foreco.2025.123444

Senft, J. F., Bendtsen, B. A., & Galligan, W. L. (1985). Weak wood. *Journal of Forestry*, 83, 476–485.

Souza de Jesus, D., Borges, R. N., & Silva, J. S. (2019). Densidade básica e dimensões de fibra de um clone de eucalipto cultivado em diferentes locais. *Cadernos de Ciência & Tecnologia*, 36(3), e26484.

Taiz, L., Zeiger, E., Møller, I. M., & Murphy, A. (2017). *Fisiologia e desenvolvimento vegetal*. Artmed.

Vidaurre, G., Lombardi, L. R., Oliveira, J. T. S., & Arantes, M. D. C. (2011). Lenho juvenil e adulto e as propriedades da madeira. *Floresta e Ambiente*, 18(4), 469–480. https://doi.org/10.4322/floram.2011.066

Wiedenhoeft, A. C., & Miller, R. B. (2013). Structure and function of wood. In *Handbook of wood chemistry and wood composites*. CRC Press. (Original work published 2005.)

Zobel, B. J. (1980). Inherent differences affecting wood quality in fast-grown plantations. In *IUFRO Conference proceedings* (pp. 169–188). IUFRO.

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Caracterização anatômica da madeira e do carvão vegetal de duas espécies de *Couratari* Aubl.

Alana Assunção da Silva[1]; Kaick Coelho de Sousa[1]; Mayara de Lima Ferreira[1] Fernanda Ilkiu Borges de Souza[2]; Thiago de Paula Protásio[1]; Luiz Eduardo de Lima Melo[3]

[1] Universidade Federal de Lavras, Departamento de Ciências Florestais
[2] Embrapa Amazônia Oriental, Laboratório de Botânica, Belém, PA, Brasil
[3] Universidade do Estado do Pará (UEPA), Xiloteca Joaquim Ivanir Gomes (JIGw)

Resumo: Madeiras comercializadas como "Tauari" são amplamente utilizadas na construção civil devido à sua boa trabalhabilidade. Entre elas, destacam-se espécies de *Couratari*, cuja elevada similaridade anatômica dificulta a distinção entre espécies comercializadas sob o mesmo nome vernacular. Este estudo objetivou caracterizar a anatomia microscópica da madeira e do carvão vegetal de *Couratari guianensis* e *Couratari oblongifolia*, visando ampliar as informações para sua identificação anatômica. A anatomia da madeira foi analisada em cortes histológicos, enquanto o carvão vegetal foi obtido por carbonização a 450 °C e avaliado por microscopia eletrônica de varredura. A carbonização alterou as características quantitativas da madeira, reduzindo o diâmetro das pontoações intervasculares em -63% e -33%, a largura dos raios para -16% e -32% e aumentando a frequência de vasos para 100% e 63% *Couratari guianensis* e *Couratari oblongifolia*, respectivamente. As características qualitativas permaneceram preservadas, permitindo a identificação anatômica das espécies mesmo após a carbonização. Esses resultados ampliam o conhecimento anatômico sobre as espécies e fornecerem suporte às ações de fiscalização de produtos florestais e à rastreabilidade da madeira e do carvão vegetal ao longo da cadeia produtiva.

Palavras-chave: controle florestal; "tauari"; Amazônia

Anatomical Characterization of the Wood and Charcoal of Two *Couratari* Species

Abstract: Wood marketed as "Tauari" is widely used in the construction industry due to its good workability. Among them, *Couratari* species stand out, whose high anatomical similarity makes it difficult to distinguish between species marketed under the same vernacular name. This study aimed to characterize the microscopic anatomy of the wood and charcoal of *Couratari guianensis* and *Couratari oblongifolia*, aiming to expand the information for their anatomical identification. Wood anatomy was analyzed using histological sections, while charcoal was obtained by carbonization at 450 °C and evaluated by scanning electron microscopy. Carbonization altered the quantitative characteristics of the wood, reducing the diameter of the intervessel pits by -63% and -33%, ray width by -16% and -32%, and increasing vessel frequency to 100% and 63% in *Couratari guianensis* and *Couratari oblongifolia*, respectively. The qualitative characteristics remained preserved, allowing the anatomical identification of the species even after carbonization. These results expand the anatomical knowledge of the species and provide support for the inspection of forest products and the traceability of wood and charcoal throughout the production chain.

Keywords: forest control; "tauari"; Amazon

1. Introdução

Madeiras popularmente conhecidas como “Tauari” são amplamente comercializadas e exportadas por apresentarem fácil trabalhabilidade e por terem boas propriedades físicas e mecânicas, sendo amplamente aplicadas na construção civil. Em geral, são árvores de grande porte, atingindo até 60 metros de altura. O gênero *Couratari*, pertencente à família Lecythidaceae, ocorre em abundância na região Norte do Brasil, sendo *Couratari guianensis* e *Couratari oblongifolia* algumas das espécies mais comercializadas, como toras e madeira serrada (Bernal et al., 2011; Nahuz, 2013; Santos et al., 2020).

Na Amazônia brasileira, um dos maiores desafios relacionados às madeiras comercializadas como “Tauari” é a correta identificação dos táxons, especialmente em inventários florestais. Além da elevada diversidade, a alta similaridade anatômica entre as espécies comercializadas por esse nome vernacular dificulta sua distinção, favorecendo o agrupamento de diferentes espécies com o mesmo nome comercial. Essa prática pode comprometer a estimativa de árvores encontradas na floresta, a rastreabilidade da madeira e a confiabilidade das informações ao longo da cadeia produtiva (Procópio; Secco, 2008; Santos et al., 2022).

Nesse contexto, métodos confiáveis de identificação são essenciais, não apenas para o manejo e comercialização da madeira, mas também para o controle da cadeia produtiva de produtos florestais, incluindo o carvão vegetal. Entre as ferramentas disponíveis, a anatomia da madeira destaca-se como um dos métodos mais consolidados para a identificação de espécies, por possibilitar o reconhecimento de caracteres diagnósticos de forma rápida, confiável e com baixo custo (Gasson, 2011; Koch et al., 2015; Brandes et al., 2020).

A anatomia da madeira, também pode ser aplicada ao carvão vegetal, pois após o processo de carbonização, as características qualitativas anatômicas do lenho permanecem bem preservadas (Gonçalves et al., 2012; Perdigão et al., 2020; Braga Junior et al., 2021). Nesse sentido, a forma mais segura de reconhecer a estrutura anatômica do carvão vegetal é através de material comparativo, utilizando amostras, descrições e fotografias, no entanto, existem poucos estudos que descrevem a anatomia do carvão vegetal de espécies da Amazônia (Gonçalves; Scheel-Ybert, 2016; Scheel- Ybert, 2016; Bodin et al., 2019).

Diante dos desafios associados as madeiras comercializadas como “Tauari”, este trabalho teve como objetivo descrever a anatomia microscópica da madeira e do carvão vegetal de *Couratari guianensis* e *Couratari oblongifolia*, avaliando os efeitos da carbonização nas características qualitativas e quantitativas. Os resultados visam ampliar

as informações disponíveis para identificação anatômica dessas espécies e fornecer subsídio para bancos de dados anatômicos, coleções de referência e atividades de fiscalização de produtos florestais.

2. Material e métodos

Os resíduos de madeira foram obtidos do manejo florestal sustentável da Área de Manejo Florestal (AMF) Rio Capim, localizada no município de Paragominas, mesorregião do Sudeste Paraense (coordenadas: 3° 30’ 45” S e 48° 30’ 45” W).

As coletas foram realizadas em outubro de 2018, onde foram selecionadas as espécies comerciais *Couratari guianensis* Aubl., *Couratari oblongifolia* Ducke & Kunth. A amostragem foi realizada de forma aleatória, selecionando galhos com diâmetro médio de 24,5 ± 5 cm provenientes das copas de três árvores de cada espécie. Foram coletados três discos de madeira de cada galho para análises laboratoriais e identificação das espécies, realizadas três dias após o corte na AMF Rio Capim.

Amostras férteis foram obtidas como flores e/ou frutos, para confirmar a identificação botânica. Essas amostras formam depositadas no Herbário IAN da Embrapa Amazônia Oriental, localizado em Belém, no Estado do Pará, Brasil. Amostras representativas da madeira de cada árvore identificada foram depositadas nas Xilotecas IAN da Embrapa Amazônia Oriental e Joaquim Ivanir Gomes da Universidade do Estado do Pará (UEPA), em Marabá, Pará, Brasil.

A análise anatomia microscópica da madeira foi realizada utilizando corpos de prova de três discos de madeira de cada espécies, com tamanho aproximado de 2 cm^3, nas direções transversal, tangencial e radial, submetidos a processo de amolecimento em água fervente e, posteriormente, seccionados em micrótomo de deslize, com espessura aproximada de 16 a 30 µm. As lâminas histológicas foram tratadas com solução de hipoclorito de sódio para clarificação, coradas com Safranina e desidratadas em série de álcool de acordo com Johansen (1940). Em seguida, as lâminas foram montadas com resina sintética Entellan®. Para o processo de maceração, lascas longitudinais da madeira foram transferidas para frascos de vidro com solução hermeticamente fechados (ácido acético glacial e peróxido de hidrogênio -1:1), ficando na estufa à 60 °C por 24 horas, lavados em água corrente e corados com Safranina (Franklin 1945). As imagens foram capturadas e analisadas utilizando um microscópio de luz equipado com uma câmera digital.

Para realização das carbonizações em escala de laboratório, as amostras de madeira com tamanho aproximado de 1,5 x 1,5 x 3,0 foram inseridas em forno elétrico tipo mufla. No interior do

forno, foi posicionada uma cápsula metálica conectada a um condensador resfriado à água, acoplado ao frasco coletor de gases condensáveis, conforme realizado por Lima *et al*. (2022). A carbonização ocorreu por aproximadamente 5 horas, com taxa de aquecimento de 1,66 ° C/min, atingindo uma temperatura final de 450 °C. Após atingir essa temperatura, as amostras permaneceram na temperatura final por 2 horas, de acordo com as recomendações de Muñiz *et al*. (2012). O resfriamento do forno ocorreu de forma natural e gradativa. As amostras de carvão resultante foram fraturadas manualmente e submetidas à análise utilizando um microscópio eletrônico de varredura (MEV).

As descrições anatômicas microscópicas da madeira e do carvão vegetal seguiram as recomendações do IAWA Committee (1989). Para a análise quantitativa da madeira e do carvão vegetal foram feitas 30 medições de frequência de vasos (número por milímetro quadrado), diâmetro tangencial do lúmen dos vasos (µm), raios por milímetro linear, largura e altura dos raios e diâmetro das pontoações (µm). A mensuração do diâmetro das pontoações foi realizada de acordo com Gonçalves *et al*. (2012). Todas as medições foram realizadas com auxílio do software Image Pro Express versão 6.0.

Para comparar as variáveis quantitativas do lenho e do carvão vegetal, foram ajustados modelos lineares generalizados (GLM), assumindo distribuição Gaussiana (nos casos em que os dados foram normalmente distribuídos pelo teste de Shapiro-Wilk a 5% de significância para normalidade) ou distribuição Gamma (em casos em que os dados não foram distribuídos normalmente pelo teste de Shapiro-Wilk). Para as características anatômicas, com dados discretos, o GLM foi ajustado com uma distribuição de Poisson. Todos os GLMs foram submetidos a análise de resíduos para a avaliação da adequação da distribuição do erro. A análise de contraste foi então realizada para testar diferenças entre pares Crawley (2013). As análises estatísticas foram conduzidas no software R (versão 3.0.1), adotando-se nível de significância de 5% para todos os testes.

3. Resultados e discussão

Os caracteres anatômicos da madeira e do carvão vegetal de *Couratari guianensis* e *Couratari oblongifolia* são apresentados a seguir. A descrição completa das espécies encontra-se em Silva *et al*. (2024). As informações referentes ao comprimento médio dos elementos de vasos, comprimento das fibras e densidade básica, são apenas para madeira. Na tabela 1, estão descritos os valores de diâmetro de vaso (µm), vaso/m², diâmetro da pontoação intervascular (µm), largura de raio (µm), altura de raio (µm) e raio por milímetro lienar, para madeira e carvão.

***Couratari guianensis* Aubl.**

Anéis de crescimento distintos com diminuição da frequência das faixas de parênquima em direção ao lenho tardio, resultando em zonas de fibras distintas. **Vasos:** porosidade difusa; placas de perfuração simples; pontoações intervasculares alternas, poligonais; pontoações vaso-raio com bordas distintas, semelhantes às intervasculares em tamanho e forma ao longo de toda a célula do raio; comprimento médio dos elementos de vaso entre 350 e 800 µm; tilose comum. **Fibras:** pontoações simples a areoladas muito pequenas; fibras não septadas, de paredes delgadas a espessas; comprimento médio entre 900 e 1.600 µm. **Parênquima axial:** em faixas estreitas ou linhas de até três células de largura e reticulado; séries parenquimáticas com 5 a 8 células**. Raios:** predominantemente com 4 a 10 células de largura; todas as células dos raios procumbentes. **Inclusões minerais:** cristais prismáticos presentes em células do parênquima axial em câmaras; corpos de sílica presentes nas células dos raios. Densidade básica média (0,40–0,75 g cm^{-3}).

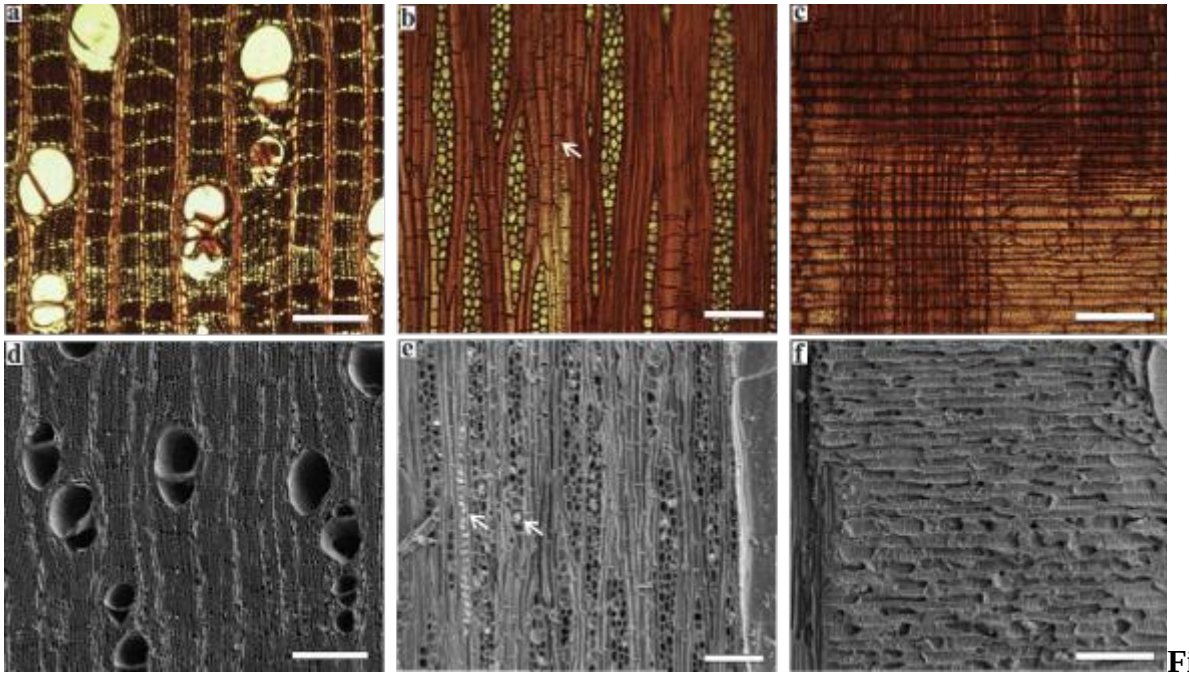


Figura 1 - Fotomicrografias da madeira e do carvão vegetal de *Couratari guianensis*. (a,d) Seção transversal; (b,e) Seção longitudinal tangencial; (c.f) Seção longitudinal radial. Barras de escala: (a, d) 200 µm; (b, c, e, f) 100 µm. Setas mostrando inclusões minerais de oxalato de cálcio no parênquima axial e sílica nas células dos raios.

***Couratari oblongifolia* Ducke & Kunth**

Anéis de crescimento distintos com diminuição da frequência das faixas de parênquima em direção ao lenho tardio, resultando em zonas de fibras distintas. **Vasos:** madeira de

porosidade difusa; placas de perfuração simples; pontoações intervasculares alternas, poligonais; pontoações vaso-raio com bordas distintas, semelhantes às intervasculares em tamanho e forma ao longo de toda a célula do raio; comprimento
médio dos elementos de vaso entre 350 e 800 µm; tilose comum. **Fibras:** pontoações simples a areoladas muito pequenas; fibras não septadas, de paredes delgadas a espessas; comprimento médio entre 900 e 1.600 µm. **Parênquima axial:** em faixas estreitas ou linhas de até três células de largura e reticulado; séries parenquimáticas com 5 a 8 células**. Raios:** predominantemente com 4 a 10 células de largura; todas as células dos raios procumbentes. **Inclusões minerais:** cristais prismáticos presentes em células do parênquima axial em câmaras; corpos de sílica presentes nas células dos raios. Densidade básica média (0,40–0,75 g cm^{-3}).

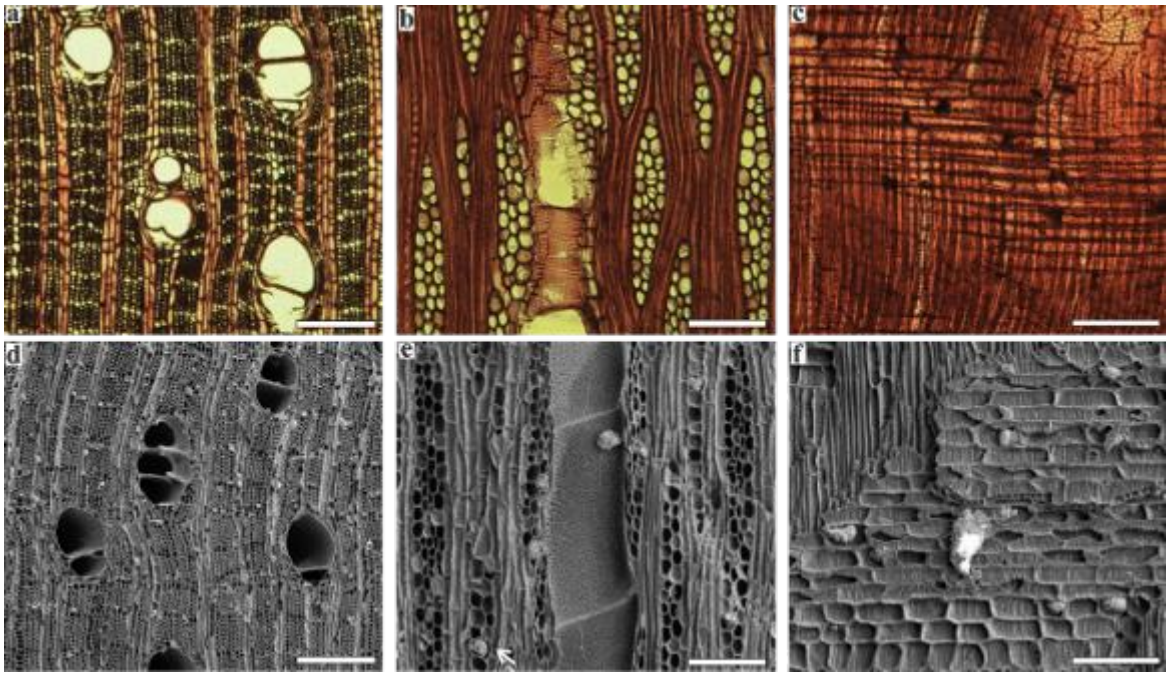


Figura 2 - Fotomicrografias da madeira e do carvão vegetal de *Couratari oblongifolia*. (a,d) Seção transversal; (b,e) Seção longitudinal tangencial; (c.f) Seção longitudinal radial. Barras de escala: (a, d) 200 µm; (b, c, e, f) 100 µm. Setas mostrando sílica nas células dos raios.

Características diagnósticas consideradas por Wheeler, Gasson e Baas (2020), como o parênquima axial, pontoações raiovasculares e inclusões minerais foram semelhantes entre as espécies estudadas. Estes caracteres, tanto para madeira como para o carvão vegetal, estão de acordo a literatura (Santos *et al.,* 2020; Bernal *et al.,* 2011). Com relação aos parâmetros quantitativos da madeira, *C. guianensis* apresentou maior altura de raio e maior diâmetro da pontoação intervascular, enquanto, *C. oblongifolia* apresentou maior largura dos raios (Tabela 1, Figura 1 e 2).

Wheeler, Gasson e Bas (2020), afirmam que as características qualitativas devem ser priorizadas, enquanto as quantitativas devem ser observadas com cautela. No entanto, os resultados presentes neste estudo demonstram que esses caracteres podem ser um complemento na distinção entre espécies morfologicamente semelhantes.

Tabela 1 - Dados anatômicos quantitativos das espécies analisadas e análise estatística. DP: desvio padrão; EP: Erro Padrão; máx: máximo; min: mínimo; Re: redução; Au: aumento; *p:* nível de significância entre madeira e carvão.

	Madeira			Carvão				
Diâmetro de vaso (µm)	Média (min-máx)	DP	EP	Média (min-máx)	DP	EP	Re/Au (%)	*p*
C. guianensis	147 (77-194)	26	5	120 (56-167)	27	5	-18	3^{e-4}
C. oblongifolia	138 (77-138)	26	5	131 (84-171)	21	4	-5	0.2
Vaso/m²	Média (min-máx)	DP	EP	Média (min-máx)	DP	EP	Re/Au (%)	*p*
C. guianensis	7 (1-16)	4	0.7	14 (6-33)	6	1	100	5.06^{e-6}
C. oblongifolia	8 (0-19)	4	0.8	13 (4-25)	5	0.9	63	2^{e-4}
Ø Pontoação	Média (min-máx)	DP	EP	Média (min-máx)	DP	EP	Re/Au (%)	*p*
C. guianensis	8 (6-9)	0.8	0.2	3 (2-4)	0.5	0.1	-63	2.2^{e-16}
C. oblongifolia	3 (2-4)	0.5	0.1	2 (2-3)	0.4	0.1	-33	2.7^{e-13}
Largura de raio (µm)	Média (min-máx)	DP	EP	Média (min-máx)	DP	EP	Re/Au (%)	*p*
C. guianensis	44 (24-72)	9	2	37 (24-52)	7	1	-16	1^{e-3}
C. oblongifolia	63 (37-82)	11	2	43 (29-69)	8	2	-32	4.3^{e-16}
Altura de raio (µm)	Média (min-máx)	DP	EP	Média (min-máx)	DP	EP	Re/Au (%)	*p*
C. guianensis[3]	747 (416-1400)	253	46	652 (291-1300)	275	50	-13	0.1
C. oblongifolia[3]	455 (220-745)	117	21	454 (294-935)	136	25	0	0.1
Rays/mm	Média (min-máx)	DP	EP	Média (min-máx)	DP	EP	Re/Au (%)	*p*
C. guianensis[3]	8 (5-12)	2	0.3	9 (6-12)	1	0.2	13	0.4
C. oblongifolia[3]	8 (6-10)	1	0.2	11 (7-15)	2	0.3	38	9.5^{e-5}

Após a carbonização, foram observadas alterações morfométricas nas estruturas do carvão vegetal. O diâmetro das pontoações intervaculares, a frequência dos vasos e a largura dos raios foram as características mais afetadas em ambas as espécies. Apenas *C. oblongifolia* não apresentou redução significativa para o diâmetro dos vasos (Tabela 1).

Ao avaliar o efeito da carbonização da madeira de cinco espécies do cerrado brasileiro, Gonçalves et al. (2012), pontuou que o comportamento anisotrópico da madeira normalmente promove maior contração no diâmetro tangencial dos vasos, podendo assim, aumentar a frequência dos vasos. Embora *C. oblongifolia* não tenha apresentado redução significativa no

diâmetro dos vasos, ambas as espécies exibiram aumento significativo na frequência de vasos, de 100% em *C. guianensis* e 63% em *C. oblongifolia* (Tabela 1).

Prior e Gasson (1993) relataram que a carbonização pode causar alterações na altura dos raios. Entretanto, no presente estudo, esse parâmetro não apresentou redução significativa em nenhuma das espécies. Em contrapartida, a largura dos raios foi significativamente reduzida, com diminuições de 16% em *C. guianensis* e 32% em *C. oblongifolia*. Também foram observadas alterações significativas no diâmetro das pontoações intervasculares após a carbonização. Esse resultado difere do observado por Gonçalves et al. (2012), que não verificaram alterações significativas nesse último parâmetro.

4. Conclusões

A caracterização anatômica da madeira e do carvão vegetal de *C. guianensis* e *C. oblongifolia* fornece subsídios para a distinção entre essas espécies. Embora apresentem similaridade qualitativa, os parâmetros anatômicos quantitativos permitiram diferenciá-las. A carbonização causou alterações nas características quantitativas, reduzindo o diâmetro das pontoações intervasculares e a largura dos raios, além de aumentar a frequência de vasos em ambas as espécies e a frequência dos raios em *C. oblongifolia*. Os caracteres qualitativos permaneceram preservados, possibilitando a identificação anatômica mesmo após a carbonização. Esses resultados ampliam o conhecimento anatômico sobre as espécies e fornecerem suporte às ações de fiscalização de produtos florestais e à rastreabilidade da madeira e do carvão vegetal ao longo da cadeia produtiva.

5. Agradecimentos

Os autores agradecem ao Programa de Pós-Graduação em Tecnologia, Recursos Naturais e Sustentabilidade na Amazônia (PPGTEC/UEPA) pelo apoio acadêmico e institucional e à Chamada Pública MCTI/FINEP/FNDCT/Identidade Brasil – Recuperação e Preservação de Acervos 2024 (Ref. 3103/24), projeto nº 5827, convênio nº 0125.0186.00, pelo apoio financeiro à pesquisa. Ao Grupo Keilla pelo fornecimento dessas amostras e ao CNPq (processo 406053/2022-7), que possibilitou a realização das atividades de campo, a coleta das amostras e o transporte do material para as instituições de pesquisa.

6. Referências bibliográficas

Bernal, R. A., Coradin, V., Camargos, J., Costa, C., & Pissarra, J. (2011). Wood anatomy of Lecythidaceae species called "Tauari". IAWA Journal, 32(1), 97–112. https://doi.org/10.1163/22941932-90000046.

Braga Junior, M. M., Souza, F. I. B., & Melo, L. E. L. (2021). Forestry control in the Brazilian Amazon II: charcoal anatomy of 21 species. IAWA Journal, 42(3), 299–321. https://doi.org/10.1163/22941932-bja10058.

Brandes, A. F. N., Novello, B. Q., Lemos, D. N., Nascimento, L. B., Albuquerque, R. P., Tamaio, N., & Barros, C. F. (2020). Wood anatomy of endangered Brazilian tree species. IAWA Journal, 41(4), 510–576. https://doi.org/10.1163/22941932-bja10037.

Bodin, S. C., Scheel-Ybert, R., Beauchêne, J., Molino, J.-F., & Bremond, L. (2019). CharKey: An electronic identification key for wood charcoals of French Guiana. IAWA Journal, 40(1), 75–91. https://doi.org/10.1163/22941932-40190227.

Crawley, M.J. (2013) The R book. John Wiley & Sons Ltd., Chichester.

Franklin, G. (1945). Preparation of Thin Sections of Synthetic Resins and Wood-Resin Composites, and a New Macerating Method for Wood. Nature 155 (51). https://doi.org/10.1038/155051a0

Gasson, P. (2011). How precise can wood identification be? Wood anatomy's role in support of the legal timber trade, especially CITES. IAWA Journal, 32(2), 137–154. https://doi.org/10.1163/22941932-90000049.

Gonçalves, T. A. P., Marcati, C. R., & Scheel-Ybert, R. (2012). The effect of carbonization on wood structure of *Dalbergia violacea*, *Stryphnodendron polyphyllum*, *Tapirira guianensis*, *Vochysia tucanorum*, and *Pouteria torta* from the Brazilian Cerrado. IAWA Journal, 33(1), 73–90. https://doi.org/10.1163/22941932-90000081.

Gonçalves, T. A. P., & Scheel-Ybert, R. (2016). Charcoal anatomy of Brazilian species. I. Anacardiaceae. Anais da Academia Brasileira de Ciências, 88, 1711–1725. https://doi.org/10.1590/0001-3765201620150433.

IAWA Committee. 1989. List of microscopic features for hardwood identification. IAWA Bulletin n.s. 10 (3), 219–332. 10.1163/22941932- 90000496.

Johansen, D.A. (1940). Plant microtechnique. McGraw-Hill.

Koch, G., Haag, V., Heinz, I., Richter, H.-G., & Schmitt, U. (2015). Control of internationally traded timber - The role of macroscopic and microscopic wood identification against illegal logging. Journal of Forensic Research, 6(6).https://doi.org/10.4172/2157-7145.1000317.

Lima, M. D. R., Massuque, J., Bufalino, L., Trugilho, P. F., Ramalho, F. M. G., Protásio, T. P., & Hein, P. R. G. (2022). Clarifying the carbonization temperature effects on

the production and apparent density of charcoal derived from Amazonia wood wastes. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis. https://doi.org/10.1016/j.jaap.2022.105636.

Muñiz, G. I. B. d., Nisgoski, S., Shardosin, F. Z., & França, R. F. (2012). Anatomia do carvão de espécies florestais [Charcoal anatomy of forest species]. Cerne, 18(3), 471–477. https://doi.org/10.1590/S0104-77602012000300014

Nahuz, M. A. R. (Coord.). (2013). Catálogo de madeiras brasileiras para a construção civil. Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo.

Perdigão, C. R. V., Braga Júnior, M. M., Gonçalves, T. A. P., Araujo, C. S., Mori, F. A., Barbosa, A. C. M. C., Souza, F. I. B., Motta, J. P., & Melo, L. E. L. (2020). Forestry control in the Brazilian Amazon I: wood and charcoal anatomy of three endangered species. IAWA Journal, 41(4), 490–509. https://doi.org/10.1163/22941932-bja100.

Prior, J., & Gasson, P. (1993). Anatomical changes on charring six African hardwoods. IAWA Journal, 14(1), 77–86. https://doi.org/10.1163/22941932-90000579

Procópio, L. C., & Secco, R. S. (2008). A importância da identificação botânica nos inventários florestais: O exemplo do "tauari" (*Couratari* spp. e *Cariniana* spp. - Lecythidaceae) em duas áreas manejadas no estado do Pará. Acta Amazonica, 38(1), 31–44. https://doi.org/10.1590/S0044-59672008000100005.

Santos, J. X., Vieira, H. C., Silva, E. L., Muñiz, G. I. B., Reis, A. R. S., & Nisgoski, S. (2020). Anatomical characterization of wood marketed as "Tauari" (Lecythidaceae) in Pará State, Brazil. Floresta, 50(3), 1421–1429. https://doi.org/10.5380/rf.v50i3.59399.

Santos, J. X., Vieira, H. C., Souza, D. V., Muñiz, G. I. B., Soffiatti, P., & Nisgoski, S. (2022). Colorimetry as a tool for description of some wood species marketed as "tauari" in Brazilian Amazon. Anais da Academia Brasileira de Ciências, 94(1). https://doi.org/10.1590/0001-3765202220191479.

Scheel-Ybert, R. (2016). Charcoal collections of the world. IAWA Journal, 37(3), 489–505. https://doi.org/10.1163/22941932-20160148.

Wheeler, E. A., Gasson, P. E., & Baas, P. (2020). Using the InsideWood web site: Potentials and pitfalls. IAWA Journal, 41(4), 412–462. https://doi.org/10.1163/22941932-bja10032.

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Caracterização Anatômica de Duas Espécies Florestais Amazônicas: *Hymenolobium petraeum* Ducke e *Goupia glabra* Aubl.

Davi Souza Vieira [1]; Ariane Mateus de Souza[1]; Pamella Carolline Marques Reis Reis [2], Camila Juliana Sampaio Pereira[1], Paulo Eduardo Botelho de Souza Meira[1]; Giovanna Sabino de Andrade[1]; Leila Aparecida Lopes[1], Ana Marcia Macedo Ladeira Carvalho[1]

[1]Departamento de Engenharia Florestal, Universidade Federal de Viçosa – UFV
[2] Universidade Federal Rural Da Amazônia-UFRA

Resumo: A floresta amazônica é a maior floresta tropical do mundo, detentora de uma imensa biodiversidade de flora, dentre elas, uma enorme quantidade de espécies madeireiras de valor econômico, ecológico e cultural, como o *Hymenolobium petraeum* (Angelim Pedra) e *Goupia glabra* (Cupiúba). A correta caracterização anatômica da madeira é essencial para a identificação taxonômica, a avaliação da qualidade e a definição do potencial de uso dessas espécies. Diante disso, esse trabalho teve como objetivo descrever e comparar as características anatômicas macroscópicas e microscópicas das madeiras de Cupiúba e do Angelim Pedra. Para isso, foram realizadas análises macroscópicas de amostras aplainadas e microscópicas a partir de cortes histológicos finos e corados com Safranina. Os resultados revelaram diferenças significativas entre as duas espécies, a Cupiúba apresentou fibras mais longas(1,84 mm), uma maior frequência de poros (7,6 poros/mm²) e raios de maiores dimensões, enquanto o Angelim Pedra mostrou fibras mais curtas(1,54 mm) e uma menor porosidade (3,1 poros/mm²). Conclui-se que a caracterização anatômica permitiu evidenciar distintas estruturas que sugerem diferentes comportamentos e potencialidades de uso, com o Angelim Pedra sendo mais indicado para usos que exigem maior durabilidade e densidade e a Cupiúba para aplicações que requerem uma maior permeabilidade e resistência mecânica. Este estudo amplia o conhecimento sobre essas duas espécies amazônicas fornecendo dados para sua correta identificação e manejo no setor florestal.

Palavras-chave: Qualidade da madeira; Análises macroscópicas e microscópicas; Dimensionamento de fibras.

Anatomycal Caracterization Of Two Species From The Amazon Rainforest: *Hymenolobium petraeum* Ducke And *Goupia glabra* Aubl.

Abstract: The Amazon rainforest is the largest tropical forest in the world, harboring an immense biodiversity of flora, including a vast number of timber species of economic, ecological, and cultural value, such as *Hymenolobium petraeum* (Angelim Pedra) and *Goupia glabra* (Cupiúba). The correct anatomical characterization of wood is essential for taxonomic identification, quality assessment, and the definition of the potential use of these species. Therefore, this study aimed to describe and compare the macroscopic and microscopic anatomical characteristics of Cupiúba and Angelim Pedra woods. For this purpose, macroscopic analyses of planed samples and microscopic analyses from thin histological sections stained with Safranin were performed, in addition to fiber dissociation using the Franklin method (1937). The results revealed significant differences between the two species: Cupiúba presented longer fibers (1.84 mm), a higher pore frequency (7.6 pores/mm²), and larger rays, while Angelim Pedra showed shorter fibers (1.54 mm) and lower porosity (3.1 pores/mm²). It is concluded that the anatomical characterization allowed us to highlight distinct structures that suggest different behaviors and usage potentials, with Angelim Pedra being more suitable for applications requiring greater durability and density, and Cupiúba for applications that demand higher permeability and mechanical strength. This study expands the knowledge about these two Amazonian species, providing data for their correct identification and management in the forest sector.

Keywords: Wood quality; Macroscopic and microscopic analysis; Fiber dimensions.

1. Introdução

Dentro da atividade florestal, o setor madeireiro sempre apresentou grande destaque, tanto em número de empresas como em consumo de madeira (Eleotério; Storck; Lopes, 1996). A Amazônia representa a maior floresta tropical do mundo e abriga uma das mais ricas biodiversidades do planeta, reunindo milhares de espécies vegetais com elevado potencial econômico, ecológico e tecnológico. Além de desempenhar funções essenciais na manutenção do equilíbrio climático e na conservação da biodiversidade, a floresta amazônica constitui uma importante fonte de recursos naturais para as populações locais e para diversos setores da economia brasileira (Reis *et al.*, 2019).

As espécies florestais possuem grande importância para a economia, além de contribuírem para um maior equilíbrio ecológico, e com o passar dos anos passou a ser explorada para diversos fins, como na indústria para a geração de energia, produção de celulose, inclusive para construção civil (IBÁ, 2024). A produção de madeira amazônica no Brasil tem o potencial de ser uma indústria sustentável, incluindo a otimização e valorização das árvores florestais e a geração de empregos e renda para a região, especialmente para comunidades tradicionais e pequenos produtores (Fortini e Carter 2014; Ribeiro *et al.* 2014; Waldhoff e Vidal 2015).

Entre essa grande variedade de espécies, destacam-se madeiras de valor comercial como *Hymenolobium petraeum* Ducke (Angelim Pedra) e *Goupia glabra* Aubl (Cupiúba) amplamente encontradas em florestas de terra firme na região amazônica. Essas espécies representam parte da infinidade de árvores que compõem a flora amazônica, ao lado de outras de grande importância econômica e cultural (ISPN, 2024). O conhecimento detalhado dessas espécies, desde suas características anatômicas até seu uso sustentável, é fundamental para estratégias de manejo, conservação da biodiversidade e desenvolvimento socioeconômico na região.

A caracterização anatômica da madeira para identificação correta de espécies amazônicas. A análise macroscópica permite a observação de características visíveis a olho nu ou com auxílio de lupa. A análise microscópica possibilita a descrição detalhada da estrutura celular, abrangendo elementos anatômicos. Essas características são essenciais para a identificação taxonômica das espécies e para a compreensão de propriedades tecnológicas e sua utilização adequada.

O presente estudo teve como objetivo realizar a caracterização anatômica da madeira de *Hymenolobium petraeum* Ducke (Angelim Pedra) e *Goupia glabra* Aubl (Cupiúba) por meio da

descrição de suas características macroscópicas e microscópicas, visando a identificação correta dessas espécies. Evidenciando a importância da caracterização anatômica como ferramenta para o manejo sustentável e a valorização dos recursos florestais amazônicos.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Caracterização macroscópica

Os corpos de prova foram aplainados nos planos transversal, longitudinal tangencial e longitudinal radial, utilizando um micrótomo de deslize do tipo Reichert. Para otimizar a visualização e a interpretação das estruturas anatômicas, foi empregada uma lupa conta-fios com ampliação de 10x. Nessa etapa, além da descrição macroscópica, foram avaliadas as propriedades organolépticas, como cor, textura, grã, padrão e dureza, entre outras.

2.2 Caracterização Microscópica

A análise microscópica foi realizada a partir de cortes histológicos finos, com espessura entre 15 e 25 µm, obtidos com micrótomo de precisão, conforme as recomendações de Burger e Richter (1990). Para as lâminas semipermanentes, os cortes foram branqueados em hipoclorito de sódio, aplicado até a completa imersão, facilitando a remoção da cor natural da madeira. Em seguida, o reagente foi removido por lavagens sucessivas com água deionizada. Os cortes foram então corados com Safranina para realçar as estruturas celulares, permanecendo no corante por cerca de dois minutos. Posteriormente, foram transferidos para placas de Petri com álcool etílico a 50% para fixação parcial. Após essa etapa, os cortes foram montados sobre lâminas, organizados nas seções transversal, tangencial e radial, utilizando glicerina como meio de montagem, e cobertos com lamínulas vedadas com adesivo.

Para a preparação de lâminas permanentes, utilizou-se o mesmo procedimento inicial de branqueamento e coloração com Safranina. Após a coloração, os cortes foram submetidos a uma desidratação gradual em soluções alcoólicas de concentrações crescentes (30%, 50%, 70%, 95% e absoluto) e, por fim, em acetato. A montagem final foi realizada sobre lâminas, com bálsamo do Canadá como meio de montagem, cobertas com lamínulas e devidamente etiquetadas para armazenamento e conservação de longo prazo.

2.3 Morfologia das fibras

Para a observação dos elementos traqueais e fibrosos, foi realizado o macerado, realizando se cortes manualmente pela técnica de corte à mão livre, reconhecida por sua simplicidade e rapidez, embora exija habilidade para obter seções finas e uniformes. As amostras foram acondicionadas em recipientes de vidro cilíndricos contendo uma solução de peróxido de hidrogênio e ácido acético glacial, na proporção de 1:1, conforme metodologia

descrita por Franklin (1937). Esses recipientes foram levados à estufa, mantida a aproximadamente 60 °C, durante 48 horas, com o objetivo de promover a dissociação das fibras por meio da ação química, dissolvendo a lamela média que mantém as células unidas, conforme Burger e Richter (1991).

Após o macerado, realizou-se a captura de imagens das fibras, dos elementos de vaso e dos cortes anatômicos da madeira. Para isso, utilizou-se o material previamente macerado das espécies estudadas. Na etapa de registro das imagens anatômicas, a lente objetiva de 10x foi aplicada sobre as superfícies dos cortes nos planos transversal, longitudinal tangencial e longitudinal radial. As imagens microscópicas foram obtidas por meio do microscópio digital equipado com câmera acoplada, utilizando o software Aixel Vision para captura e processamento das imagens.

Por fim, foram realizadas medições das principais estruturas anatômicas da madeira fibras, vasos e raios em imagens obtidas por microscopia óptica nos três planos anatômicos. O objetivo foi quantificar parâmetros como diâmetro dos poros (µm), número de poros por milímetro, altura dos raios (em µm e número de células), número de raios por milímetro linear e largura dos raios (em µm e em número de células). Para cada plano anatômico, foram coletados 30 dados, garantindo a representatividade dos resultados. As medições seguiram a sequência metodológica previamente estabelecida no laboratório, utilizando o Aixel Vision para mensuração precisa e armazenamento dos dados.

3. Resultados e discussões

O comprimento médio das fibras da Cupiúba foi de 1,84 mm como mostra a tabela 1. Fibras mais longas tendem a oferecer melhor resistência mecânica e maior qualidade para produtos como embalagens de papelão, papéis especiais e filtros, além de influenciar positivamente propriedades estruturais da madeira (Santos, 2018). Assim, a Cupiúba, demonstra potencial anatômico para aplicações que exigem maior resistência à tração ou flexão longitudinal. A largura das fibras da Cupiúba também é superior em relação ao Angelim Pedra. Sugerindo que, além de mais longas, as fibras da Cupiúba são espessas, o que pode contribuir para maior rigidez e resistência ao cisalhamento.

Tabela 1. Valores médios para fibras das madeiras de Angelim Pedra e de Cupiúba.

Espécies	Comprimento	Largura	Diâmetro do lume	Espessura da parede

	(mm)	(µm)	(µm)	(µm)
Angelim Pedra	1,54	20,84	12,04	4,40
Cipiúba	1,84	21,94	12,27	4,84

O diâmetro do lúmen é bastante próximo entre as duas espécies, Cupiúba mostrando um valor médio de 12,27. O lúmen relativamente grande indica fibras mais ocadas, o que pode influenciar a densidade da madeira e suas propriedades de absorção de líquidos. Ambos valores sugerem boa permeabilidade, mas o leve aumento da Cupiúba reforça sua tendência a ter fibras com paredes mais finas.

A espessura da parede da Cupiúba apresentou um valor médio de 4,84 µm. Paredes celulares mais espessas indicam maior robustez estrutural, maior dureza e resistência mecânica. Assim, a madeira da Cupiúba tende a apresentar maior resistência física, favorecendo usos estruturais pesados. As imagens a seguir (Figuras 1 e 2) mostram as fibras isoladas de Angelim Pedra e Cupiúba, permitindo observar suas variações em comprimento, diâmetro e características do lúmen, discutidas anteriormente.

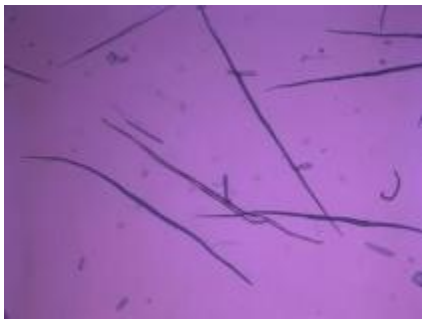


Figura 1.Fibras isoladas de Angelim Pedra



Figura 2.Fibras isoladas de Cupiúba

Com relação a frequência de poros observada, percebe-se que a Cupiúba possui uma frequência de 7,6 poros/mm², mais que o dobro do Angelim Pedra, que apresenta 3,1 poros/mm². Essa diferença indica que o Cupiúba é uma madeira mais porosa, o que se reflete em maior permeabilidade, facilitando processos como tratamento preservativo e secagem, além de possibilitar melhor absorção de adesivos (Burger & Richter, 1991; Marra 1992).

Por outro lado, o Angelim Pedra, por ter menor frequência de poros, tende a ser mais denso e apresentar maior resistência natural ao ataque de organismos xilófagos, além de menor permeabilidade, o que o torna mais indicado para aplicações estruturais externas que exigem maior durabilidade. Assim, o grau de porosidade influencia diretamente propriedades como trabalhabilidade, durabilidade natural e usos finais, sendo a Cupiúba mais adequada para

aplicações internas e o Angelim Pedra para fins que demandem maior durabilidade e estabilidade dimensional.

Além disso, a distribuição e o diâmetro dos poros também impactam a aparência superficial e o acabamento da madeira, uma vez que madeiras mais porosas podem exigir maior consumo de seladores e acabamentos para obtenção de superfícies lisas e uniformes. A diferença significativa na porosidade entre as duas espécies é evidente nas imagens obtidas por microscopia óptica com aumento de 10×, apresentadas a seguir, onde se observa claramente a maior quantidade e diâmetro dos poros na Cupiúba em comparação ao Angelim Pedra.

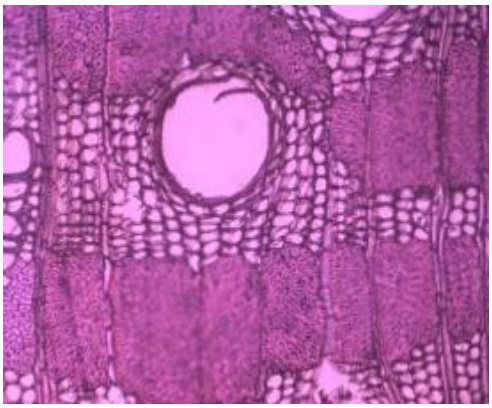


Figura 3. Corte transversal de Angelim Pedra

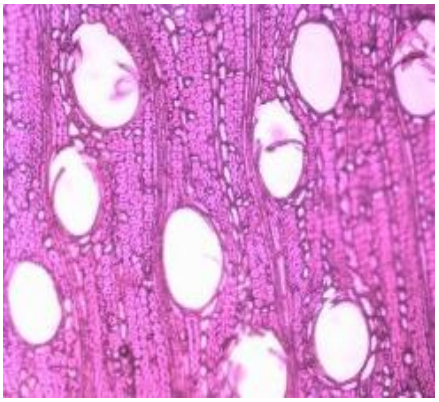


Figura 4. Corte transversal de Cupiúba

Os resultados na tabela 2 mostram que o Cupiúba possui raios mais altos e mais largos comparado ao Angelim Pedra, o que indica uma estrutura radial mais desenvolvida. Raios maiores podem estar relacionados a maior capacidade de armazenamento de reservas, maior transporte radial de seivas e extrativos, e podem representar maior leveza e baixa resistência mecânica e pouca durabilidade natural (Botosso, 2011).

Além disso, raios mais largos e numerosos também podem contribuir para figuras decorativas mais visíveis, sendo um fator valorizado para uso em peças aparentes ou móveis. Por outro lado, uma estrutura de raios mais proeminente pode afetar a estabilidade dimensional, já que zonas com maior concentração de raios podem responder de forma diferente à variação de umidade (Oliveira; Tomazello Filho; Fiedler, 2010).

Tabela 2. Valores médios da altura e largura dos raios das madeiras de Angelim Pedra e de Cupiúba.

	Altura (µm)	Largura (µm)
Angelim Pedra	310,29	48,43
Cupiúba	458,02	56,93

4. Conclusão

A caracterização anatômica permitiu identificar diferenças marcantes entre as madeiras de *Hymenolobium petraeum* (Angelim-pedra) e *Goupia glabra* (Cupiúba). A Cupiúba apresentou fibras mais longas, maior frequência de poros e raios de maiores dimensões, indicando uma estrutura anatômica distinta em relação ao Angelim-pedra. Por sua vez, o Angelim-pedra caracterizou-se por apresentar menor frequência de poros e menores dimensões dos raios, evidenciando diferenças na organização anatômica de sua madeira. Essas características reforçam a importância da caracterização anatômica da madeira como ferramenta para a identificação das espécies e fornecem informações relevantes para a utilização adequada. Dessa forma, o estudo contribui para ampliar o conhecimento sobre duas importantes espécies amazônicas, auxiliando para ações voltadas ao manejo sustentável, e a correta identificação de madeiras comerciais.

5. Agradecimentos

Os autores agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e à Universidade Federal de Viçosa (UFV) pelo apoio financeiro e pela infraestrutura disponibilizada para a realização deste estudo. Agradecem, ainda, à Universidade Federal Rural da Amazônia (UFRA), pela parceria institucional, e aos Laboratórios de Propriedades da Madeira (LPM-UFV) e de Celulose e Papel (LCP-UFV), pelo suporte técnico e pela infraestrutura disponibilizada durante o desenvolvimento da pesquisa. Por fim, agradecem à pesquisadora Ariane Mateus de Souza pela dedicação, comprometimento e valiosa contribuição em todas as etapas do trabalho, bem como à Professora Ana Marcia Macedo Ladeira Carvalho pela orientação, apoio e ensinamentos fundamentais para a execução desta pesquisa.

6. Referências bibliográficas

Botosso, Paulo Cesar. Identificação macroscópica de madeiras: guia prático e noções básicas para o seu reconhecimento. Colombo: Embrapa Florestas, 2011.

Brasília, 2018. Disponível em: https://semanaacademica.org.br/system/files/artigos/artigo_madeiras_lara_monalisa.pdf.

Burger, M. L. & Richter, H. G. Anatomia da madeira. São Paulo: Nobel. 1991. 154p.

ELEOTÉRIO, J. R.; STORCK, L.; LOPES, S. J. **Caracterização de peças de madeira produzidas em serraria visando o controle de qualidade**. *Ciência Florestal*, Santa Maria, v. 6, n. 1, p. 89–99, 1996. DOI: https://doi.org/10.5902/19805098328

Fortini, L. B., & Carter, D. R. (2014). A viabilidade econômica da produção de madeira de pequenos agricultores sob a expansão da produção de açaí no Estuário Amazônico. Journal of Forest Economics, 20(3), 223–235.

Franklin, G. L. Preparation of thin sections of synthetic resins and wood – resin composites, and a new macerating method for wood. Nature, v 155, nº 3924, p. 51. 1945.
INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES (IBÁ). Relatório Anual 2024. Disponível em: https://iba.org/datafiles/publicacoes/relatorios/relatorio2024.pdf

INSTITUTO BRASILEIRO DE DESENVOLVIMENTO FLORESTAL – IBDF; FAO.Madeiras da Amazônia: características e utilização. Brasília: IBDF/FAO, 1981. Versão digital consultada em 2025.

Lorenzi, Harri. Árvores brasileiras: manual de identificação e cultivo de plantas arbóreas nativas do Brasil. Vol. 2. Nova Odessa: Instituto Plantarum, 1998. Disponível em:Academia.edu. Acesso em: 14 jul. 2025.

Marra, A. A., Technology of wood bonding. Nova York: Van Nostrand Reinhold, 1992. 453p.

Oliveira, J. T. S.; Tomazello Filho, M.; Fiedler, N. C. Avaliação da retratibilidade da madeira de sete espécies de *Eucalyptus*. *Revista Árvore*, Viçosa-MG, v. 34, n. 5, p. 929–936, 2010.
REIS, P.C.M.R., *et al*; Desempenho operacional no desdobro de espécies nativas em serrarias na Amazônia, Disponível em: https://ojs.brazilianjournals.com.br/ojs/index.php/BRJD/article/view/56004/41155. Acesso em: 30 jul. 2026.

Ribeiro, R. B. S., Gama, J. R. V., & Melo, L. O. (2014). Análise seccional para determinação de volume e seleção de equações de volume para a Floresta Nacional do Tapajós. Cerne, 20(4), 605–612.

Santos, Lara Monalisa Alves dos**.** Madeira. *Revista Científica Semana Acadêmica*,

Waldhoff, P., & Vidal, E. (2015). Loggers comunitários tentando legalizar a exploração madeireira tradicional na Amazônia brasileira: Um caminho sem fim. Política e Economia Florestal, 50, 311–318.

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Caracterização anatômica de três espécies madeireiras oriundas de uma serraria localizada no nordeste paraense

Camila Juliana Sampaio Pereira[1]; Ariane Mateus de Souza[1]; Ana Marcia Macedo Ladeira Carvalho[1]; Pamella Carolline Marques Reis dos Reis[2]; Êmilly Wakim de Almeida[1]; Amanda Ladeira Carvalho[1]; Angélica de Cássia Oliveira Carneiro[1]; João Gilberto Meza Ucella Filho[1]

[1]Universidade Federal de Viçosa 01
[2]Universidade Federal Rural da Amazônia 02

Resumo: Este trabalho teve como objetivo caracterizar anatomicamente as madeiras de *Micropholis venulosa*, *Clarisia racemosa* e *Peltogyne* spp., provenientes de uma serraria localizada em São Miguel do Guamá, Pará. Foram realizadas caracterizações macroscópica, microscópica e morfológica das fibras, com análises em microscopia óptica e mensuração de vasos, raios e fibras, complementadas por análise estatística descritiva. As três espécies apresentaram características anatômicas distintas e compatíveis com as descrições da literatura, permitindo sua diferenciação e confirmando a identidade das amostras analisadas. Na caracterização macroscópica, foram observadas diferenças em cor, textura, grã, densidade e distribuição dos vasos. A análise microscópica evidenciou variações na frequência dos poros, dimensões dos raios e organização do parênquima, enquanto a morfologia das fibras revelou diferenças no comprimento, diâmetro do lume e espessura da parede celular. Os resultados reforçam a importância da anatomia da madeira como ferramenta para a identificação de espécies, contribuindo para a correta comercialização, o manejo sustentável e o aproveitamento tecnológico das madeiras amazônicas.

Palavras-chave: Anatomia da Madeira; Macroscopia; Microscopia.

Anatomical characterization of three wood species from a sawmill in northeastern pará, brazil

Abstract: This study aimed to anatomically characterize the wood of Micropholis venulosa, Clarisia racemosa, and Peltogyne spp. collected from a sawmill located in São Miguel do Guamá, Pará, Brazil. Macroscopic, microscopic, and fiber morphological analyses were performed using light microscopy, followed by measurements of vessels, rays, and fibers and descriptive statistical analysis. The three species exhibited distinct anatomical characteristics consistent with descriptions reported in the literature, allowing their differentiation and confirming the identity of the analyzed samples. Macroscopic characterization revealed differences in color, texture, grain, density, and vessel distribution. Microscopic analysis showed variations in vessel frequency, ray dimensions, and axial parenchyma arrangement, while fiber morphology differed in fiber length, lumen diameter, and cell wall thickness. The results highlight the importance of wood anatomy as a reliable tool for species identification, contributing to accurate timber commercialization, sustainable forest management, and the technological utilization of Amazonian timber resources.

Keywords: Wood Anatomy; Macroscopy; Microscopy.

1. Introdução

O setor madeireiro desempenha papel de destaque na atividade florestal, especialmente na Amazônia, cuja elevada biodiversidade e disponibilidade de recursos florestais sustentam grande parte da economia da região Norte por meio do extrativismo e da produção de madeira. Além disso, a diversificação da biomassa florestal contribui para o abastecimento energético de diferentes segmentos industriais, como cerâmicas, indústrias de celulose, serrarias, agroindústrias e usinas termelétricas (ELEOTÉRIO; STORCK; LOPES, 1996; REIS et al., 2019; TEIXEIRA et al., 2024).

Entretanto, o setor enfrenta desafios relacionados à redução das exportações, aumento das importações, identificação incorreta de espécies e baixo aproveitamento da matéria-prima, fatores que elevam custos e aumentam a geração de resíduos. Apesar de avanços na legislação, como a Resolução CONAMA nº 406/2006, ainda existem limitações na confiabilidade da identificação das espécies e dos inventários florestais, reforçando a necessidade de métodos técnico-científicos mais precisos (PATRICIA et al., 2018; CYSNEIRO et al., 2018; MENDOZA; BORGES; PIERIN, 2017; ANDRADE et al., 2022).

A caracterização anatômica, física, mecânica e química da madeira é essencial para determinar seu potencial tecnológico, garantir sua correta utilização e subsidiar o manejo florestal sustentável. No estado do Pará, destacam-se as espécies *Micropholis venulosa* (Guajará), *Clarisia racemosa* (Oiticica) e *Peltogyne* spp. (Roxinho), amplamente utilizadas pela indústria madeireira devido às suas propriedades tecnológicas e elevada durabilidade, sendo empregadas na construção civil, fabricação de móveis, embarcações, chapas, painéis e outros produtos madeireiros (CRUZ; CARVALHO, 2003; BOTELHO, 2022; CRUZ-FILHO et al., 2024).

Nesse contexto, a anatomia da madeira constitui uma importante ferramenta para a identificação correta das espécies, distinção entre madeiras semelhantes e previsão de seu comportamento tecnológico, contribuindo para o uso racional dos recursos florestais. Assim, este trabalho tem como objetivo caracterizar anatomicamente a madeira de *Peltogyne* spp., *Micropholis venulosa* (Mart. & Eichler) Pierre e *Clarisia racemosa* Ruiz & Pav., visando confirmar a identidade de amostras coletadas em uma serraria no nordeste paraense.

2. Material e métodos

2.1. Obtenção das amostras

As amostras de madeira foram coletadas em uma serraria localizada no município de São Miguel do Guamá, no estado do Pará. O município localiza-se na mesorregião do

Nordeste Paraense e na microrregião do Guamá, fazendo divisa com os municípios de Santa Maria do Pará, Bonito, Ourém, São Domingos do Capim, Irituia, Inhangapi e Castanhal (MARINHO et al., 2020; ORENGEL DIAS et al., 2023).

2.2. Caracterização macroscópica

A caracterização macroscópica foi realizada com auxílio de uma lupa conta-fios de 10× de ampliação, sendo avaliadas as propriedades organolépticas da madeira, como cor, textura, grã, padrão e dureza. A descrição das estruturas anatômicas seguiu as diretrizes do Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA, 1992). O estudo foi conduzido no Laboratório de Propriedades da Madeira (LPM), e as imagens macroscópicas da superfície transversal das amostras foram obtidas por meio de uma lupa acoplada a uma câmera fotográfica digital.

2.3. Caracterização microscópica

2.3.1. Cortes histológicos

O processo tem início com o corte da madeira em seções finas, cujas espessuras na ordem de micrômetros (µm). De acordo com Burger e Richter (1990), essa etapa exige a utilização de um equipamento de alta precisão, intitulado micrótomo, o qual permite a produção de cortes delgados com espessuras previamente definidas, variando geralmente entre 15 e 25 µm.

2.3.2. Preparação de lâminas semipermanentes e permanentes

Após a obtenção dos cortes histológicos, realizou-se o branqueamento com hipoclorito de sódio, seguido de lavagens com água deionizada e coloração com safranina. Para as lâminas semipermanentes, os cortes foram fixados em álcool etílico a 50%, montados nas seções transversal, tangencial e radial, utilizando glicerina como meio de montagem, e vedados com lamínula. Para as lâminas permanentes, após a coloração, os cortes foram desidratados em série alcoólica crescente (30%, 50%, 70%, 95%, álcool absoluto e acetato), montados com bálsamo do Canadá, cobertos com lamínula e devidamente etiquetados para identificação.

2.4. Morfologia das fibras

2.4.1. Macerado para observação dos elementos traqueais e fibrosos.

Os cortes foram realizados manualmente pela técnica de corte a mão livre. Em seguida, as amostras foram submetidas à maceração em solução de peróxido de hidrogênio e ácido acético glacial (1:1), conforme Franklin (1937), permanecendo em estufa a 60 °C por 48 horas para promover a dissociação das fibras. Esse processo permite a

dissolução da lamela média e a individualização dos elementos anatômicos (BURGER; RICHTER, 1991).

2.4.2. Imagem de fibra, elemento de vaso e cortes anatômicos

A atividade em questão trata-se de uma captura fotográfica da fibra e cortes anatômicos da madeira. Para realizar a captura de imagens de fibra e elementos de vaso, utilizou-se o material macerado pronto, das espécies. Na etapa de captura de imagem dos cortes anatômicos, a lente objetiva de 10x foi sobreposta nas superfícies dos cortes anatômicos (transversal, radial e tangencial). As imagens microscópicas foram executadas através Aixel Vision, pelo microscópio digital com a câmera acoplada.

2.4.3. Mensuração das estruturas anatômicas da madeira e estatística descritiva

Foram mensurados fibras, vasos e raios da madeira por meio de imagens obtidas em microscopia óptica nos planos transversal, longitudinal tangencial e longitudinal radial. Avaliaram-se o diâmetro e a frequência dos poros, além da altura, largura e frequência dos raios, com 30 medições por característica utilizando o software Aixel Vision. Os parâmetros anatômicos quantitativos e qualitativos foram submetidos à análise estatística descritiva no Microsoft Excel, obtendo-se valores médios, mínimos, máximos e desvio padrão.

3. Resultados e Discussão

3.1. Caracterização macroscópica e organoléptica

A madeira de Micropholis venulosa apresentou coloração bege, sem distinção entre cerne e alburno, brilho moderado, textura fina, densidade média, elevada dureza ao corte e grã de direita a ondulada. Macroscopicamente, apresentou camadas de crescimento distintas, parênquima axial pouco evidente, vasos pequenos a médios, difusos, solitários ou múltiplos, sem tilos, e raios finos visíveis apenas com lente de aumento. *Clarisia racemosa* apresentou distinção entre cerne e alburno, brilho moderado, densidade média, elevada dureza, textura média e grã direita ou entrecruzada.

As camadas de crescimento foram distintas, com parênquima paratraqueal aliforme confluente, vasos médios a grandes, solitários ou múltiplos, com tilos, e raios visíveis apenas com lente. *Peltogyne* spp. apresentou cerne roxo, alburno bege-claro, brilho moderado a acentuado, alta densidade, elevada dureza, textura fina a média e grã direita ou irregular. Macroscopicamente, apresentou camadas de crescimento bem definidas, parênquima paratraqueal aliforme confluente e marginal, vasos pequenos a médios, difusos, solitários ou múltiplos, sem obstruções, e raios finos no plano tangencial.

Figura 25 - Planos transversais das madeiras das espécies: a) M. venulosa; b) C. racemosa; c) Peltogyne spp



Os resultados obtidos para *Micropholis* venulosa foram compatíveis com as descrições do LPF e do IPT (1983), que relatam cerne e alburno pouco distintos, brilho moderado, cheiro e gosto imperceptíveis, densidade média, madeira dura ao corte, textura fina e grã ondulada a direita. As características anatômicas observadas, como porosidade difusa, vasos solitários e múltiplos e camadas de crescimento distintas, também são semelhantes às descritas para espécies da família Sapotaceae (ALVES et al., 2023).

Para *Clarisia racemosa*, as características organolépticas e anatômicas foram condizentes com as descrições do Remade e do LPF/IPT (1983; 1989a), destacando a distinção entre cerne e alburno, brilho moderado, textura média, grã irregular ou reversa, parênquima paratraqueal aliforme confluente, vasos médios a grandes com tilos e camadas de crescimento bem definidas.

As características observadas para *Peltogyne* spp. também corroboram as descrições do LPF e do IPT (1983; 1989a), apresentando distinção entre cerne roxo e alburno claro, alta densidade, elevada dureza, textura fina a média, grã direita a irregular, parênquima paratraqueal aliforme confluente e marginal, vasos de porosidade difusa e raios finos, além de camadas de crescimento distintas.

3.2. Caracterização microscópica

Na caracterização microscópica, *Micropholis venulosa* apresentou poros predominantemente solitários, com múltiplos de 2 a 3, frequência média de 11,50 poros/mm², parênquima apotraqueal e raios multisseriados, homogêneos, não estratificados, com altura e largura médias de 291,73 e 32,38 µm, respectivamente. *Clarisia racemosa* apresentou poros solitários e múltiplos de 2, frequência média de 6,42 poros/mm², parênquima paratraqueal aliforme confluente e raios multisseriados, homogêneos e não estratificados, com altura média de 495,13 µm e largura de 83,08 µm. Peltogyne spp. apresentou poros predominantemente solitários, frequência média de 5,58 poros/mm², parênquima axial paratraqueal aliforme e raios multisseriados, homogêneos, não estratificados, com altura e largura médias de 384,33 e 54,03 µm. Os resultados obtidos para *M. venulosa* mostraram-se semelhantes aos descritos por Santini Junior (2013), corroborando as características anatômicas observadas neste estudo.

Figura 26 - Frequência de poros e dimensões dos raios das madeiras das espécies *M. venulosa*; *C. racemosa* e *Peltogyne* spp

	Poro		**Raio**		
	Frequência/mm²			**Altura (µm)**	**Largura (µm)**
M. venulosa	**Média**	11,500	**Média**	291,729	32,378
	Maior valor	12,917	**Maior valor**	420,150	43,410
	Menor valor	9,583	**Menor valor**	207,760	23,600
	Desvio padrão	1,236	**Desvio padrão**	54,330	5,349

	Coef. de variação	10,748	**Coef. de variação**	18,623	16,522
C. racemosa	**Poro**		**Raio**		
	Frequência/mm²			**Altura (µm)**	**Largura (µm)**
	Média	6,417	**Média**	495,130	83,081
	Maior valor	7,500	**Maior valor**	735,850	99,060
	Menor valor	5,417	**Menor valor**	345,520	52,860
	Desvio padrão	0,864	**Desvio padrão**	103,630	11,857
	Coef. de variação	13,465	**Coef. de variação**	20,930	14,271
Peltogyne spp.	**Poro**		**Raio**		
	Frequência/mm²			**Altura (µm)**	**Largura (µm)**
	Média	5,583	**Média**	384,325	54,026
	Maior valor	7,500	**Maior valor**	569,020	70,750
	Menor valor	3,333	**Menor valor**	247,430	35,900
	Desvio padrão	1,491	**Desvio padrão**	72,932	8,952
	Coef. de variação	26,699	**Coef. de variação**	18,977	16,570

Os resultados obtidos para *Clarisia racemosa* foram semelhantes aos descritos por Santini Junior (2013), que relatou vasos predominantemente solitários, com múltiplos de até quatro elementos, porosidade difusa, frequência de 3 a 5 vasos/mm² e diâmetro entre 124 e 267 µm. O autor também descreve parênquima axial em faixas largas e contínuas, raios heterocelulares multisseriados, com 4 a 7 raios/mm e altura entre 123 e 515 µm, além da ausência de estratificação, canais intercelulares, cristais e tilos, corroborando os resultados deste estudo.

Para *Peltogyne* ssp., Santini Junior (2013) descreve vasos predominantemente solitários, com múltiplos de até três elementos, frequência de 4 a 7 vasos/mm² e diâmetro entre 117 e 254 µm. O parênquima axial é paratraqueal aliforme confluente, com ocorrência de linhas marginais, e os raios são homocelulares, exclusivamente multisseriados, com 4 a 7 raios/mm e altura entre 98 e 489 µm. O autor também relata ausência de estratificação, canais intercelulares e tilos, além da presença de óleo-resina e cristais prismáticos, características compatíveis com os resultados observados neste trabalho.

3.3. Morfologia das fibras

As fibras de Micropholis venulosa apresentaram comprimento médio de 1,058 mm, diâmetro do lume de 11,965 µm e largura da parede de 4,504 µm. Clarisia racemosa apresentou comprimento médio de 1,375 mm, o maior diâmetro do lume (12,384 µm) e largura da parede de 4,504 µm. Peltogyne spp. destacou-se pelo maior comprimento médio das fibras (1,640 mm) e pela menor largura média da parede (4,371 µm), apresentando diâmetro do lume de 11,866 µm.

Figura 27 - Descrição da morfologia das fibras das madeiras das espécies *M. venulosa*; *C. racemosa* e *Peltogyne* spp.

		Características das Fibras			
		Comprimento (mm)	**Largura (µm)**	**Diâmetro do lume (µm)**	**Espessura da parede (µm)**
M. venulosa	**Média**	1,058	20,972	11,965	4,504
	Maior valor	1,360	24,640	15,590	5,555
	Menor valor	0,700	17,380	8,820	3,220
	Desvio padrão	0,155	2,344	1,826	0,682
	Coef. de variação	14,678	11,177	15,258	15,143

		Características das Fibras			
		Comprimento (mm)	Largura (µm)	Diâmetro do lume (µm)	Espessura da parede (µm)
C. racemosa	**Média**	1,375	21,391	12,384	4,504
	Maior valor	1,710	26,320	16,990	5,055
	Menor valor	1,040	16,810	9,350	3,570
	Desvio padrão	0,201	2,317	1,987	0,411
	Coef. de variação	14,621	10,831	16,047	9,124
		Características das Fibras			
		Comprimento (mm)	**Largura (µm)**	**Diâmetro do lume (µm)**	**Espessura da parede (µm)**
Peltogyne spp.	**Média**	1,640	20,608	11,866	4,371
	Maior valor	1,880	23,400	14,280	4,980
	Menor valor	1,310	16,310	9,600	3,355
	Desvio padrão	0,165	1,839	1,219	0,453
	Coef. de variação	10,086	8,924	10,270	10,373

Os resultados obtidos para as fibras de *Micropholis venulosa* são semelhantes aos descritos por Costa (2006), que caracteriza o gênero *Micropholis* por apresentar fibras com pontoações simples e areoladas diminutas, além de paredes predominantemente espessas. Para *Clarisia racemosa*, os resultados são compatíveis com os descritos para *Brosimum parinarioides* Ducke, espécie da família Moraceae, cujas fibras libriformes são septadas, curtas, com comprimento médio de 1.581,94 µm e paredes delgadas (RODRIGUES, 2016), corroborando também os resultados de Ferreira et al. (2004). As fibras de *Peltogyne* spp. apresentaram características semelhantes às descritas para espécies da família Leguminosae, sendo libriformes, com pontoações simples, comprimento entre 1.100 e 1.700 µm, diâmetro do lume de 2 a 15 µm e espessura de parede entre 1 e 10 µm, variando de delgadas a espessas.

4. Conclusões

As madeiras encontradas em São Miguel do Guamá apresentaram características anatômicas compatíveis com *Micropholis venulosa*, *Clarisia racemosa* e *Peltogyne* spp. As propriedades macroscópicas, microscópicas e morfológicas confirmaram a identidade das amostras, em concordância com a literatura. Os resultados reforçam a importância da caracterização anatômica para a identificação de espécies, a correta comercialização, o manejo sustentável e o aproveitamento tecnológico das madeiras amazônicas.

5. Agradecimentos

Os autores agradecem à Universidade Federal de Viçosa (UFV), ao Departamento de Engenharia Florestal (DEF-UFV), ao Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal (PPGCF-UFV), à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG), à Sociedade de Investigações Florestais (SIF), ao Laboratório de Celulose e Papel (LCP), ao Laboratório de Painéis e Energia da Madeira (LAPEM), ao Laboratório de Propriedades da Madeira (LPM) e ao Laboratório de Resíduos da Indústria Florestal (LABRIF) pelo apoio institucional, infraestrutura laboratorial, suporte técnico e científico que possibilitaram o desenvolvimento deste trabalho.

6. Referências bibliográficas

Alves, R. C., Oliveira, J. T. S., Motta, J. P., Paes. J. P. (2023) Caracterização Anatômica Macroscópica de Madeiras Folhosas Comercializadas no Estado do Espírito Santo. Floresta e Ambiente, v. 19, n. 3, p. 352–361. https://doi.org/10.4322/floram.2012.042

Amezquita, P. S. M., Rubiano, J. A. M., Barros Filho, N. F., Cipriani, H. N. (2018) Fertilization effects on Eucalyptus pellita f. Muell productivity in the colombian orinoco region. Revista Árvore, v. 42, n. 5, p. 420502, 2018. http://dx.doi.org/10.1590/1806-90882018000500002

Andrade, M.; Zenid, G.; Nunes, F.; Lentini, M; Santos, H.; Costa, J. (2022). Espécies madeireiras nativas menos comercializadas: uma oportunidade para produção e conservação na Amazônia brasileira. Boletim Técnico Timberflow 9. Imaflora, Piracicaba.

BURGER, M. L.; RICHTER, H. G. **(**1991) Anatomia da madeira. São Paulo: Nobel.

Cruz Filho, I. J., Araújo, A. M. S., Santos, A. de S., Silva, A. V. A., Barreto, B. R. S., Silva, L. Q. M., Cavalcante, L. A. O., Silva, L. R. O., Santos, N. F. N., Brandão, W. F. M., Leite, S. P. (2024). Clarisia racemosa: phytochemical characterization and biological activities a brief literature review. Scientific Electronic Archives, 17(2). https://doi.org/10.36560/17220241876

Cruz, E. D., Carvalho, J. E. U. (2003). Biometria de frutos e sementes e germinação e curupixá (Micropholis cf. venulosa Mart. & Eichler - Sapotaceae). Acta Amazonica. v. 33, n. 3, p. 389–398. https://doi.org/10.1590/S0044-59672003000300005

Cysneiros, V. C., Mendonça Júnior, J. O., Lanza, T. R., Moraes, J. C. R., Samor, O. J. M., (2018) Espécies madeireiras da Amazônia: riqueza, nomes populares e suas peculiaridades. Pesquisa Florestal Brasileira Brazilian Journal of Forestry Research, v. 38, e201801567, p. 1-14.https://doi.org/10.4336/2018.pfb.38e201801567

Eleotério, J. R., Storck, L., Lopes, S. J., (1996) Caracterização de peças de madeira produzidas em serraria visando o controle de qualidade. v. 6, n. 1, p. 89-99, https://doi.org/10.5902/19805098328

Ferreira, G. C., Gomes, F. I., Hopkins, M. J. G. (2004) Estudo anatômico das espécies de Leguminosae comercializadas no estado do Pará como “angelim”. Acta Amazonica, v. 34, n. 3, p. 387–398. https://doi.org/10.1590/S0044-59672004000300005

FRANKLIN, G. L. Preparation of thin sections of synthetic resins and wood – resin composites, and a new macerating method for wood. Nature, v 155, nº 3924, p. 51. 1945.

Governo do Estado do Pará (2023) Secretaria de Estado de Ciência, Tecnologia, Educação Técnica e Tecnológica – SECTET. Fundação Amazônia De Amparo A Estudos e Pesquisas - FAPESPA. 2023. Disponível em: www.fapespa.pa.gov.br

Marinho, E. R., Vitorino, M. I., Barbosa, I. C. C., Barbosa L. G. S., Santos, M. R. S., Souza, H. E. N. (2020). As atividades Antrópicas na Modulação da Qualidade de Água do rio Guamá, em São Miguel do Guamá, Pará. Revista Brasileira de Geografia Física v. [s. l.], v. 13, p. 182–195, https://doi.org/10.26848/rbgf

Mendes, L. B. (2022). Resistência natural de espécies tropicais a cupins de madeira seca (Dissertação de mestrado). Universidade Federal Do Espírito Santo (UFES).

Mendoza, Z. M., S. H., Borges, P. H. M., Pierin, L. C. (2017) Coeficiente de rendimento em madeira serrada de oito espécies nativas de Mato Grosso. Nativa, v. 5, n. 2012, p. 568–573, https://doi.org/10.31413/nativa.v5i7.4430

MOTTA, J. P., Oliveira, J. T. S., Braz, R. L., Duarte, A. P. C., Alves, R. C. (2014) Caracterização da madeira de quatro espécies florestais. Ciência Rural, v. 44, n. 12, p. 2186–2192, https://doi.org/10.1590/0103-8478cr20130479

Paraense, V. de C., Mendes, T. S., de Santana, A. C., de Freitas, A. D. D., Serra, A. B., de Almeida, M. N. F., Hamada, M. O. S., Santos, R. S. (2023). Desempenho operacional no desdobro de espécies nativas em serrarias na Amazônia. Brazilian Journal of Development, 9(1), 1003–1015. https://doi.org/10.34117/bjdv9n1-070

Reis, P. C. M. dos R., Souza, A. L. de, Reis, L. P., Carvalho, A. M. M. L., Mazzei, L., Reis, A. R. S., & Torres, C. M. M. E. (2019). Agrupamento de espécies madeireiras da Amazônia com base em propriedades físicas e mecânicas. Ciência Florestal, 29(1), 336–346. https://doi.org/10.5902/1980509828114

Remade. (2026) Madeiras Brasileiras E Exóticas - Guariúba. https://www.remade.com.br/madeiras-exoticas/173/madeiras-brasileiras-e-exoticas/guariuba.

Santini Junior, L. (2013) Descrição macroscópica e microscópica da madeira aplicada na identificação das principais espécies comercializadas no Estado de São Paulo – Programas "São Paulo Amigo da Amazônia" e Cadmadeira. (Dissertação de Mestrado) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz.

Teixeira, R. A. C., Lima, M.D.R., Silva, A.R., Gonçalves, D. A., Moreira, L. J. S., Miranda, R. O. V., Dias Junior, A. F., Tomazello Filho, M., Soares, A. A. V., Protásio, T. P. (2024) Dynamics of experimental plantations of Tachigali vulgaris in response to fertilization and soil texture. New Forests, v. 55, n. 4, p. 713–733, https://link.springer.com/article/10.1007/s11056-023-09999-1 .

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Caracterização anatômica e organoléptica de três espécies madeireira amazônicas: *Manilkara huberi* (Ducke) A.Chev; *Marlimorimia psilostachya* (DC.) L.P.Queiroz & Marc.F.Simon e *Astronium lecointei* Ducke

Ariane Mateus De Souza[1]; Camila Juliana Sampaio Pereira[1]; Pamella Carolline Marques Reis Reis[2]; Êmilly Wakim de Almeida[1]; Amanda Ladeira Carvalho[1]; João Gilberto Meza Ucella Filho[1]; Angelica De Cassia Oliveira Carneiro[1]; Ana Márcia Macedo Ladeira Carvalho [1]

[1] Universidade Federal de Viçosa
[2] Universidade Federal Rural da Amazônia

Resumo: As espécies madeireiras amazônicas apresentam importância econômica e ecológica, sendo a caracterização anatômica uma ferramenta adicional para sua identificação e utilização. Nesse contexto, o presente trabalho teve como objetivo realizar a caracterização anatômica e organoléptica da madeira de *Manilkara huberi* (maçaranduba), *Marlimorimia psilostachya* (timborana) e *Astronium lecointei* (muiracatiara), visando ampliar o conhecimento sobre suas propriedades e potencial de utilização. As amostras foram coletadas em uma serraria localizada no município de São Miguel do Guamá, PA. Foram realizadas análises macroscópicas, microscópicas e organolépticas das madeiras. Os resultados evidenciaram características distintas das espécies. A maçaranduba apresentou cor castanho avermelhada, textura fina, alta dureza, frequência média de 26,6 poros/mm², diâmetro médio de 91,02 µm e comprimento médio das fibras de 1,64 mm. A timborana apresentou características como textura média, dureza moderada, frequência média de 7,7 poros/mm², diâmetro médio de 125,60 µm e fibras muito longas, com comprimento médio de 4,03 mm. A muiracatiara apresentou alto brilho, dureza elevada, frequência média de 6,0 poros/mm², diâmetro médio de 140,12 µm e comprimento médio das fibras de 1,03 mm. Conclui-se que a caracterização anatômica das madeiras fornecem informações relevantes para a identificação, valorização e utilização adequada dessas espécies, subsidiando o manejo florestal e ampliando o conhecimento sobre o potencial tecnológico e as utilizações de espécies madeiras amazônicas.

Palavras-chave: Anatomia da madeira; Espécies amazônicas; madeira.

Anatomical and organoleptic characterization of three Amazonian timber species: *Manilkara huberi* (Ducke) A.Chev; *Marlimorimia psilostachya* (DC.) L.P.Queiroz & Marc.F.Simon and *Astronium lecointei* Ducke

Abstract: Amazonian timber species are economically and ecologically important, and anatomical characterization is an additional tool for their identification and use. In this context, the present work aimed to perform the anatomical and organoleptic characterization of the wood of *Manilkara huberi* (maçaranduba), *Marlimorimia psilostachya* (timborana), and *Astronium lecointei* (muiracatiara), in order to expand knowledge about their properties and potential uses. Samples were collected from a sawmill located in the municipality of São Miguel do Guamá, PA. Macroscopic, microscopic, and organoleptic analyses of the woods were performed. The results showed distinct characteristics of the species. Maçaranduba presented a reddish-brown color, fine texture, high hardness, an average frequency of 26.6 pores/mm², an average diameter of 91.02 µm, and an average fiber length of 1.64 mm. Timborana wood presented characteristics such as medium texture, moderate hardness, average frequency of 7.7 pores/mm², average diameter of 125.60 µm, and very long fibers, with an average length of 4.03 mm. Muiracatiara wood presented high luster, high hardness, average frequency of 6.0 pores/mm², average diameter of 140.12 µm, and average fiber length of 1.03 mm. It is concluded that the anatomical characterization of woods provides relevant information for the identification, valuation, and

appropriate use of these species, supporting forest management and expanding knowledge about the technological potential and uses of Amazonian wood species.

Keywords: Wood anatomy; Amazonian species; wood.

1. Introdução

A Amazônia representa a maior floresta tropical do mundo e abriga uma das mais ricas biodiversidades do planeta, reunindo milhares de espécies vegetais com elevado potencial econômico, ecológico e tecnológico. Além de desempenhar funções essenciais na manutenção do equilíbrio climático e na conservação da biodiversidade, a floresta amazônica constitui uma importante fonte de recursos naturais para as populações locais e para diversos setores da economia brasileira (REIS *et al.*, 2019).

Entre os recursos florestais disponíveis na região, a madeira destaca-se como um dos produtos de maior relevância econômica, sendo utilizada pela indústria madeireira, construção civil, produção de móveis e outros segmentos produtivos. O manejo florestal sustentável tem sido apontado como uma estratégia para conciliar a exploração desses recursos com a conservação da floresta, promovendo a geração de emprego e renda e garantindo a manutenção dos serviços ecossistêmicos (ANDRADE *et al.*, 2019; FORTINI, 2019).

A produção de madeira amazônica no Brasil tem o potencial de ser uma indústria sustentável, incluindo a otimização e valorização das árvores florestais e a geração de empregos e renda para a região, especialmente para comunidades tradicionais e pequenos produtores (FORTINI e CARTER 2014; RIBEIRO *et al.* 2014; WALDHOFF e VIDAL 2015). Nesse contexto, a anatomia da madeira é uma ferramenta adicional na identificação botânica das espécies, permitindo a descrição e diferenciação de elementos estruturais como vasos, fibras, raios e parênquima. Além disso, as características anatômicas estão diretamente relacionadas as propriedades tecnológicas da madeira, influenciando aspectos como resistência mecânica, permeabilidade, durabilidade natural e comportamento durante o processamento industrial.

O conhecimento detalhado da estrutura anatômica também contribui para reduzir erros de identificação, auxiliar na rastreabilidade da madeira comercializada e ampliar as possibilidades de aproveitamento tecnológico dos recursos florestais (REIS *et al.*, 2011). Dentre as espécies de importância econômica presentes na Amazônia destacam-se a maçaranduba (*Manilkara huberi*), a timborana (*Marlimorimia psilostachya*) e a muiracatiara (*Astronium lecointei*), que são conhecidas pela dureza e alta durabilidade, apresentando elevada densidade, resistência mecânica e durabilidade natural. Dessa forma, o presente trabalho teve como

objetivo realizar a caracterização morfológica e anatômica dessas espécies, visando ampliar o conhecimento sobre sua correta identificação, valorização e utilização tecnológica.

2. Material e métodos

2.1 Área de coleta

As biomassas utilizadas foram coletadas na serraria Norte Brasil, localizada no município de São Miguel do Guamá, no estado do Pará, escolha da área de coleta levou em consideração a representatividade da atividade madeireira na região, que gera grande volume de resíduos florestais sem destinos adequados.

2.2 **Caracterização morfológica das espécies amazônicas**

A caracterização macroscópica e organoléptica foi realizada em corpos de prova de 2 × 2 × 3 cm, utilizando lupa de 10X e cortes histológicos obtidos em micrótomo de deslize. Foram avaliadas as características de cor, brilho, cheiro, gosto, grã, textura e dureza das espécies *Manilkara huberi*, *Astronium lecointei* e *Marlimorimia psilostachya*, conforme as normas do IBAMA (1992). A caracterização anatômica incluiu cortes histológicos (15–20 μm), branqueamento, coloração, desidratação e montagem em lâminas permanentes, com mensurações realizadas no software Axio Vision LE Rel. 4.3. Para o estudo das fibras, utilizou-se a técnica de maceração pelo Método Franklin (1945), determinando comprimento, largura, espessura da parede celular e diâmetro do lume, seguida de lavagem em água corrente e coloração com Azul de Astra.

3. Resultados e discussão

3.1 Caracterizações Macroscópica E Organoléptica

A análise macroscópica da madeira de *Manilkara huberi* evidenciou distinção entre cerne e alburno, com cerne de coloração marrom, brilho moderado, textura fina, grã direta e elevada dureza (Figura 1b; Tabela 1). A madeira de *Marlimorimia psilostachya* apresentou cerne e alburno pouco distintos, com cerne marrom-avermelhado, brilho moderado, textura média, grã irregular e dureza moderada (Figura 1 a; Tabela 1). Para *Astronium lecointei*, observou-se distinção entre cerne e alburno, com cerne marrom, elevado brilho, textura média, grã irregular e alta dureza (Figura 1c; Tabela 1). Resultados semelhantes para outras espécies madeireiras foram encontrados na descrição macroscópica e organoléptica (FOELKEL, 2007).

FIGURA 1: corte transversal macroscópico das espécies amazônicas.



Fonte: autora 2026

TABELA 1: Características organolépticas das espécies amazônicas estudadas.

ESPÉCIES	Cor	Brilho	Cheiro	Gosto	Grã	Textura	Dureza
Manilkara huberi (MAÇARANDUBA)	Cerne castanho avermelhado	Moderado	Indistinto	Imperceptível	Direta	Fina	Alta
Marlimorimia psilostachya (TIMBORANA)	Marrom-avermelhado-claro	Moderado	Indistinto	Imperceptível	Irregular	Média	Moderada
Astronium lecointei (MUIRACATIARA)	Marrom	Alto	Indistinto	Moderadamente amargo	Irregular	Média	Alta

Fonte: autora 2026

3.2 Caracterização Microscópica Das Espécies Amazônicas

Na análise microscópica da madeira de *Marlimorimia psilostachya* (timborana), observou-se porosidade difusa, com predominância de vasos solitários e ocorrência de múltiplos. Os vasos apresentaram diâmetro médio de 125,60 µm e frequência média de 7,7 poros/mm² (Tabela 2). Verificou-se ainda a predominância de parênquima axial paratraqueal vasicêntrico. Esse tipo de parênquima é comum em diversas espécies tropicais e constitui uma importante característica diagnóstica para a identificação anatômica da madeira. A combinação entre porosidade difusa, vasos de maior diâmetro e parênquima paratraqueal vasicêntrico constitui um conjunto de caracteres anatômicos importantes para a identificação de *Marlimorimia psilostachya* e para a compreensão de suas propriedades tecnológicas e ecológicas.

TABELA 2: Dados quantitativos de poros e raios da espécie *Marlimorimia psilostachya.*

Poros ou (Vasos)	Frequência/mm	Diâmetro (µm)	**Raio**	Altura (µm)	Largura (µm)
Média	7,7	125,60	Média	195,98	21,84
Maior valor	11,3	157,55	Maior valor	294,81	34,43
Menor valor	4,2	100,45	Menor valor	112,28	13,21
Desvio padrão	3,2	18,43	Desvio padrão	43,93	4,89
Coeficiente de variação	41,5	14,68	Coeficiente de variação	22,41	22,39

Fonte: autora 2026

Na análise microscópica da madeira de *Manilkara huberi* (maçaranduba), observou-se porosidade difusa, com predominância de vasos múltiplos. Os vasos apresentaram diâmetro médio de 91,02 µm e frequência média de 26,6 poros/mm² (Tabela 3). De acordo com a classificação anatômica da madeira, esses resultados indicam uma frequência relativamente elevada de vasos associada a diâmetros médios, característica frequentemente observada em espécies de elevada densidade e resistência mecânica.

Observou-se ainda a presença de parênquima axial disposto em linhas finas, característica diagnóstica importante para a identificação da espécie. Esse padrão de distribuição do parênquima contribui para a diferenciação da maçaranduba em relação a outras espécies amazônicas. A combinação entre porosidade difusa, vasos de diâmetro médio e elevada frequência de poros reflete adaptações anatômicas relacionadas a condução de água e ao suporte mecânico da planta. Além disso, tais características estão de acordo com a elevada densidade básica e a alta durabilidade natural frequentemente atribuídas à maçaranduba, espécie amplamente reconhecida por sua resistência e utilização em aplicações estruturais, pisos e construções pesadas.

TABELA 3: Dados quantitativos de poros e raios da espécie *Manilkara huberi*.

Poros ou (Vasos)	Frequência/mm²	Diâmetro (µm)	**Raio**	Altura (µm)	Largura (µm)
Média	26,6	91,02	Média	326,67	28,88
Maior valor	29,6	125,50	Maior valor	679,29	41,51
Menor valor	23,8	48,34	Menor valor	44,53	21,70
Desvio padrão	2,6	25,49	Desvio padrão	119,60	5,99
Coeficiente de	9,9	28,00	Coeficiente	36,61	20,75

variação	de variação

Fonte: autora 2026

Na análise microscópica, a madeira da espécie *Astronium lecointei* (muiracatiara) apresentou porosidade difusa, caracterizada pela distribuição relativamente uniforme dos vasos ao longo do anel de crescimento. Observou-se a ocorrência de poros solitários e múltiplos obstruídos por tilose, com diâmetro médio de 140,12 µm e frequência média de 6,0 poros/mm² (Tabela 4). Foi possível identificar o parênquima axial paratraqueal do tipo vasicêntrico.

TABELA 4: Dados quantitativos de poros e raios da espécie *Astronium lecointei*.

Poros ou (Vasos)	Frequência/mm²	Diâmetro (µm)	**Raio**	Altura (µm)	Largura (µm)
Média	6,0	140,12	Média	303,84	41,35
Maior valor	6,7	179,25	Maior valor	398,40	56,67
Menor valor	5,4	100,00	Menor valor	237,89	18,12
Desvio padrão	0,5	19,75	Desvio padrão	39,04	7,38
Coeficiente de variação	7,9	14,09	Coeficiente de variação	12,85	17,85

Fonte: autora 2026

3.3 Caracterizações Morfológica Das Fibras Das Espécies Amazônicas

Em relação às fibras da espécie *Astronium lecointei* (muiracatiara), observou-se predominância de fibras libriformes não septadas. O comprimento médio das fibras foi de 1,03 mm, variando entre 0,74 e 1,38 mm (Tabela 5), permitindo classificá-las como fibras curtas. Além disso, as fibras apresentaram largura média de 20,09 µm, diâmetro médio do lume de 11,58 µm e espessura média da parede celular de 4,25 µm (Tabela 5), indicando células com paredes relativamente desenvolvidas em relação ao lume.

TABELA 5: Dados qualitativos de fibras da espécie *Astronium lecointei* (muiracatiara).

Fibra	Comprimento (mm)	Largura (µm)	Diâmetro do lume (µm)	Espessura da parede (µm)
Média	1,03	20,09	11,58	4,25
Maior valor	1,38	23,34	14,26	4,87
Menor valor	0,74	16,95	8,40	3,45
Desvio padrão	0,14	1,54	1,50	0,37
Coeficiente de variação	13,16	7,68	12,98	8,59

Fonte: autora 2026

Em relação às fibras da espécie *Manilkara huberi* (maçaranduba), observou-se predominância de fibras libriformes não septadas, característica frequentemente associada à

função de sustentação mecânica e de sustentação da madeira. O comprimento médio das fibras foi de 1,64 mm, variando entre 1,31 e 1,88 mm conforme apresentado na (Tabela 6), permitindo classificá-las como fibras de comprimento médio. Os valores médios de largura das fibras (20,61 µm), diâmetro do lume (11,87 µm) e espessura da parede celular (4,37 µm) apresentados na tabela 6, indicam células com paredes relativamente desenvolvidas e lume moderado. Essa configuração anatômica pode contribuir para o aumento da resistência mecânica, maior rigidez estrutural e elevada densidade da madeira.

TABELA 6: Dados qualitativos de fibras da espécie *Manilkara huberi* (MAÇARANDUBA).

Fibra	Comprimento (mm)	Largura (µm)	Diâmetro do lume (µm)	Espessura da parede (µm)
Média	1,64	20,61	11,87	4,37
Maior valor	1,88	23,40	14,28	4,98
Menor valor	1,31	16,31	9,60	3,36
Desvio padrão	0,17	1,84	1,22	0,45
Coeficiente de variação	10,09	8,92	10,27	10,37

Fonte: autora 2026

Em relação às fibras da espécie *Marlimorimia psilostachya* (Timborana), estas foram classificadas como libriformes não septadas, característica típica de espécies de folhosas e associada principalmente a sua função de sustentação. O comprimento médio das fibras foi de 4,03 mm, sendo classificadas como fibras muito longas, característica que pode contribuir para melhores propriedades mecânicas da madeira e maior potencial para determinados usos tecnológicos. A largura média das fibras foi de 19,51 µm, enquanto o diâmetro médio do lume foi de 11,71 µm e a espessura média da parede celular de 3,90 µm (Tabela 7). Esses valores indicam fibras relativamente estreitas, com lume de tamanho intermediário e paredes celulares moderadamente espessas, características que influenciam diretamente propriedades como densidade, resistência mecânica e qualidade da madeira.

TABELA 7: Dados qualitativos de fibras da espécie.

Fibra	Comprimento (mm)	Largura (µm)	Diâmetro do lume (µm)	Espessura da parede (µm)
Média	4,03	19,51	11,71	3,90
Maior valor	92,00	24,87	14,99	4,94
Menor valor	0,75	15,43	8,07	3,08
Desvio padrão	16,62	2,28	1,90	0,44
Coeficiente de variação	11,98	11,69	16,22	11,32

4 Conclusão

A caracterização morfológica e anatômica das espécies amazônicas *Manilkara huberi* (maçaranduba), *Marlimorimia psilostachya* (timborana) e *Astronium lecointei* (muiracatiara) permitiu identificar características organolépticas e anatômicas, que contribuiu para a identificação das espécies e para a compreensão de suas propriedades tecnológicas. A maçaranduba destacou-se pela elevada resistência mecânica, a timborana pelas fibras muito longas e a muiracatiara pelo alto brilho e elevada dureza. Além disso, a análise microscópica complementou a caracterização macroscópica ao fornecer informações sobre poros, parênquima, fibras e elementos de vaso. Assim, conclui-se que a caracterização anatômica é uma ferramenta adicional para a identificação correta das madeiras, ampliando o conhecimento sobre as espécies nativas da Amazônia e auxiliando para seu aproveitamento tecnológico e sustentável.

Agradecimentos

Agradecimento ao Departamento de Engenharia Florestal (DEF) da Universidade Federal de Viçosa (UFV) e ao Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal (PPGCF/UFV). Agradeço a CAPES, CNPq e FAPEMIG, pelo apoio financeiro. Aos laboratórios (LAPEM), (LABRIF), (LCP) e (LPM) pela infraestrutura disponibilizada, pelo suporte técnico e científico e pela colaboração durante o desenvolvimento desta pesquisa.

Referência

ANDRADE, V. H. F.; MACHADO, S. A. M.; FIGUEIREDO FILHO, A.; BOTOSSO, P. C.; MIRANDA, B. P.; SCHÖNGART, J. Modelos de crescimento para duas espécies de árvores comerciais em florestas de terra firme do Sul da Amazônia Brasileira. Ecologia e Gestão Florestal, v. 438, p. 215-223, 2019.

FOELKEL. Chave de identificação de madeiras comerciais. São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT), 2007. Disponível em: Celso Foelkel – Chave de identificação de madeiras comerciais. Acesso em: 1 jul. 2026.

FORTINI, L. B. Modelos integrados mostram uma oportunidade transitória para o manejo sustentável por habitantes de florestas tropicais. Ecologia Florestal e Manejo, v. 438, p. 233-242, 2019.

FORTINI, L. B., & Carter, D. R. (2014). A viabilidade econômica da produção de madeira de pequenos agricultores sob a expansão da produção de açaí no Estuário Amazônico. Journal of Forest Economics, 20(3), 223–235.

FRANKLIN, G. Preparação de seções finas de resinas sintéticas e compósitos de madeira-resina, e um novo método de maceração para madeira. Nature 155 , 51 (1945). https://doi.org/10.1038/155051a0

IBAMA-Instituto Brasileiro Do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis. Normas parar procedimntos em estudos de anato mia de madeira: I.angiospermae, II.gimnospermae. Brasília: 19 p. (Série Técnica, 15), 1992.

REIS, A. R. S., P. C. M. REIS, A. T. O. BRANDÃO & P. L. B. LISBOA, 2011. Anatomia do xilema secundário de sete espécies do gênero Tachigali Aubl. (Fabaceae), disponíveis na Xiloteca Walter A. Egler, do Museu Paraense Emílio Goeldi, Pará, Brasil. Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi. Ciências Naturais 6(3): 319-333.

REIS, P.C.M.R., et al; Desempenho operacional no desdobro de espécies nativas em serrarias na Amazônia, Disponível em: https://ojs.brazilianjournals.com.br/ojs/index.php/BRJD/article/view/56004/41155. Acesso em: 1 jul. 2026.

RIBEIRO, R. B. S., Gama, J. R. V., & Melo, L. O. (2014). Análise seccional para determinação de volume e seleção de equações de volume para a Floresta Nacional do Tapajós. Cerne, 20(4), 605–612.

WALDHOFF, P., & Vidal, E. (2015). Loggers comunitários tentando legalizar a exploração madeireira tradicional na Amazônia brasileira: Um caminho sem fim. Política e Economia Florestal, 50, 311–318.

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Caracterização anatômica quantitativa do lenho de *Robinia pseudoacacia* e *Fagus sylvatica* por microscopia de luz e análise de imagem

Kamilly da Silva Pereira[1]; Tatiana de Fátima Martins Pires[1]; Felipe Gabriel Santos Araújo[1]; Nédia Pereira Correia Mendes Correia[1]; Hemanuelly Ferreira Breda Lãn Oliveira[2]; Oxandra Roca Rivera[1]; Caroline Palacio de Araújo[1]; Djeison Cesar Batista[1]

[1]Universidade Federal do Espírito Santo, Departamento de Ciências Florestais e da Madeira, Jerônimo Monteiro, Brasil.

[2]Universidade Federal do Espírito Santo, Departamento de Engenharia Química, Alegre, Jerônimo Monteiro, Brasil.

Resumo: A anatomia da madeira constitui uma ferramenta essencial para compreender a relação entre estrutura, função e adaptação das espécies arbóreas, permitindo avaliar como características do xilema influenciam propriedades ecológicas e tecnológicas da madeira. Este estudo teve como objetivo caracterizar e comparar parâmetros anatômicos quantitativos do xilema secundário de *Robinia pseudoacacia* L. e *Fagus sylvatica* L., espécies com estratégias hidráulicas contrastantes. Para as análises foram utilizadas amostras de *R. pseudoacacia* (cerne) e *F. sylvatica* (alburno). Foram confeccionadas lâminas histológicas e macerados para mensuração de vasos, raios e fibras, seguindo as recomendações da IAWA. Os resultados evidenciaram diferenças na organização anatômica entre as espécies. *F. sylvatica* obteve vasos de menor diâmetro (59,20 µm) e maior frequência (135 vasos mm^{-2}), característica associada a uma estratégia hidráulica baseada em maior segurança na condução de água. Em contraste, *R. pseudoacacia* teve vasos amplos (241,92 µm) e baixa frequência (7 vasos mm^{-2}), indicando maior eficiência de condução hidráulica. As fibras de *R. pseudoacacia* foram mais longas (1178,12 µm) e apresentaram maior diâmetro de lume (9,96 µm), enquanto *F. sylvatica* destacou-se por fibras com maior espessura de parede (6,55 µm), sugerindo maior rigidez estrutural. As diferenças anatômicas observadas refletem estratégias ecológicas distintas e evidenciam a influência da arquitetura do xilema na funcionalidade e nas propriedades da madeira.

Palavras-chave: Anatomia da madeira; Fibras; Raios; Vasos; Xilema secundário.

Quantitative anatomical characterization of *Robinia pseudoacacia* and *Fagus sylvatica* wood using light microscopy and image analysis.

Abstract: Wood anatomy is an essential tool for understanding the relationship between the structure, function, and adaptation of tree species, enabling an assessment of how xylem characteristics influence the ecological and technological properties of wood. This study aimed to characterize and compare quantitative anatomical parameters of the secondary xylem of *Robinia pseudoacacia* L. and *Fagus sylvatica* L., species with contrasting hydraulic strategies. Samples of *R. pseudoacacia* (heartwood) and *F. sylvatica* (sapwood) were used for the analyses. Histological sections and macerations were prepared to measure vessels, rays, and fibers, following IAWA recommendations. The results revealed differences in anatomical organization between the species. *F. sylvatica* exhibited vessels with smaller diameters (59.20 µm) and higher frequency (135 vessels mm^{-2}), a characteristic associated with a hydraulic

strategy prioritizing safety in water conduction. In contrast, *R. pseudoacacia* had wide vessels (241.92 µm) and low frequency (7 vessels mm^{-2}), indicating greater hydraulic conduction efficiency. *R. pseudoacacia* fibers were longer (1178.12 µm) and had larger lumen diameters (9.96 µm), whereas *F. sylvatica* was characterized by fibers with greater wall thickness (6.55 µm), suggesting greater structural rigidity. The observed anatomical differences reflect distinct ecological strategies and highlight the influence of xylem architecture on wood functionality and properties.

Keywords: Wood anatomy; Fibers; Rays; Vessels; Secondary xylem.

1. Introdução

A microscopia óptica, há muito consolidada como ferramenta fundamental para o estudo da anatomia da madeira, permite a observação detalhada de elementos celulares como vasos, fibras e parênquima, bem como a mensuração de parâmetros quantitativos essenciais: diâmetro e frequência de vasos, dimensões de raios, comprimento e largura de fibras, diâmetro do lume e espessura da parede celular. Nesse contexto, a caracterização anatômica comparativa de espécies lenhosas com diferentes estratégias ecológicas é fundamental para compreender como a estrutura anatômica reflete nas adaptações ao ambiente e influencia propriedades tecnológicas e mecânicas da madeira.

Embora a anatomia de *Robinia pseudoacacia* L. e *Fagus sylvatica* L. tenha sido abordada em estudos prévios de maneira isolada, ainda é escassa na literatura uma análise comparativa direta que integre, sob uma mesma abordagem metodológica padronizada. Ambas de grande relevância ecológica e econômica, porém com tecidos lenhosos distintos, moldados por trajetórias evolutivas, fisiológicas e ambientais específicas (Younis et al., 2025). A comparação entre essas espécies possibilita compreender como diferenças na organização anatômica da madeira podem estar associadas às estratégias de crescimento, resistência e adaptação às condições ambientais, contribuindo para uma visão mais ampla sobre a relação entre estrutura e função no xilema.

A *R. pseudoacacia*, nativa do leste da América do Norte e introduzida na Europa em 1601 (Younis et al., 2025), é uma espécie de porosidade anelar (*ring-porous*), caracterizada por vasos de grande diâmetro formados no início da estação de crescimento, o que confere à sua madeira uma estrutura marcadamente heterogênea entre o lenho inicial e o lenho tardio (Miodek et al., 2025). Sua anatomia vascular é altamente responsiva a fatores ambientais, como disponibilidade de luz, água e nutrientes, que influenciam diretamente o diâmetro e a frequência dos vasos, além de apresentar pontuações vestigiais (*vestured pits*) nas células do xilema, uma

característica observada detalhadamente por microscopia eletrônica (Šilhán; Ružek, 2023). Essa plasticidade anatômica contribui para sua adaptabilidade e influencia sua eficiência hidráulica e resistência à seca (Pereira, 2025).

Em contraste, a *F. sylvatica*, espécie nativa da Europa, que pode atingir alturas de 30 a 40 metros, é amplamente valorizada por sua madeira resistente e de acabamento refinado. Trata-se de uma espécie de porosidade difusa, cuja estrutura anatômica é mais homogênea ao longo do anel de crescimento, com vasos de diâmetro relativamente uniforme distribuídos por todo o lenho (Huang et al., 2025). Estudos recentes demonstram que a formação do xilema e a anatomia da madeira de *F. sylvatica* estão intimamente ligadas à disponibilidade de umidade e à temperatura, sendo que condições secas e quentes afetam as características do xilema de maneiras distintas conforme o momento em que ocorrem em relação à formação do lenho (Tsalagkas et al., 2024). Essa sensibilidade climática torna a espécie um valioso indicador das respostas das florestas temperadas às mudanças ambientais.

Diante do exposto, o presente estudo tem como objetivo caracterizar e comparar os parâmetros anatômicos quantitativos do xilema secundário de *Robinia pseudoacacia* e *Fagus sylvatica*.

2. Material e métodos

2.1 Obtenção do material

O material utilizado para estudo foi proveniente da Alemanha, do projeto “International joint field trial on the moisture performance of wood” (Brischke et al., 2024). Para as análises dos parâmetros anatômicos foram confeccionadas amostras das espécies *Fagus sylvatica* (alburno) e *Robinia pseudoacacia* (cerne) com dimensões de 1,0x1,5x2,0 cm, nas direções radiais, tangenciais e longitudinais, respectivamente, para confecção de lâminas histológicas e macerado (Figura 1).

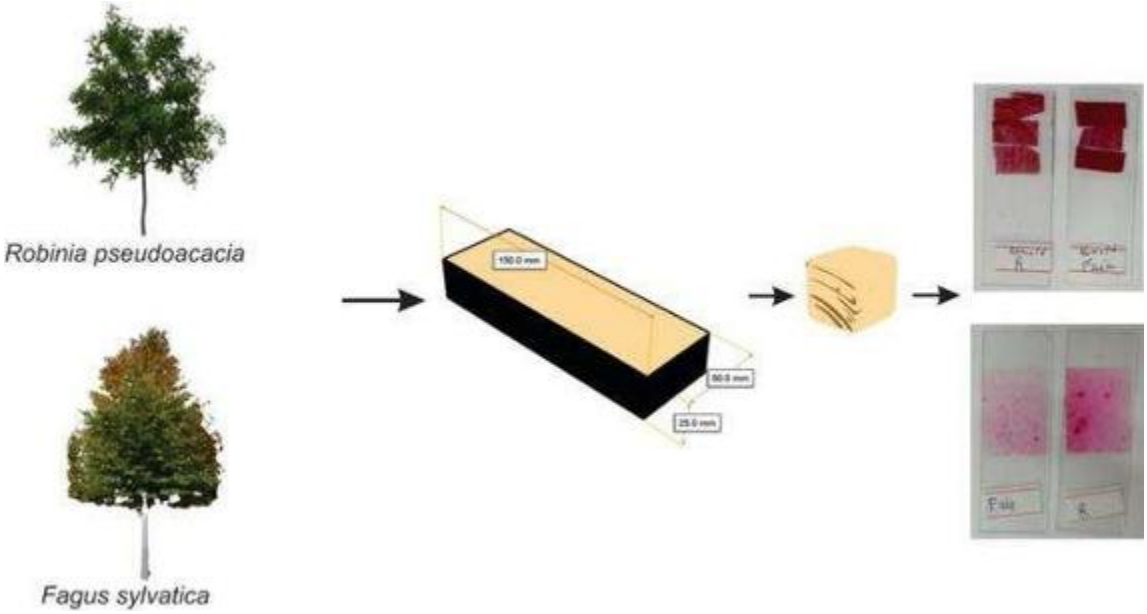


Figura 1 - Amostragem da madeira para a avaliação anatômica.

2.2 Análises anatômicas do material

Para as análises de fibras, a partir dos corpos-de-prova foi realizado o processo de maceração para retirada de pequenos “palitos” da madeira no plano radial. Após retirar os palitos foram dispostos em frascos com 25 mL, em solução de ácido acético e peróxido de hidrogênio (1:1). Posteriormente os frascos foram levados para estufa em temperatura de 60° C, por 48 horas, conforme metodologia proposta por Nicholls e Dadswell, retratado por Ramalho (1987). Após 48 horas a solução foi retirada e o material foi colorido com safranina. As lâminas foram preparadas com auxílio de pinça e colocada sobre a lâmina com glicerina de modo que evitasse a sobreposição do material. Com auxílio do microscópio Zeiss foram realizadas 25 medições de comprimento, largura e diâmetro do lume. A espessura da parede (EP) foi obtida pela diferença entre a largura da fibra (LF) e o diâmetro do lume (DL) dividido por 2.

Para obtenção dos cortes histológicos as amostras foram amolecidas em água à ebulição e em seguida com auxílio de um micrótomo de deslize realizado a obtenção de cortes de espessura médias de 20 µm dos planos transversal, tangencial e radial. Para análises de vasos, do corte transversal foram montados cortes em lâminas histológicas temporárias, com uso de glicerina e água. Com auxílio do microscópio Zeiss, foram retiradas 25 fotomicrografias de cada tratamento para realização de medição de diâmetro e contagem de frequência de vasos conforme as normas da IAWA (1989).

Para análises de raios do corte tangencial foram feitas lâminas histológicas temporárias com glicerina e água. Para análise de raios foram realizadas 25 medições de comprimento, largura e contagem da frequência conforme as normas da IAWA (1989). Para *F. sylvatica* os menores raios foram medidos em microscópio em objetiva de 10x, enquanto os raios maiores foram medidos em microscópio em objetiva de 5x.

3. Resultados e discussão

A análise quantitativa da anatomia do xilema (Tabela 1) evidenciou diferenças entre *Fagus sylvatica* e *Robinia pseudoacacia*. Enquanto *F. sylvatica* teve vasos de diâmetro reduzido (59,20 µm) e elevada frequência (135 vasos.mm^{-2}), *R. pseudoacacia* distinguiu-se por vasos amplos (241,92 µm) e baixa densidade (7 vasos.mm^{-2}), o que sugere estratégias hidráulicas e mecanismos de condução contrastantes entre as duas espécies. Ademais, *R. pseudoacacia* não exibiu raios multisseriados, diferentemente de *F. sylvatica*, que obteve raios (geralmente unisseriados) com largura média de 50,27 µm e frequência de 4 raios.mm^{-2}.

Tabela 1 – Dimensões e frequências médias dos elementos anatômicos da madeira de *Fagus sylvatica* e *Robinia pseudoacacia*.

Parâmetros anatômicos	*Fagus sylvatica*	*Robinia pseudoacacia*
Diâmetro de Vasos (µm)	59,20	241,92
Frequência de Vasos (n°.mm^{-2})	135	7
Altura de Raio* (µm)	2215.98	-
Largura de Raio** (µm)	186,51	-
Altura de Raio (µm)	313,62	317,85
Largura de Raio (µm)	31,89	50,27
Frequência de Raio (n°.mm^{-2})	6	4
Comprimento de Fibra (µm)	1063,17	1178,12
Largura de Fibra (µm)	19,66	20,44
Diâmetro do Lume (µm)	6,57	9,96
Espessura da Parede da Fibra (µm)	6,55	5,24

* altura de raios maiores de 1000 µm. **largura de raios maiores que 100 µm.

Na espécie *R. pseudoacacia*, o diâmetro vascular registrado (241,92 µm) supera as amplitudes previamente relatadas para populações húngaras (70–140 µm para a madeira tardia)

e gregas (24 µm) (Younis et al., 2023), sugerindo forte plasticidade fenotípica modulada pelas condições edafoclimáticas, pela origem do material amostrado ou pelo estágio de desenvolvimento do órgão analisado, conforme Page (1993).

As fibras de *R. pseudoacacia* tiveram o comprimento e largura médios de 1.178,12 µm e 20,44 µm, respectivamente, aliados a um diâmetro do lume de 9,96 µm e espessura de parede de 5,24 µm (Figura 2). A partir desses valores, calculou-se a razão espessura da parede/diâmetro do lúmen em 0,53 e a razão comprimento/largura em aproximadamente 57,6, corroborando com os critérios estabelecidos por Fangrong et al. (2010) para a espécie (razão parede/lume < 1 e razão comprimento/largura > 45 em espécimes de 2 a 4 anos). Esses índices refletem fibras relativamente flexíveis e alongadas, típicas de estágios ontogenéticos específicos, visto que Fangrong et al. (2010) demonstraram que tais dimensões variam com a idade do povoamento, sendo árvores de três anos as que exibem as fibras mais longas, mais largas e com paredes mais espessas.

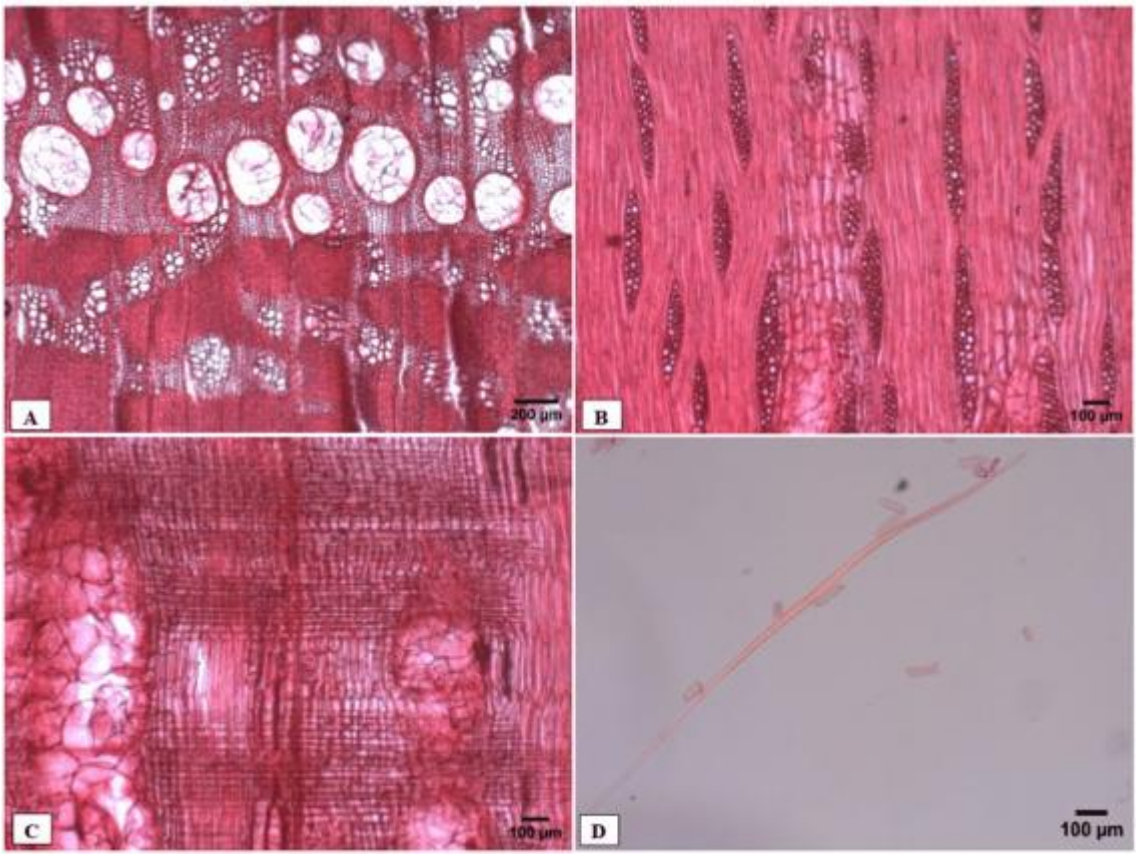


Figura 2 - Fotomicrografia de vasos no plano transversal (A); Fotomicrografia dos raios no plano tangencial (B); Fotomicrografia dos raios no plano radial (C) e Fotomicrografia da fibra (D) da espécie *R. pseudoacacia*.

Em contraste, *F. sylvatica* apresentou fibras com paredes mais espessas (6,55 µm) e lume mais restrito (6,57 µm), resultando em uma razão parede/lume de aproximadamente 1,0, o que sugere maior rigidez mecânica e menor flexibilidade relativa quando comparada à *R. pseudoacacia* (Figura 3).

Quanto às relações quantitativas das fibras, os dados obtidos para *R. pseudoacacia* reforçam que a razão entre a espessura da parede e o diâmetro do lúmen é consistentemente inferior a 1, enquanto a razão entre comprimento e largura ultrapassa 45, alinhando-se aos achados de Fangrong et al. (2010). Embora a proporção de tecido parenquimático não tenha sido mensurada neste estudo, sabe-se que esta é dinâmica e dependente da densidade básica da madeira (Fangrong et al., 2010), sugerindo que futuras análises integrando essas variáveis poderiam elucidar relações funcionais mais profundas entre a arquitetura anatômica e as propriedades físicas e mecânicas da madeira de *R. pseudoacacia* em comparação a *F. sylvatica*.

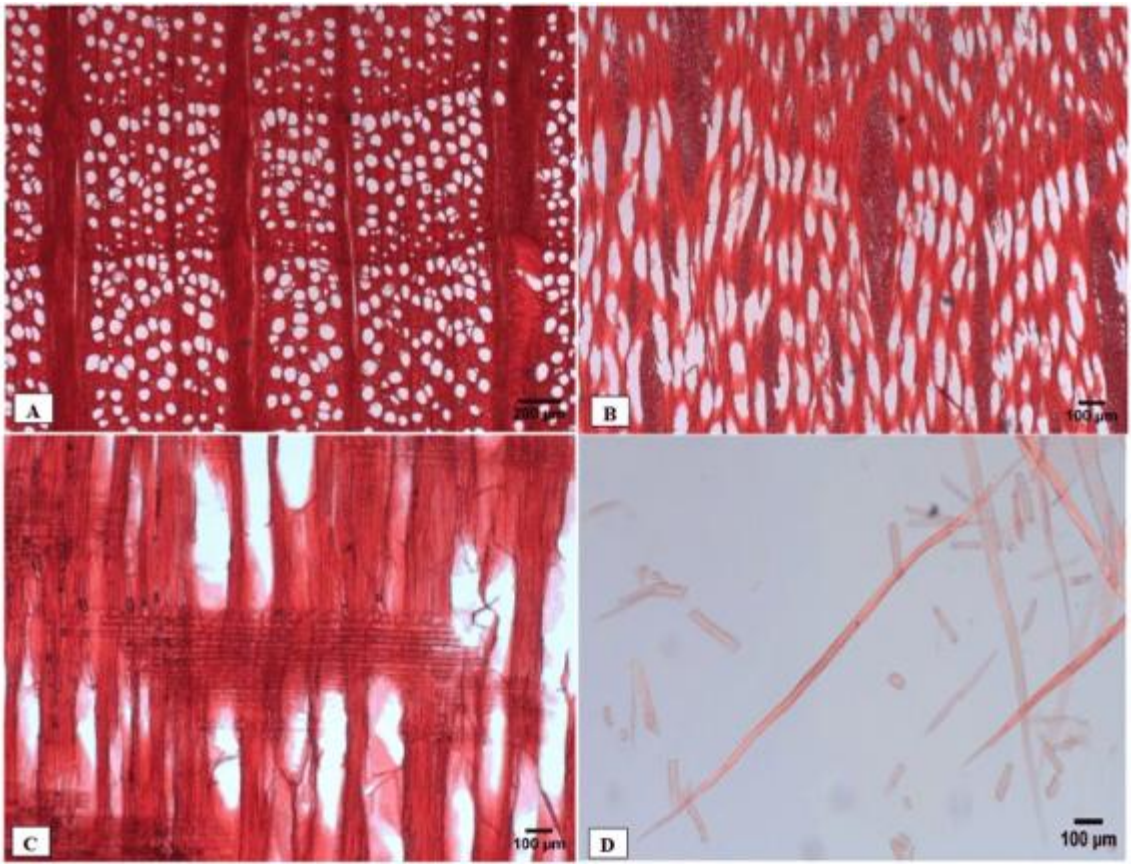


Figura 3 - Fotomicrografia de vasos no plano transversal (A); Fotomicrografia dos raios no plano tangencial (B); Fotomicrografia dos raios no plano radial (C) e Fotomicrografia da fibra (D) da espécie *F. sylvatica*.

4. Conclusões

A análise comparativa da anatomia do xilema de *Robinia pseudoacacia* e *Fagus sylvatica* apresentou contrastes estruturais marcantes que refletem distintas estratégias ecológicas e funcionais.

R. pseudoacacia, de porosidade anelar, com vasos amplos e em baixa frequência, fibras mais longas com lume maior e parede mais fina, conferindo maior flexibilidade e eficiência hidráulica, compatível com sua elevada plasticidade adaptativa. Em oposição, *F. sylvatica*, de porosidade difusa, vasos numerosos e de diâmetro reduzido, fibras com lume restrito e parede espessa, sugerindo maior rigidez mecânica e uma estratégia de condução mais conservadora.

As diferenças na estrutura dos raios, com *F. sylvatica* apresentando raios multisseriados e *R. pseudoacacia* apenas unisseriados, também evidenciam particularidades no armazenamento e na condução radial.

5. Referências bibliográficas

American Society for Testing and Materials. (2020). ASTM D4442-20: Standard test methods for direct moisture content measurement of wood and wood-based materials. ASTM International.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2003). NBR 14929: Madeira: Determinação da umidade da madeira. Associação Brasileira de Normas Técnicas.

Brischke, C., et al. (2024). International joint field trial on the moisture performance of wood – Set up and first results. Em IRG55 Scientific Conference on Wood Protection. The International Research Group on Wood Protection.

Dias, J. M. S., Oliveira Filho, F. M., Araujo, A. Y. F., César, S. F., & Cunha, R. D. A. (2018). Avaliação comparativa entre métodos de aferição do teor de umidade em peças de madeira de dimensões reduzidas. Em Anais do XXII Encontro Latino Americano de Iniciação Científica, XVIII Encontro Latino Americano de Pós-Graduação e VIII Encontro de Iniciação à Docência. Universidade do Vale do Paraíba.

Donato, D. B., Castro, R. V. O., Carneiro, A. C. O., Carvalho, A. M. M. L., Pereira, B. L. C., Oliveira, A. C., & Barbosa, C. J. (2014). Determinação da umidade da madeira em tora por

diferentes métodos. Pesquisa Florestal Brasileira, 34(80), 449–453. https://doi.org/10.4336/2014.pfb.34.80.608

Gann. (2007). GANN Hydromette H 35 + HT 65: Instruções de uso. https://www.gann.de/en/products/handhelds/electronic-moisture-meters/classic-series/ht-65

Huang, W., Lundqvist, S., & Thygesen, L. G. (2025). Effects of climate variability on secondary xylem formation and anatomy in Fagus sylvatica trees grown in Denmark. Botany Letters, 172(1), 87–100. https://doi.org/10.1080/23818107.2024.2426124

Miodek, A., Miodek, A. P., & Kojs, P. (2025). Robinia pseudoacacia wood fiber bodies increase their cross-sectional surface area without cell wall expansion. Wood Science and Technology, 59, 67. https://doi.org/10.1007/s00226-025-01669-z

Page, V. M. (1993). Anatomical variation in the wood of Robinia pseudoacacia L. and the identity of Miocene fossil woods from the southwestern United States. IAWA Journal, 14(3), 299–314. https://doi.org/10.1163/22941932-90001333

Pereira, K. S. (2025). Desempenho colorimétrico da madeira de espécies de clima temperado ao intemperismo em clima tropical (Dissertação de mestrado). Universidade Federal do Espírito Santo.

Rodrigues, W. (1999). Determinação do teor de umidade em madeiras por meio de medidores elétricos (Dissertação de mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

Šilhán, K., & Ružek, I. (2023). The tree-ring anatomy of Robinia pseudoacacia L. as a data source for dendrogeomorphic reconstruction of past landslide movements in the landslide hot-spot of central Europe. Catena, 221, 106790. https://doi.org/10.1016/j.catena.2022.106790

Tsalagkas, D., et al. (2024). Age-related phenological and anatomical response of European beech (*Fagus sylvatica* L.) under severe summer drought conditions. *Journal of Forest Science, 70*(9), 458–475.

Yang, F., Li, M., Yuan, T., & Ma, L. (2010). Study on the morphology of wood fibers in young stands of shrubs of Robinia pseudoacacia. Journal of Henan Agricultural University, 44(6), 649–651. https://doi.org/10.16445/j.cnki.1000-2340.2010.06.016

Younis, F. A. A. A., Báder, M., Bak, M., & Németh, R. (2025). Within-tree variability of fibers, vessels, and ring width in Robinia pseudoacacia L. wood: A case study in Hungary. Forests, 16(5), 807. https://doi.org/10.3390/f16050807

Younis, F. A. A. A., Govina, J. K., Seidu, H., & Németh, R. (2023). Basic characteristics of black locust (Robinia pseudoacacia L.) wood grown under different site conditions: A review. Acta Silvatica & Lignaria Hungarica, 19(1), 21–35. https://doi.org/10.37045/aslh-2023-0002

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Caracterização das propriedades físicas de galhos de *Apeiba tibourbou* AUBL.

Frances Alves Andrade[1]; Beatriz Elis de Souza Carlos[1]; Larissa de Medeiros Araújo[1]; Rafael Leite Braz[1]; Suzana Henrique Lopes da Silva[1]; Helena Cristina Vieira[1]

[1] Universidade Federal Rural de Pernambuco

Resumo: A madeira de *Apeiba tibourbou* Aubl. é tradicionalmente utilizada em embarcações leves devido à sua baixa densidade e elevada flutuabilidade, embora as informações sejam limitadas sobre os materiais oriundos de podas de galhos. O estudo avaliou as variações dimensionais da madeira de galhos de *A. tibourbou* oriundos de podas em Recife-PE. Foram analisadas 30 amostras de três indivíduos, comparando os métodos de imersão e estereométrico para determinação da densidade básica. A densidade básica (0,11 a 0,14 g cm^{-3}) classificou a madeira como muito leve. As contrações lineares variaram de 2,29% a 4,91%, com contração volumétrica máxima de 7,74%. Os coeficientes de anisotropia (1,25 e 1,90) indicaram comportamento dimensional estável a normal. Os resultados demonstram que a madeira de galhos apresenta densidade e retratibilidade inferiores às do fuste registrado na literatura. Conclui-se que o material possui potencial para aplicações que demandem materiais leves e dimensionalmente estáveis, como artesanato e isolamento térmico.

Palavras-chave: Flutuabilidade; Madeira; Retratibilidade.

Characterization of the physical properties of *Apeiba tibourbou* (AUBL) branches

Abstract: The wood of *Apeiba tibourbou* Aubl. is traditionally used in lightweight vessels due to its low density and high buoyancy; however, information regarding materials derived from branch prunings is still limited. This study evaluated the dimensional variations of *A. tibourbou* branch wood from prunings in Recife-PE. Thirty samples from three individuals were analyzed, comparing immersion and stereometric methods. The basic density (0.11 to 0.14 g cm^{-3}) classified the wood as very light. Linear shrinkage ranged between 2.29% and 4.91%, with a maximum volumetric shrinkage of 7.74%. Anisotropy coefficients (1.25 and 1.90) indicated stable to normal dimensional behavior. The results demonstrate that branch wood has lower density and shrinkage than the values for the stem recorded in the literature. It is concluded that the material has potential for applications requiring lightweight and stable materials, such as handicrafts and insulation.

Keywords: Buoyancy; Wood; Retractability.

1. Introdução

A madeira é uma estrutura biológica complexa, resultante dos diversos compostos químicos e tipos celulares, apresentando alta versatilidade abrangendo diversos segmentos como energia, construção civil, transporte e design decorativo. Entretanto, por ser um material heterogêneo e variável entre espécies e indivíduos, seu aproveitamento tecnológico exige o entendimento da sua natureza higroscópica, porosa e anisotrópica (Araujo, 2020; Carvalho et al., 2015; Ross, 2021; Portal-Cahuana et al., 2025). Nesse sentido, o material pode sofrer contração ou expansão ao longo do tempo em resposta às condições de umidade do ambiente, afetando sua estabilidade dimensional e a qualidade final do produto processado (Ferreira et al., 2019; Tong et al., 2023).

Sua capacidade de absorver ou perder água para o ambiente pode favorecer o surgimento de defeitos, como rachaduras e deformações, principalmente associados aos processos de secagem. A secagem é uma etapa crucial que afeta diretamente a qualidade final do produto, garantindo a durabilidade e estabilidade mecânica do produto, quando esta é realizada inadequadamente pode provocar tensões internas comprometendo a sua utilização (Ferreira et al., 2019; Ross, 2021).

A escolha tecnológica da madeira na construção de embarcações tem forte ligação com o conhecimento tradicional, que prioriza espécies com baixa densidade, flexibilidade, retilineidade e resistência a organismos xilófagos, fatores esses que contribuem para a redução do peso da embarcação, do esforço de propulsão, além de aumentar a vida útil e a durabilidade natural (Andrade et al., 2018; Rios et al., 2019).

No Nordeste brasileiro, madeiras de baixa densidade e alta flutuabilidade como a *Apeiba tibourbou* Aubl. (família Malvaceae) esteve historicamente associada à construção de embarcações tradicionais, como jangadas e “embonos” – estruturas fixadas externamente nas embarcações para aumentar a estabilidade na navegação (Licht, 1986; Lins Júnior, 2015). Na Amazônia peruana, a espécie também é usada tradicionalmente para fabricar barcos, brinquedos e embalagens leves devido às características de sua madeira leve e macia (Portal-Cahuana et al., 2025).

A. tibourbou apresenta ampla distribuição ecológica, ocorrendo desde o Cerrado a Floresta de Terra Firme (Colli-Silva, 2026). Estudos indicam que sua madeira apresenta baixa densidade básica variando entre 0,18 e 0,40 $g \cdot cm^{-3}$, além de elevada capacidade de flutuação (Carvalho, 2010; Rocha, 2024; Portal-Cahuana et al., 2025).

Dentre as 21 espécies conhecidas por comunidades de pescadores artesanais da Bahia, Brasil, a *A. tibourbou* destacou-se como principal matéria-prima para construção de

embarcações e ferramentas de pesca, sendo uma escolha praticamente insubstituível para garantir a flutuabilidade e segurança dos jangadeiros no mar (Andrade et al., 2018).

Apesar desse uso tradicional consolidado, ainda há lacunas de dados experimentais sobre sua variação dimensional e métodos de estimativa de densidade. Notadamente, a *A. tibourbou* é uma espécie cujo potencial comercial ainda é limitado devido à falta desse conhecimento, principalmente sobre seu comportamento durante a secagem (Portal-Cahuana et al., 2025). Agregado a isso, é fundamental ressaltar a importância da identificação e do uso de espécies nativas para as comunidades locais, evitando enganos no comércio e a exploração ilegal de madeiras ameaçadas. Além disso, a escassez de recursos florestais e as restrições legais ao corte de fustes resultam em um processo de erosão cultural nas comunidades que dependem desse material para o desenvolvimento de suas atividades cotidianas (Andrade et al., 2018; Silva et al., 2023).

Nesse sentido, o presente trabalho teve como objetivo caracterizar as propriedades físicas da madeira proveniente de podas de galhos de *A. tibourbou*, bem como comparar estimativas de densidade obtidas pelos métodos do paquímetro e da balança hidrostática.

2. Material e métodos

As amostras de *A. tibourbou* foram obtidas no Parque Estadual de Dois Irmãos, Recife, Pernambuco, Brasil (8°07'30"S; 34°52'30"W), provenientes de podas de três indivíduos da espécie e processadas no Laboratório de Tecnologia e Anatomia da Madeira (LABTAM) do Departamento de Ciências Florestais da Universidade Federal Rural do Pernambuco (UFRPE).

Foram confeccionados 10 corpos de prova para cada indivíduo, totalizando 30 amostras, com dimensões de 2 cm x 3 cm x 5 cm (Figura 1) nas direções tangencial, radial e longitudinal, respectivamente.

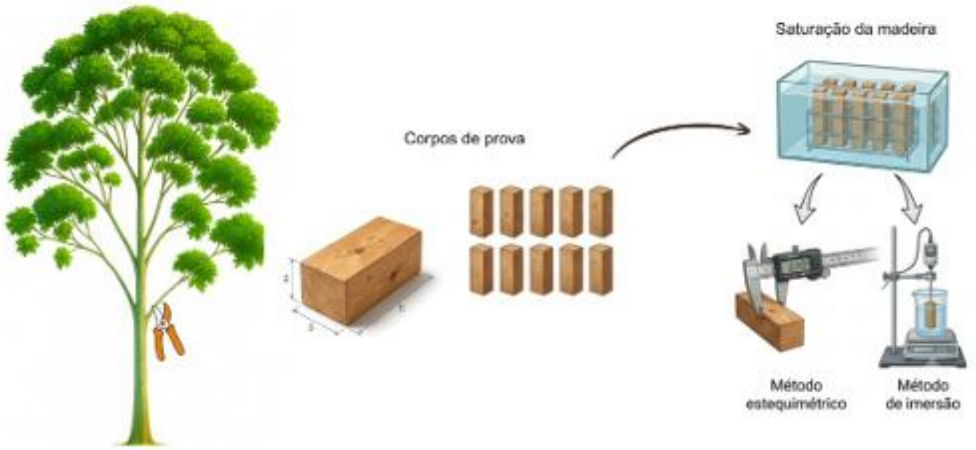


Figura 1 – Esquema metodológico para avaliação de propriedades físicas da madeira.
Fonte: Elaborada pelos autores com auxílio do ChatGPT (OpenAI, 2026).

A determinação da densidade básica pelos métodos de imersão e estereométrico, utilizando balança hidrostática e paquímetro, respectivamente, seguiu as recomendações das normas NBR 7190 (ABNT, 2022) e NBR 11941 (ABNT, 2003), utilizando a massa seca a 103 ºC e volume saturado. Os ensaios de retratibilidade e os índices de anisotropia seguindo as recomendações e diretrizes da normativa ASTM D143-94.

Para fins de análise, a densidade básica determinada pelo método de imersão foi denominada DBbh, enquanto a densidade obtida pelo método estereométrico foi denominada Dpaq.

A análise estatística dos dados foi realizada inicialmente por meio de estatística descritiva, com determinação dos valores médios, desvio-padrão, coeficiente de variação, valores mínimos e máximos para todas as variáveis avaliadas. Posteriormente, por não atenderem aos pressupostos de normalidade, os dados de densidade foram avaliados pelo teste de Kruskal-Wallis ao nível de 5% de probabilidade, com o objetivo de verificar a existência de diferenças significativas entre os métodos avaliados.

3. Resultados e discussão

A densidade da madeira de *A. tibourbou* obtida pelos métodos de imersão e estereométrico está apresentada na Tabela 1. Foi observada variação de densidade básica entre os indivíduos, com o indivíduo 2 apresentando maiores valores médios para as densidades, de 0,14 g.cm^{-3}, e o indivíduo 1, as menores, de 0,11 e 0,12 g.cm^{-3}. A análise estatística indica que as médias de densidade (0,13 g.cm^{-3}) foram estatisticamente iguais para ambos os métodos ($p > 0,05$), sendo classificados como muito leve por apresentar uma densidade abaixo de 0,40 g.cm^{-3} (INDEA, 2011).

Tabela 1 – Valores da densidade básica da madeira de *A. tibourbou* determinados pelos métodos de imersão e estereométrico

Variável	Indivíduo	Média	DP	Mínimo	Máximo	CV (%)
ρ (g.cm-³) imersão	1	0,12	0,01	0,10	0,14	9,12
	2	0,14	0,01	0,12	0,16	8,16
	3	0,13	0,02	0,11	0,19	19,98
Média		0,13*				
ρ (g.cm-³) estereométrico	1	0,11	0,01	0,10	0,14	8,73
	2	0,14	0,01	0,12	0,15	7,36

	3	0,13	0,03	0,11	0,19	20,12
Média		0,13*				

*Representa médias estatisticamente iguais de acordo com o teste de Kruskal-Wallis.

A variação dos valores obtidos pela densidade sugere a existência de variabilidade intrínseca entre indivíduos da mesma população, possivelmente relacionada a fatores genéticos, fisiológicos e às condições de crescimento. Os resultados obtidos pelos métodos de imersão e estereométrico foram iguais, evidenciando consistência entre as metodologias empregadas.

Esse resultado é de grande interesse prático, já que os métodos possuem tempos de execução e custos operacionais distintos. O método estereométrico utilizando o paquímetro é consideravelmente mais rápido, além de não ser necessário o uso da balança hidrostática. Enquanto o método de imersão apesar de ser mais demorado, é reconhecido por sua precisão em amostras que podem apresentar pequenas irregularidades. Nesse sentido, o observado na estatística, permite uma tomada de decisão conforme a disponibilidade de equipamentos, o custo ou a rapidez desejada.

Os valores de densidade básica obtidos neste estudo para *Apeiba tibourbou* foram inferiores aos relatados na literatura entre 0,29 a 0,30 g.cm^{-3} para a madeira do tronco (Lobão et al., 2011; Rosales-Solórzano, 2019), 0,35 g.cm^{-3} em árvores provenientes da Amazônia brasileira (Farias et al. 2020) e 0,30 g.cm^{-3} na Amazônia peruana (Portal-Cahuana et al., 2025). Os resultados obtido neste estudo para o indivíduo 1 (0,11 g.cm^{-3} e 0,12 g.cm^{-3}) são inferiores à madeira de balsa, considerada a mais leve do mundo (Moreschi, 2014).

Os menores valores de densidade podem estar associadas às diferenças funcionais entre os galhos e o fuste da árvore. Em materiais jovens ou provenientes de ramos, é comum a ocorrência de maior proporção de tecido parenquimático, menor espessura da parede celular e maior participação relativa de tecidos associados à condução e ao crescimento. Além disso, o material de poda pode indicar a presença de galhos com menor grau de lignificação e menor proporção de tecido mecânico, o que justifica os baixos valores de densidade observados neste estudo.

Os valores máximos de contração e inchamento volumétrico, bem como os índices de anisotropia são apresentados na Tabela 2. O indivíduo 3 apresentou maior valor para inchamento volumétrico (8,39%), enquanto o indivíduo 2 apresentou o menor valor (6,24%). Os valores médios de contrações lineares se encontram na faixa de 2,29% a 4,91%, enquanto a contração volumétrica não ultrapassou 7,74%. Os valores de anisotropia de contração e inchamento se encontram entre 1,2 e 1,9.

Tabela 2 – Valores de contração, inchamento, contração e inchamento máximo volumétrico, anisotropia de contração e inchamento

	Contração β		Inchamento α					
Indivíduos	**Rad**	**Tang**	**Rad**	**Tang**	**βV (%)**	**α V (%)**	**Ca β**	**Caα**
1	2,93	3,67	3,02	3,81	6,83	7,34	1,25	1,26
2	2,29	3,52	2,35	3,65	5,87	6,24	1,53	1,55
3	2,58	4,91	2,65	5,16	7,74	8,39	1,90	1,94
Média Geral	**2,60**	**4,03**	**2,67**	**4,21**	**6,81**	**7,32**	**1,56**	**1,58**

Os valores médios de contrações lineares obtidos situam-se na faixa de 2,3% e 4,9%, enquanto a contração volumétrica não ultrapassou 7,74%. Observa-se que esses resultados são significativamente inferiores às encontradas na literatura para a madeira do tronco, de 10,67% (Portal-Cahuana et al., 2025) e de 13,44% (Lobão et al., 2011). Essa diferença pode estar relacionada à origem do material. Em comparação à madeira do fuste, a madeira proveniente de galhos pode apresentar diferenças anatômicas, como menor densidade, menor proporção de parede celular e maior volume de lúmens. Como a retração ocorre principalmente na parede celular durante a perda de água abaixo do ponto de saturação das fibras, uma menor fração de parede celular por unidade de volume tende a reduzir a magnitude da contração, resultando em comportamento distinto durante a secagem e o processamento da madeira (Kiaei & Moya, 2015).

Em relação a anisotropia de contração, os indivíduos 1 e 2 foram classificados como estabilidade excelente (1,2 a 1,5), enquanto o indivíduo 3 foi considerado na classe de madeiras normais (1,6 a 1,9), conforme os critérios de Moreschi (2014). Os valores obtidos neste estudo classificam a *A. tibourbou* como uma madeira estável durante o processo de secagem, sugerindo potencial para aplicações em que baixa densidade e estabilidade dimensional sejam requisitos relevantes, mas a indicação de usos específicos depende de ensaios mecânicos, durabilidade e trabalhabilidade (Portal-Cahuana et al., 2025).

4. Conclusões

Os galhos provenientes do pau-de-jangada (*Apeiba tibourbou*) se caracterizam como um material que se distingue das propriedades do fuste, considerado um material de densidade muito leve. Embora os valores da retratibilidade estejam bem abaixo dos encontrados na

literatura, a madeira demonstrou um comportamento estável a normal, com o coeficiente de anisotropia variando entre 1,25 e 1,90.

Nesse sentido, sugere-se que os resíduos de podas e galhos de indivíduos possam ser transformados em produtos que atendam as especificações de leveza e facilidade de processamento, como aqueles aplicados em artesanatos, bóias de rede e isolamento térmico, ampliando a alternativa de usos nos mercados de madeiras leves onde essa espécie é encontrada.

5. Agradecimentos

Os autores agradecem à Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE), ao Parque Estadual de Dois Irmãos e ao LABTAM pelo suporte institucional, às agências de fomento, CNPq e à CAPES, pelo auxílio financeiro, e a todos os colaboradores e orientadores que contribuíram tecnicamente.

6. Referências bibliográficas

Andrade, I. L. M. M., Mielke, M. S., Peroni, N., & Schiavetti, A. (2018). Fishermen do more than fish: local ecological knowledge of raftsmen about the arboreal species used to construct rafts (Bahia, Brazil). *Journal of Ethnobiology and Ethnomedicine* 14(1), Article 80. https://doi.org/10.1186/s13002-018-0279-7

Araujo, H. J. B. (2020). Caracterização do material madeira. Em G. Seabra (Org.), *Educação ambiental: O desenvolvimento sustentável na economia globalizada* (pp. 31–44). Barlavento. https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/bitstream/doc/1120281/1/26971.pdf

Associação Brasileira de Normas Técnicas. (1997). *Projeto de estruturas de madeira - Parte 1: Critérios de dimensionamento.* (ABNT NBR 7190-1:1997)

Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2003). *Madeira - determinação da densidade básica.* (ABNT NBR 11941:2003)

ASTM International. (2000). *Standard test methods for small clear specimens of timber.* (ASTM D143-94(2000)e1).

Carvalho, D. E., Santini, E. J., Vivian, M. A., Freitas, D. L., & Azambuja, R. da R. (2015). Variação dimensional da madeira tratada de *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus cloeziana*. *Scientia Agraria Paranaensis*, 14(3), 178–182. DOI: 10.18188/1983-1471/sap.v14n3p178-182

Carvalho, P. E. R. (2010). Pau-de-jangada: *Apeiba tibourbou*. Em P. E. R. Carvalho, *Espécies arbóreas brasileiras* (Vol. 4, pp. 411–418). Embrapa Informação Tecnológica; Embrapa Florestas. https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1140047/pau-de-jangada-apeiba-tibourbou?utm_source

Colli-Silva, M. (2026). *Apeiba*. Flora e Funga do Brasil. Jardim Botânico do Rio de Janeiro. https://floradobrasil.jbrj.gov.br/FB9006

Farias, H. L. S., Silva, W. R., Perdiz, R. D. O., Citó, A. C., Carvalho, L. C. D. S., & Barbosa, R. I. (2020). Dataset of wood density of trees in ecotone forests in northern Brazil Amazon. *Data in Brief*, 30, Article 105378. https://doi.org/10.1016/j.dib.2020.105378

Ferreira, M. D., Melo, R. R. D., Zaque, L. A. M., & Stangerlin, D. M. (2019). Propriedades físicas e mecânicas da madeira de angelim-pedra submetida a tratamento térmico. *Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração*, 16(1), 3–7. http://dx.doi.org/10.4322/2176-1523.20191297

Instituto de Defesa Agropecuária do Estado de Mato Grosso. (2011). *Noções básicas de anatomia e identificação macroscópica de madeiras* (p. 12).

Kiaei, M., & Moya, R. (2015). Physical properties and fiber dimension in stem, branch and root of alder wood. *Fresenius Environmental Bulletin*, 24(1B), 335–342. https://www.researchgate.net/publication/279323746

Licht, H. (1986). *O remo através dos tempos*. CORAG. https://www.remobrasil.com/attachments/article/122/2008_o_remo_atraves_dos_tempos_2a_edicao.PDF

Lins Júnior, H. M. M. (2015). *Arqueologia marítima: a evolução da canoa monóxila em Pernambuco, Brasil (séc. XVI-XX)* (Dissertação de mestrado). Universidade Federal de Pernambuco. https://www.repositorio.ufpe.br/handle/123456789/15320

Lobão, M. S., Castro, V. R. D., Rangel, A., Sarto, C., Tomazello Filho, M., Silva Júnior, F. G., Camargo Neto, L., & Bermudez, M. A. R. C. (2011). Agrupamento de espécies por análises univariadas e multivariadas das características anatômica, física e química das suas madeiras. *Scientia Forestalis*, 39(92), 469–477. http://www.bibliotecaflorestal.ufv.br:80/handle/123456789/16394

Moreschi, J. C. (2014). *Propriedades tecnológicas da madeira* (4ª ed., atualização de setembro de 2014) [Apostila didática]. Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências Agrárias, Departamento de Engenharia e Tecnologia Florestal.

Portal-Cahuana, L. A., Hancco-Ccahuantico, W., Cardozo-Soarez, J., & Vela Da-Fonseca, M. (2025). Anatomical and physical study of the wood of *Apeiba tibourbou* and its behavior during air drying. *Forest Science and Technology*, 21(4), 406–421. https://doi.org/10.1080/21580103.2025.2527669

Rios, C., Sullasi, H. S. L., Lins Junior, H. M. M., & Santos, A. L. C. (2019). Proposta metodológica para a identificação de madeiras utilizadas na construção naval artesanal no Nordeste do Brasil. *FUMDHAMentos*, 16(1), 75–86.

Rocha, N. M. (2024). Seleção de matrizes de *Apeiba tibourbou* Aubl. em população ex situ. (Trabalho de conclusão de curso de graduação). Universidade Federal de Alagoas.

Rosales-Solórzano, E. R. (2019). Ecuaciones de niveles de humedad relacionada a la densidad básica de la madera de especies forestales tropicales en Madre de Dios, Perú. *Revista Forestal Mesoamericana Kurú*, 17(40), 33–43. https://doi.org/10.18845/rfmk.v17i40.4905

Ross, R. J. (Ed.). (2021). *Wood handbook: Wood as an engineering material* (General Technical Report FPL–GTR–282). U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory.

Silva, J. V. M., Jesus, C. C., & Valle, M. L. A. (2023). Macroscopic anatomy and basic density of the wood of forest species used by residents of the Una-Olivença stretch, Bahia, Brazil. *Agrotópica*, 35(2/3), 135–142.

Tong, D., Brown, S. A., Yin, H., Corr, D., Landis, E., Di Luzio, G., & Cusatis, G. (2023). Orthotropic hygroscopic behaviour of mass timber: Theory, computation, and experimental validation. Materials and Structures, 56(6), Article 109. https://doi.org/10.1617/s11527-023-02196-8

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Caracterização das propriedades físicas e morfologia das fibras da madeira de *Erisma uncinatum* Warm provenientes de uma área de concessão florestal da Flona de Caxiuanã, PA

Luana Maia Azevedo[1]; Gustavo Ribeiro Dias[1]; Isadora Souza da Cunha[1]; William Santos Baima[1] Marcos Samuel Matias Ribeiro[1]; Saly Takeshita Yamaguti[1]

[1] Universidade Federal Rural da Amazônia

Resumo: A madeira de *Erisma uncinatum* Warm. apresenta relevância comercial na Amazônia e demanda informações tecnológicas que orientem seu melhor aproveitamento. Este estudo teve como objetivo caracterizar as propriedades físicas e morfologia das fibras da madeira de *E. uncinatum*, comparando cerne e alburno provenientes de uma área de concessão florestal da Flona de Caxiuanã, PA. Foram avaliados 60 corpos de prova, sendo 30 de cerne e 30 de alburno, em delineamento inteiramente casualizado. Determinaram-se densidade básica, retrações tangencial, radial e volumétrica, coeficiente de anisotropia e morfologia das fibras, com comparação entre médias pelo teste t a 5% de significância. Os resultados não indicaram diferenças estatisticamente significativas entre cerne e alburno. A densidade básica média foi de 0,47 g.cm^{-3} em ambas as regiões, enquanto a retração volumétrica foi maior no alburno. As fibras também apresentaram valores semelhantes entre as regiões avaliadas. Conclui-se que a madeira possui comportamento físico e anatômico homogêneo, com estabilidade estrutural favorável ao aproveitamento tecnológico, embora estudos complementares sejam recomendados.

Palavras-chave*:* Densidade Básica; folhosa; qualidade da madeira.

Abstract: The wood of *Erisma uncinatum* Warm. has commercial relevance in the Amazon region and requires technological information to support its proper use. This study aimed to characterize the physical and anatomical properties of *E. uncinatum* wood, comparing heartwood and sapwood from a forest concession area in the Caxiuanã National Forest, Pará, Brazil. A total of 60 specimens were evaluated, consisting of 30 heartwood and 30 sapwood samples, in a completely randomized design. Basic density, tangential, radial and volumetric shrinkage, anisotropy coefficient and fiber morphology were determined, with mean comparison by Student's t-test at 5% significance. The results showed no statistically significant differences between heartwood and sapwood. The mean basic density was 0.47 g.cm^{-3} in both regions, while volumetric shrinkage was higher in sapwood. Fiber morphology also showed similar values between the evaluated regions. It is concluded that the wood presents homogeneous physical and anatomical behavior, with structural stability favorable to technological use, although further studies are recommended.

Keywords: Basic density; hardwood; wood quality.

1. Introdução

O setor madeireiro tem um papel importante na economia da Amazônia brasileira, movimentando grandes volumes de madeira e atendendo principalmente às demandas da construção civil. Entre 2018 e 2020, a região produziu cerca de 8,3 milhões de m³ de produtos madeireiros, sendo a maior parte destinada ao mercado interno (LENTINI et al., 2022). Mais

recentemente, em 2024, foram registrados aproximadamente 6,57 milhões de m³ de madeira em tora comercializados na Amazônia Legal, o que reforça a relevância contínua dessa atividade para a região (IMAFLORA, 2025).

Apesar da expressiva produção, o setor madeireiro amazônico ainda enfrenta desafios relacionados à agregação de valor e à diversificação das espécies utilizadas. A maior parte da produção é destinada à fabricação de peças serradas para a construção civil, que representam cerca de 85% dos produtos comercializados (LENTINI et al., 2022). Além disso, a ampliação do uso de espécies menos conhecidas depende da geração de informações sobre suas características tecnológicas, o que pode favorecer sua aceitação pelo mercado (LENTINI et al., 2022). Nesse contexto, estudos que avaliam as propriedades de espécies amazônicas tornam-se importantes para ampliar suas possibilidades de uso e contribuir para o aproveitamento sustentável dos recursos florestais.

Nesse contexto, a espécie *Erisma uncinatum* Warm., conhecida popularmente como cedrinho ou quarubarana, surge como uma alternativa promissora. Trata-se de uma madeira já presente no mercado, com características que permitem sua utilização em diferentes aplicações na construção civil, especialmente em usos leves e internos (NAHUZ et al., 2013). No entanto, ainda há espaço para aprofundar o conhecimento sobre suas propriedades e ampliar sua utilização de forma mais consistente.

Entre as espécies amazônicas com importância para o setor madeireiro, Erisma uncinatum Warm. (cedrinho) tem se destacado pela sua presença constante no mercado. Entre 2018 e 2020, o grupo *Erisma* spp. figurou entre as dez espécies mais utilizadas na produção madeireira da Amazônia, representando 4,1% do volume total comercializado (LENTINI et al., 2022). Em 2024, a espécie permaneceu entre as mais comercializadas da Amazônia Legal, com cerca de 149 mil m³ de madeira em tora negociados, correspondendo a 2,27% do volume total transacionado (IMAFLORA, 2025). Esses números evidenciam sua relevância econômica e reforçam a importância de estudos que ampliem o conhecimento sobre suas características e potencial de utilização.

Diante disso, o presente trabalho teve como objetivo caracterizar as propriedades físicas e morfologia das fibras da madeira de *Erisma uncinatum* Warm., buscando contribuir para a diversificação das espécies utilizadas no setor madeireiro e para o uso mais sustentável dos recursos florestais amazônicos.

2. Materiais e métodos

7.1. Amostragem

A madeira utilizada neste estudo foi da espécie *Erisma uncinatum* Warm., oriunda da área de concessão florestal da Floresta Nacional de Caxiuanã (PA), no estado Pará e convertida em madeira serrada na serraria da empresa Benevides Madeira, sendo selecionadas aleatoriamente tábuas da porção do cerne e alburno da tora. Em seguida, foram confeccionados corpos de prova com dimensões nominais 3x2x5 cm, nos sentidos tangencial, radial e longitudinal, respectivamente (Figura 1). De cada posição foram obtidas 30 amostras de alburno e 30 amostras de cerne, totalizando 60 corpos de prova. Estas amostras foram inicialmente saturadas para determinação da densidade básica, retratibilidade e coeficiente de anisotropia (relação T/R).

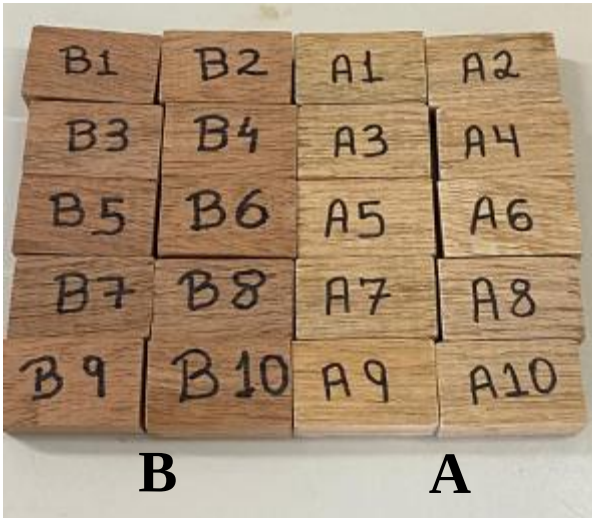


Figura 28 – Corpos de Prova Cerne (B) e Alburno (A).

Fonte: Autores (2026)

7.2. Densidade básica

As amostras saturadas foram medidas com auxílio de um paquímetro para determinação do seu volume, seguindo o método estereométrico. Os cálculos foram realizados utilizando a equação:

$$Db = \frac{Ms}{Vsat}$$

Onde: Db = densidade básica ($g.cm^{-3}$); Ms = massa seca (g); Vsat = volume saturado (cm^3)

7.3. Retratibilidade e Coeficiente de anisotropia

A determinação de retratibilidade tangencial, radial e volumétrica baseou-se na metodologia descrita norma brasileira ABNT NBR 7190-3/2022. Com os valores das retrações tangencial e radial totais foi calculado o coeficiente de anisotropia ou índice T/R (retração tangencial total/retração radial total).

$$RT = \left(\frac{D\,sat - D\,s}{Dsat} \right) \times 100$$

Onde: RT = Retratibilidade (%); Dsat = Dimensão saturada – tangencial (cm), radial (cm) ou volumétrica (cm^3); Ds = Dimensão seca – tangencial (cm), radial (cm) ou volumétrica (cm^3).

7.4. Morfologia das fibras

Pequenas lascas de lenho foram retiradas das amostras para o processo de maceração. O material foi acondicionado em frascos de vidros contendo solução de ácido acético e peróxido de hidrogênio na proporção 1:1, permanecendo em estufa a 60 C° por 48 horas para dissociação dos elementos celulares. Posteriormente, as amostras foram lavadas para remoção das substâncias ácida e utilizadas na montagem das lâminas histológicas. Em cada lâmina adicionou-se safranina e glicerina para melhor visualização das estruturas anatômicas.

A captura das imagens foi realizada em microscópio óptico, utilizando lentes de aumento de 4x, 10x e 40x, para mensuração do comprimento, largura e diâmetro do lúmen das fibras, seguindo as recomendações da IAWA (1989). A espessura da parede celular foi obtida a partir da diferença entre a largura da fibra e o diâmetro do lúmen, dividida por dois. As medições foram realizadas com auxílio do software ImageJ.

7.5. Delineamento Estatístico e Análise dos Dados

O estudo foi conduzido em delineamento inteiramente casualizado (DIC), sendo avaliadas duas regiões da madeira: alburno e cerne. Cada tratamento foi composto por 30 repetições do cerne e 30 repetições do alburno, totalizando 60 unidades experimentais.

Inicialmente, os dados foram submetidos à análise exploratória e à verificação dos pressupostos necessários para aplicação dos testes paramétricos. A normalidade dos resíduos foi avaliada pelo teste de Shapiro-Wilk, enquanto a homogeneidade das variâncias entre os grupos foi verificada pelo teste de Levene, ambos ao nível de 5% de significância.

Uma vez atendidos os pressupostos, procedeu-se à comparação das médias entre alburno e cerne por meio do teste t de Student para amostras independentes, adotando-se nível de significância de 5% ($p < 0,05$). Os resultados foram expressos em termos de média e desvio-padrão, permitindo avaliar possíveis diferenças entre as regiões da madeira estudadas.

3. Resultados e discussões

Na maioria das árvores, a porção que se destaca pela sua coloração mais escura é a parte interna do tronco, o cerne. As causas de formação desta estrutura se dão pelo fato de que apenas as suas camadas mais periféricas são fisiologicamente ativas, o fluxo ascendente de líquidos provenientes do solo ocorre nas camadas de crescimento mais externas do xilema, o transporte da seiva elaborada se dá no floema e por fim, a formação de novas células e estruturas é realizada pelo câmbio (BURGER; RICHTER, 1991).
Nem sempre o cerne se destaca do alburno por conta de uma coloração mais intensa, apesar de existir fisiologicamente. De maneira geral, Burger e Richter (1991) descrevem as principais diferenças entre cerne e alburno com sendo a presença da coloração mais escura no cerne e o seu menor teor de umidade, devido a redução da atividade fisiológica. Os autores complementam ainda que, o cerne é mais resistente ao ataque de agentes xilófagos e degradadores, além de ser menos permeável.
Em relação às propriedades físicas, são apresentados na Tabela 1 os valores de densidade básica, retratabilidade (tangencial, radial e volumétrica) e relação T/R do alburno e cerne da madeira de *Erisma uncinatum* Warm.

Tabela 1 – Densidade básica e retratibilidade do alburno e cerne de *Erisma uncinatum* Warm

Variáveis	Tratamento		Valor-p
	Alburno	Cerne	
Db (g.cm^{-3})	0,47 ± 0,02	0,47 ± 0,02	0,2341^{ns}
RT (%)	7,74 ± 1,62	6,93 ± 1,98	0,0881^{ns}
TR (%)	3,61 ± 1,40	3,85 ± 2,26	0,6204^{ns}
RV (%)	11,48 ± 2,42	8,55 ± 13,66	0,2523^{ns}
T/R	2,56 ± 1,49	2,42 ± 1,53	0,7342^{ns}

Nota 1. ^{ns}Teste t para amostras independentes ao nível de significância de 5% ($\alpha = 0,05$); Valores após ± referem-se ao coeficiente de variação trabalhado.
Nota 2. Db = Densidade Básica; RT = Retração Tangencial; TR = Retração Radial; RV = Retração Volumétrica; T/R = Coeficiente de Anisotropia; Ns = Não Significativo.
Fonte: Autores (2026)

Apesar dos elementos macroscópios da madeira evidenciarem de forma evidente a diferença entre cerne e alburno, principalmente a coloração, nenhuma das variáveis das propriedades físicas avaliadas apresentaram diferença significativa. O valor da densidade básica média para o cerne e alburno de *Erisma uncinatum* foi de 0,47 g.cm^{-3}, valor semelhante ao apresentado por

Veintemilla (2014), que também encontrou valores de densidade básica de 0,47 g.cm^{-3}, para *Erisma uncinatum* em povoamentos naturais da Amazônia peruana, provenientes da província de Tambopata, Madre de Dios, no Peru. Corroboram com isso também, os dados reportados pela Organização Internacional de Madeiras (ITTO, s.d), onde apresentaram valores de densidade básica de 0,48 g.cm^{-3}.

Os valores de densidade observados ficaram próximos dos relatados por Mascarenhas, Amorim e Arruda (2020) para espécies do gênero *Erisma* no Mato Grosso, incluindo a *Erisma uncinatum*, que também apresenta densidade intermediária e comportamento físico parecido, os autores encontraram valores de densidade básica iguais a 0,49 g.cm^{-3}. Isso reforça que a espécie que foi analisada se encaixa na faixa de densidade já descrita anteriormente.

A retratibilidade é um indicador importante, pois revela a estabilidade dimensional da madeira e ajuda a prever o quanto ela contrai durante a secagem. No presente estudo, a retração volumétrica foi de 11,48% no alburno e 8,55% no cerne, deixando claro que o alburno contrai mais. Ou seja, o alburno tende a variar mais de dimensão conforme perde umidade, enquanto o cerne se mostrou mais estável.

Comparando com os dados de Amorim, Mascarenhas e Arruda (2020) para o *Erisma uncinatum*, valores obtidos no presente estudo foram mais altos, sobretudo no alburno. Essa diferença pode ter origem nas características anatômicas de cada região da madeira, além das condições de crescimento, idade do material, local de coleta e metodologia de avaliação. O ponto de atenção aqui é a secagem: principalmente no alburno, é preciso cuidado redobrado para evitar rachaduras, empenamentos e outros defeitos.

As retrações tangencial, radial e volumétrica também apresentaram valores próximos aos descritos na literatura, de maneira mais específica aqueles reportados pela ITTO (s.d.), que registraram valores de retração tangencial de 7,7%, radial com 3,3% e um coeficiente de anisotropia de 2,3. Estes resultados indicam que a espécie da madeira avaliada apresenta um comportamento dimensional já compatível com o padrão descrito para esta espécie, caracterizando-a como uma madeira de densidade média e estabilidade dimensional moderada.

Aquino et al. (2021), ao estudarem a influência da região de extração nas propriedades do Cambará-Rosa, mostraram que diferenças de clima e solo podem afetar o crescimento das árvores e, com isso, alterar as propriedades físicas e mecânicas da madeira. Embora o estudo deles trate de outra espécie comercial, a informação ajuda a entender por que os valores obtidos para *Erisma uncinatum* podem variar em relação à literatura. Fatores como ambiente, idade da

árvore, local de coleta e posição da amostra no tronco interferem diretamente nas características tecnológicas da madeira.

A retração volumétrica observada indica um comportamento dimensional moderado. Não é uma madeira de baixa contração, mas também não chega a ser uma madeira extremamente instável. Isso reforça que se for seca e armazenada adequadamente, condições controladas de umidade, a madeira pode ter um bom desempenho tanto em usos internos quanto em aplicações onde se consiga manter a umidade sob controle.

O coeficiente de anisotropia, calculado pela razão entre retração tangencial e radial, foi de 2,56 no alburno e 2,42 no cerne, sem diferença estatística significativa entre as duas regiões. Ainda assim, valores acima de 2,0 costumam indicar maior risco de empenamentos e rachaduras durante a secagem. O alburno apresentou um número ligeiramente maior, o que confirma sua sensibilidade um pouco mais elevada às variações dimensionais.

Para fins comparativos, em relação à morfologia das fibras, foram avaliados o comprimento, a largura, o diâmetro do lúmen e a espessura da parede celular, cujos valores são apresentados na Tabela 2. As características avaliadas apresentaram valores próximos entre cerne e alburno, evidenciando elevada similaridade anatômica entre as duas regiões. Embora tenha sido realizada a comparação estatística entre os tratamentos, não foram observadas diferenças significativas para nenhuma das variáveis analisadas ($p > 0,05$). Esses resultados são coerentes com a formação das fibras durante a atividade cambial, indicando que o processo de cernificação não esteve associado a alterações expressivas nas dimensões das fibras avaliadas.

Tabela 2 – Morfologia das fibras do Alburno e Cerne da espécie *Erisma uncinatum* Warm

Variáveis	Tratamento		Valor-p
	Alburno	Cerne	
Comprimento da fibra (µm)	1.401,4 ± 139,6	1.452,8 ± 145,8	0,1692^{ns}
Largura da fibra (µm)	24,6 ± 3,9	23,5 ± 2,5	0,1870^{ns}
Diâmetro do lúmen (µm)	9,6 ± 3,5	10,1 ± 2,4	0,5761^{ns}
Espessura da parede (µm)	7,5 ± 1,6	6,7 ± 1,4	0,0532^{ns}

Nota 1. ^{ns} Teste t para amostras independentes ao nível de significância de 5% ($\alpha = 0,05$); Valores após ± referem-se ao coeficiente de variação trabalhado.
Fonte: Autores (2026)

O comprimento médio das fibras foi de 1.401,4 µm no alburno e 1.452,8 µm no cerne, não apresentando diferença estatística significativa entre estas duas regiões. Embora a região do cerne tenha apresentado uma média ligeiramente maior ao alburno, esta variação não foi suficiente para indicar uma diferença relevante entre eles.

Comparando com os resultados apresentados por Mascarenhas, Amorim e Arruda (2020) para *Erisma uncinatum*, os valores encontrados neste estudo para o comprimento das fibras ficaram próximos. Os autores relataram um comprimento médio de 1,36 mm, ou seja, 1.360 µm, enquanto neste trabalho foi observado um valor de 1.401,4 µm no alburno e 1.452,8 µm no cerne. Os resultados encontrados aqui foram um pouco superiores aos apresentados por eles, mas ainda assim são compatíveis com o que a literatura descreve para esta espécie.

Nas demais variáveis anatômicas analisadas também por Mascarenhas, Amorim e Arruda (2020) foram registrados valores de largura total da fibra de 34,11 µm, diâmetro do lúmen de 10,14 µm e espessura da parede celular de 11,99 µm. No caso desta análise, a largura da fibra foi de 24,6 µm no alburno e 23,5 µm no cerne, valores abaixo dos relatados pelos autores. O diâmetro do lúmen ficou em 9,6 µm no alburno e 10,1 µm no cerne, bem próximo do valor da literatura. Já a espessura da parede celular foi de 7,5 µm no alburno e 6,7 µm no cerne, que também foi inferior ao observado pelos autores.

A largura das fibras ficou em 24,6 µm no alburno e 23,5 µm no cerne, e o diâmetro do lume foi de 9,6 µm e 10,1 µm, respectivamente. Esses números indicam uma anatomia uniforme entre as duas regiões, sugerindo um padrão estrutural homogêneo. Como apontam Costa et al. (2017), madeiras com maior regularidade anatômica tendem a ter comportamento tecnológico mais previsível durante o processamento e a secagem.

A espessura da parede celular mostrou uma tendência de valor maior no alburno (7,5 µm) do que no cerne (6,7 µm). Segundo Costa et al. (2017), a espessura da parede celular influencia fortemente propriedades como densidade, retratibilidade e resistência mecânica.

No geral, os resultados mostram que a madeira de *Erisma uncinatum* tem características físicas e anatômicas homogêneas entre cerne e alburno. Todavia, para esta espécie, diferenças observadas podem estar associadas principalmente às variações na composição química dessas regiões, sobretudo no que se refere ao teor de substâncias extrativas, fato este que pode conferir ao alburno menor durabilidade natural e maior suscetibilidade ao ataque de organismos xilófagos.

4. Conclusão

Os resultados obtidos permitiram caracterizar as propriedades físicas e anatômicas da madeira de *Erisma uncinatum* proveniente de uma área de concessão florestal da Flona de Caxiuanã, PA. A comparação entre cerne e alburno demonstrou que não existem diferenças estatisticamente significativas para as variáveis avaliadas, indicando que a espécie apresenta comportamento homogêneo quanto às características analisadas. Esses resultados contribuem para ampliar o conhecimento tecnológico sobre a madeira de *Erisma uncinatum* e reforçam seu potencial de utilização pelo setor madeireiro, favorecendo o uso mais eficiente e a valorização de espécies florestais amazônicas.

5. Referências bibliográficas

Amorim, E. P., Mascarenhas, G. T., & Arruda, T. P. M. (2020). Technological characteristics of two species of the genus *Erisma* sp. in the state of Mato Grosso. *Scientific Electronic Archives, 13*(7), 45–51. https://doi.org/10.36560/13720201022

Aquino, V. B. de M., Panzera, T. H., Molina, J. C., Christoforo, A. L., & Lahr, F. A. R. (2021). Influence of harvest region on properties of Cambará wood. *Maderas. Ciencia y Tecnología, 23*, 1–12. https://doi.org/10.4067/S0718-221X2021000100440

Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2003). *ABNT NBR 11941:2003: Madeira — Determinação da densidade básica*.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2022). *ABNT NBR 7190-3:2022: Projeto de estruturas de madeira — Parte 3: Métodos de ensaio para corpos de prova isentos de defeitos para madeiras de florestas nativas*.

Costa, L. J., Lopes, C. B. da S., Reis, M. F. de C., Cândido, W. L., Faria, B. de F. H. de, & Paula, M. O. de. (2017). Caracterização anatômica e descrição físico-química e mecânica da madeira de *Mimosa schomburgkii*. *Floresta, 47*(4), 383–390. https://doi.org/10.5380/rf.v47i4.54471

Franklin, G. L. (1937). Permanent preparations of macerated wood fibers. *Tropical Woods, 49*, 21–22.

IAWA Committee. (1989). IAWA list of microscopic features for hardwood identification. *IAWA Bulletin n.s., 10*(3), 219–332.

Instituto de Manejo e Certificação Florestal e Agrícola. (2025). *Anuário Timberflow 2025: Amazônia Legal, do dado à decisão: Diagnóstico da transação de madeira natural em 2024 e suas variações em relação a 2023*. https://timberflow.org.br

International Tropical Timber Organization. (n.d.). *Quarubarana, Cambara (Erisma uncinatum)*. Tropical Timber Info. Retrieved June 28, 2026, from https://www.tropicaltimber.info/specie/quarubarana-erisma-uncinatum/

Lahr, F. A. R., Arroyo, F. N., Almeida, T. H. de, Almeida Filho, F. M. de, Mendes, I. S., & Christoforo, A. L. (2016). Full characterization of *Erisma uncinatum* Warm wood species. *International Journal of Materials Engineering*, *6*(5), 147–150. https://doi.org/10.5923/j.ijme.20160605.01

Lengowski, E. C., Zanatta, B. P., Souza, L. V. C. de, Pereira, B. L. C., Oliveira, A. C., & Bonfatti Júnior, E. A. (2019). Propriedades físicas de madeiras nativas amazônicas. In *Anais do IV Congresso Brasileiro de Ciência e Tecnologia da Madeira*. Sociedade Brasileira de Ciência e Tecnologia da Madeira.

Lentini, M. W., Bezerra, M. H. M., Dias, A. S., Bernardes, A. T., & Erdmann, A. A. (2022). *Acertando o alvo 4: Panorama atual e tendências para mercados sustentáveis de madeira da Amazônia*. Imaflora.

Melo, R. R. (2013). Estabilidade dimensional de compostos de madeira. *Revista Ciência da Madeira (Brazilian Journal of Wood Science)*, *4*(2), 152–175. https://doi.org/10.12953/2177-6830.v04n02a03

Melo, R. R., Araldi, D. B., Stangerlin, D. M., Müller, M. T., & Gatto, D. A. (2013). Uso das características tecnológicas da madeira para o agrupamento de espécies florestais. *Nativa*, *1*(1), 1–7. https://doi.org/10.14583/2318-7670.v01n01a01

Morvely Veintemilla, W. D. (2014). *Determinación de las características anatómicas y propiedades físicas de la madera de las especies Erisma uncinatum Warm y Dacryodes peruviana (Loes.) H.J. Lam proveniente de la provincia de Tambopata - Madre de Dios* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Amazónica de Madre de Dios]. Repositorio Institucional UNAMAD. http://hdl.handle.net/20.500.14070/97

Nahuz, M. A. R., Miranda, M. J. de A. C., Ielo, P. K. Y., Pigozzo, R. J. B., & Yojo, T. (2013). *Catálogo de madeiras brasileiras para a construção civil*. Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo.

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Caracterização do colmo de bambu (*Bambusa vulgaris*) visando sua aplicação energética

Ricardo Fernandes Pena[1]; Angélica de Cássia Oliveira Carneiro[1]; Ana Márcia Macedo Ladeira Carvalho[1]; Iara Fontes Demuner[1]; Thaynara Silva Vieira[1]

[1] Departamento de Engenharia Florestal, Universidade Federal de Viçosa, Brasil.

Resumo: O *Bambusa vulgaris* é uma espécie de bambu que se destaca pela elevada adaptabilidade, rápido crescimento e características que favorecem sua utilização em plantios comerciais. O objetivo deste trabalho foi realizar a caracterização química de *Bambusa vulgaris*, visando sua aplicação energética. Foram colhidos colmos de *Bambusa vulgaris*, dos quais foram removidos os ramos e as folhas. Foram determinados os teores de lignina solúvel, insolúvel e total, açúcares, extrativos totais, cinzas, materiais voláteis e carbono fixo. O teor de lignina total foi de 25,7%, enquanto o carbono fixo foi de 19,46%, parâmetros importantes a serem considerados na conversão termoquímica de materiais lignocelulósicos em carvão vegetal. Os teores de açúcares totais e extrativos totais foram de 62,5% e 7,18%, respectivamente, e o teor de cinzas foi de 1,82%. Conclui-se que a caracterização química (estrutural e imediata) do *Bambusa vulgaris* evidenciou alto conteúdo de lignina e carbono fixo e baixo conteúdo de açúcares e cinzas, características de matéria-prima com potencial de aplicações energéticas, dentre elas para a produção de carvão vegetal.

Palavras-chave: Pirólise lenta; Bioprodutos; Biomassa lignocelulósica

Characterization of bamboo culms (*Bambusa vulgaris*) for energy applications

Abstract: *Bambusa vulgaris* is a bamboo species characterized by high adaptability, rapid growth, and traits that favor its use in commercial plantations. This study aimed to perform the chemical characterization of *Bambusa vulgaris* for energy applications. Culms of *Bambusa vulgaris* were harvested, and branches and leaves were removed. The contents of soluble, insoluble, and total lignin, sugars, total extractives, ash, volatile matter, and fixed carbon were determined. The total lignin content was 25.7%, while the fixed carbon content was 19.46%, both being important parameters to consider in the thermochemical conversion of lignocellulosic materials into charcoal. Total sugar and total extractive contents were 62.5% and 7.18%, respectively, and ash content was 1.82%. It is concluded that the chemical characterization (structural and proximate analysis) of *Bambusa vulgaris* revealed high lignin and fixed carbon contents and low sugar and ash contents, indicating that this raw material has potential for energy applications, including charcoal production.

Keywords: Slow pyrolysis; Bioproducts; Lignocellulosic biomass.

.

1. Introdução

Atualmente, as indústrias consumidoras de madeira têm enfrentado dificuldades na obtenção de matéria-prima. Apesar da relevância, a produção nacional não tem acompanhado o aumento na demanda, provocando aumento nos preços do produto (IBÁ, 2024). Com a escassez na oferta de madeira e o limitado número de espécies comerciais cultivadas, tem-se observado o avanço de biomassas alternativas para suprir demandas industriais, dentre as quais destacam-se os bambus. Os bambus são espécies de gramíneas perenes de caules lenhosos, com rápido crescimento, elevada produtividade e baixo custo de manutenção (KUMAR et al., 2022).

O *Bambusa vulgaris* é uma espécie de bambu que se destaca pelo elevado valor econômico, devido a sua alta adaptabilidade, rápido crescimento, propriedades favoráveis (MENDES et al., 2010) e características morfofisiológicas que permitem a composição de plantios comerciais (BRONDANI et al., 2017).

O bambu é uma importante fonte renovável de biomassa e pode substituir a madeira em diversas aplicações, como na produção de painéis reconstituídos e compósitos (SILVA et al., 2021). Além disso, sua aplicação vem sendo amplamente estudada para a construção civil (NUNES et al., 2021) e produção de polpa celulósica (BORGES et al., 2018).

O uso do colmo do bambu para produção de carvão vegetal também é uma alternativa viável de agregação de valor. Características de processo, combinadas a matéria-prima, permitem a produção de carvão vegetal com diferentes propriedades físicas e químicas (MUKHERJEE & ZIMMERMAN, 2013), para isso, é necessário o conhecimento das características químicas da matéria prima utilizada. Nesse contexto, esse estudo teve como objetivo realizar a caracterização química (estrutural e imediata) de *Bambusa vulgaris*, visando sua aplicação energética.

2. Material e métodos

Foram utilizados colmos de bambu da espécie *Bambusa vulgaris*, adquiridos nas áreas pertencentes ao Departamento de Engenharia Florestal (DEF) da Universidade Federal de Viçosa (UFV), nas coordenadas -20.773326º, -42.876346º. Os colmos de bambu foram colhidos e os ramos e folhas foram removidos. Para a determinação da composição química (imediata e estrutural), os colmos foram convertidos em cavacos e posteriormente transformados em serragem, por meio do moinho tipo Wiley, de acordo com a norma TAPPI 257 om-52 (TAPPI, 2001). Foi utilizada a fração que passou pela peneira n° 16 internacional, com malha de 40 mesh e ficou retida na peneira com malha de 60 mesh.

Para a determinação da composição química estrutural, os teores de extrativos na biomassa foram determinados de acordo com a norma TAPPI 264 om-88 (TAPPI, 1998), em duplicatas, apenas alterando o etanol/benzeno, pelo etanol/tolueno. Os teores de lignina insolúvel foram determinados em duplicata pelo método Klason, conforme o procedimento proposto pela norma TAPPI T 222 om-88 (TAPPI, 1999). A lignina solúvel foi determinada por espectrometria, conforme TAPPI um-250 (TAPPI, 2000), e foi considerado teor de lignina total a soma dos dois valores. O teor de açúcares foi mensurado de acordo com a norma SCAN-CM 71:09 (Scandinavian Pulp and Paper, 1993).

Para a determinação da composição química imediata da biomassa, foram determinados os teores de materiais voláteis (MV), cinzas (CZ) e carbono fixo (CF) de acordo com a norma ASTM D1762-84 (ASTM, 2013).

3. Resultados e discussão

Os teores de lignina, açúcares e extrativos (composição química estrutural) e carbono fixo, materiais voláteis e cinzas (composição química imediata) presentes nos colmos de *B. vulgaris* estão apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 - Valores médios dos parâmetros apresentados pela composição química estrutural e imediata do colmo de *Bambusa vulgaris*.

Parâmetros			Média (%)
Composição Química Estrutural	Lignina solúvel		1,18
	Lignina insolúvel		24,52
	Lignina total		25,70
	Açúcares	Glicanas	43,60
		Galactanas	0,40
		Xilanas	17,60
		Arabinanas	0,90
		Mananas	-
	Extrativos totais		7,18
Composição Química Imediata	Carbono fixo		19,46
	Materiais voláteis		78,72
	Cinzas		1,82

Os valores totais de lignina, açúcares e extrativos encontrados para o *B. vulgaris* foram de 25,70%, 62,50% e 7,18%, respectivamente. Vale et al. (2017) em estudo de caracterização química em diferentes idades (1, 2 e 3 anos) e posições do colmo (meio, base e topo) de

Bambusa vulgaris, encontraram valores de extrativos variando 3,37 a 6,33% e lignina total variando de 21,99 a 26,01%, evidenciando a variabilidade do material.

Os carboidratos estruturais dos colmos foram representados principalmente por glicanas (43,60%) e xilanas (17,60%), correspondentes às frações associadas à celulose e às hemiceluloses, respectivamente. Borges et al. (2018) em estudo de *B. vulgaris* para produção de polpa celulósica reportaram teores de extrativos de 8,9%, lignina total de 22,10%, glicanas de 46,2%, xilanas de 15,7%, arabinanas de 0,9%, galactanas de 0,5% e mananas de 0,1%, valores compatíveis com os encontrados nesse estudo.

O teor e a estrutura química dos constituintes da madeira, especialmente a quantidade de lignina e sua composição em unidades fenilpropanóides, são fatores relevantes na conversão do bambu em produtos energéticos. Na produção de carvão vegetal esses parâmetros influenciam a velocidade de degradação dos componentes e o rendimento do processo de carbonização (Gouvêa et al., 2015). Altos teores de lignina são desejáveis para o uso da biomassa para fins energéticos, pois pode aumentar o rendimento de carvão vegetal, a estabilidade térmica da biomassa (Araújo et al., 2016; Wang et al., 2017) e o poder calorífico superior (Esteves et al., 2023).

O teor de lignina total observado para *B. vulgaris* (25,70%) foi próximo aos valores reportados para a mesma espécie por Ogunsanwo et al. (2015), entre 23,0 e 25,6%, e inferior ao observado por Osman et al. (2022), de 28,39%. O valor obtido também se aproxima dos relatados para outras espécies comerciais de bambu, como *Guadua angustifolia* (25,2%) e *Dendrocalamus brandisii* (23,78%) (Gárate et al., 2021; Xiao et al., 2023), além de estar inserido na faixa observada para cinco espécies de bambu, incluindo *B. vulgaris*, avaliadas por Hossain et al. (2022), que variaram de 22,4 a 28,2%. Embora inferior aos valores reportados para clones de *Eucalyptus* de alto desempenho para produção de carvão vegetal, entre 26,1 e 32,8%, o teor de lignina encontrado está próximo ao limite inferior dessa faixa, indicando potencial da espécie para conversão termoquímica.

A composição química imediata dos colmos de *B. vulgaris* foi caracterizada por elevados teores de materiais voláteis (78,72%) e carbono fixo (19,46%) e baixo teor de cinzas (1,82%), em relação a estudos semelhantes. Vale et al. (2017) analisaram a composição química imediata de *B. vulgaris* com diferentes idades e posições do colmo e observaram teores de 74,56 a 79,68% de materiais voláteis, 15,53 a 18,81% de carbono fixo e 2,04 a 10,05% de cinzas. Além disso, os valores obtidos neste estudo corroboram os intervalos reportados para bambus

de interesse comercial, com cinzas entre 1,4 e 3,0%, materiais voláteis entre 77,2 e 80,8% e carbono fixo entre 17,6 e 21,1% (Kumar e Chandrashekar, 2014).

O elevado teor de materiais voláteis está associado a estrutura anatômica rica em tecidos parenquimáticos e a composição química da parede celular do *B. vulgaris*, especificamente, do conteúdo de carboidratos presentes no material. O teor de carbono fixo corresponde à fração sólida rica em carbono que permanece após a liberação dos materiais voláteis durante o aquecimento. É um parâmetro amplamente utilizado para avaliar o potencial energético de biomassas e biocombustíveis sólidos.

As cinzas representam a fração inorgânica da biomassa, e seu teor e composição estão relacionados às características genéticas da espécie, bem como às condições edafoclimáticas e de manejo, incluindo idade da planta, composição do solo, fertilização, transporte e armazenamento (Vassilev et al., 2010). O teor de cinzas encontrado neste estudo (1,82%) é compatível com os valores reportados por Liese e Tang (2015) para *B. vulgaris,* entre 1,8 e 2,1%, indicando baixa participação da fração mineral nos colmos avaliados.

Essa característica de baixo teor de cinzas é desejável para a conversão termoquímica, uma vez que a fração mineral é não-combustível e substitui parte da matéria orgânica combustível, reduzindo a capacidade de geração de energia por unidade de massa. Além disso, os constituintes inorgânicos podem favorecer a formação de depósitos, incrustações e escórias em equipamentos de combustão (Jenkins et al., 1998; Vassilev et al., 2017).

4. Conclusões

A caracterização química (estrutural e imediata) do *Bambusa vulgaris* evidenciou alto conteúdo de lignina e carbono fixo e baixo conteúdo de açúcares e cinzas, sendo uma matéria-prima potencial para aplicações energéticas, especialmente para produção de carvão vegetal.

5. Agradecimentos

Os autores agradecem ao Departamento de Engenharia Florestal /UFV, ao Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal (PPGCF/UFV), a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG), Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), Empresa Brasileira de Pesquisa e Inovação Industrial (EMBRAPII) - Unidade UFV

Fibras Florestais, a Sociedade de Investigações Florestais (SIF) e ao Laboratório de Painéis e Energia da Madeira (LAPEM/UFV) pelo suporte no desenvolvimento da pesquisa e oferta de recursos financeiros.

6. Referências bibliográficas

American Society for Testing and Materials. (2013). *ASTM D1762-84: Standard test method for chemical analysis of wood charcoal*. ASTM International.

Araújo, A. C. C. de, Trugilho, P. F., Napoli, A., Braga, P. P. de C., Lima, R. V., & Protásio, T. de P. (2016). Effects of the syringyl/guaiacyl ratio and of lignin-derived phenols on the wood and charcoal characteristics in *Eucalyptus* spp. *Scientia Forestalis, 44*(110), 405–414. https://doi.org/10.18671/scifor.v44n110.13

Borges, F. P., Colodette, J. L., & Gomes, F. J. B. (2018). Utilização do bambu como matéria-prima na obtenção de polpa celulósica voltada à fabricação de papel de embalagem sackraft. *The Journal of Engineering and Exact Sciences, 4*(4), 405–411. https://doi.org/10.18540/jcecvl4iss4pp0405-0411

Brondani, G. E., Oliveira, L. S., Furlan, F. C., & Ribeiro, A. S. (2017). Estabelecimento *in vitro* de *Bambusa vulgaris* Schrad. ex J. C. Wendl. e *Dendrocalamus asper* (Schult. & Schult. f.) Backer ex K. Heyne. In P. M. Drumond & G. Wiedman (Eds.), *Bambus no Brasil: Da biologia à tecnologia* (pp. 86–102). Instituto Ciência Hoje.

Gouvêa, A. F. G., Trugilho, P. F., Assis, C. O. de, Assis, M. R., Colodette, J. L., & Gomes, C. M. (2015). Avaliação do efeito da relação siringila/guaiacila da lignina de eucalipto na produção de carvão vegetal. *Ciência da Madeira, 6*(2), 71–78. https://doi.org/10.12953/2177-6830/rcm.v6n2p71-78

Hossain, M. J., Ghosh, R. K., Das, A. K., Nath, S. C., Islam, M. R., Akhter, S., & Rahman, M. S. (2022). Investigation of the potentiality of five bamboo species in biorefinery through analysis of chemical profiles. *Journal of Wood Chemistry and Technology, 42*(3), 204–210. https://doi.org/10.1080/02773813.2022.2055770

Indústria Brasileira de Árvores. (2024). *Relatório anual 2024*. https://iba.org/datafiles/publicacoes/relatorios/relatorio2024.pdf

Jenkins, B. M., Baxter, L. L., Miles, T. R., Jr., & Miles, T. R. (1998). Combustion properties of biomass. *Fuel Processing Technology, 54*(1–3), 17–46. https://doi.org/10.1016/S0378-3820(97)00059-3

Kumar, P. S., Shukla, G., Nath, A. J., & Chakravarty, S. (2022). Soil properties, litter dynamics and biomass carbon storage in three-bamboo species of Sub-Himalayan region of Eastern India. *Water, Air, & Soil Pollution, 233*(1), Article 12. https://doi.org/10.1007/s11270-021-05477-6

Kumar, R., & Chandrashekar, N. (2014). Fuel properties and combustion characteristics of some promising bamboo species in India. *Journal of Forestry Research, 25*(2), 471–476. https://doi.org/10.1007/s11676-014-0478-6

Liese, W., & Tang, T. K. H. (2015). Properties of the bamboo culm. In W. Liese & M. Köhl (Eds.), *Bamboo: The plant and its uses* (pp. 227–256). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-14133-6_8

Mendes, S. C., Molica, S. G., Ferreira, R. L. C., & Céspedes, G. H. G. (2010). Absorção e distribuição de nutrientes em plantios comerciais de bambu (*Bambusa vulgaris*) no Nordeste do Brasil. *Revista Árvore, 34*(6), 991–999.

Mukherjee, A., & Zimmerman, A. R. (2013). Organic carbon and nutrient release from a range of laboratory-produced biochars and biochar–soil mixtures. *Geoderma, 193–194*, 122–130. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2012.10.002

Nunes, G. M., Silva Júnior, A. S., & Pastor, J. S. (2021). O uso do bambu como material estrutural na construção civil. *Revista Principia: Divulgação Científica e Tecnológica do IFPB*, (55), 152–164.

Ogunsanwo, O. Y., Terziev, N., Panov, D., & Daniel, G. (2015). Bamboo (*Bambusa vulgaris* Schrad.) from moist forest and derived savanna locations in South West Nigeria: Properties and gluability. *BioResources, 10*(2), 2823–2835. https://doi.org/10.15376/biores.10.2.2823-2835

Osman, S., Ahmad, M., Zakaria, M. N., Bakar, B. F. A., Abu, F., Kamarudin, S. H., Bahari, S. A., & Hosseinpourpia, R. (2022). Variation of chemical properties, crystalline structure and calorific values of native Malaysian bamboo species. *Wood and Fiber Science, 54*(3), 173–186. https://doi.org/10.22382/wfs-2022-17

Prado Gárate, A. E. R., Felissia, F. E., Area, M. C., Suirezs, T., & Vallejos, M. E. (2021). Physical, chemical and morphological characteristics of bamboo species *Guadua trinii* and *Guadua angustifolia* and their potential to produce high-value products. *Cellulose Chemistry and Technology, 55*(9–10), 951–959. https://doi.org/10.35812/CelluloseChemTechnol.2021.55.81

Scandinavian Pulp, Paper and Board Testing Committee. (2009). *SCAN-CM 71:09: Pulps—Carbohydrate composition*. Scandinavian Pulp, Paper and Board Testing Committee.

Silva, C. R., Pereira, M. A. dos R., & Barata, T. Q. F. (2021). As pesquisas científicas de design e bambu no Brasil: Ênfases e lacunas. *MIX Sustentável, 7*(3), 77–88.

Technical Association of the Pulp and Paper Industry. (1996). *TAPPI T 264 om-88: Preparation of wood for chemical analysis*. TAPPI Press.

Technical Association of the Pulp and Paper Industry. (1999). *TAPPI T 222 om-88: Acid-insoluble lignin in wood and pulp*. TAPPI Press.

Technical Association of the Pulp and Paper Industry. (2000). *TAPPI UM 250: Acid-soluble lignin in wood and pulp*. TAPPI Press.

Technical Association of the Pulp and Paper Industry. (2001). *TAPPI T 257 cm-85: Sampling and preparing wood for analysis*. TAPPI Press.

Vale, A. T. do, Moreira, A. C. de O., & Martins, I. S. (2017). Evaluation of *Bambusa vulgaris* energy potential based on age. *Floresta e Ambiente, 24*, e00123314. https://doi.org/10.1590/2179-8087.123314

Vassilev, S. V., Baxter, D., Andersen, L. K., & Vassileva, C. G. (2010). An overview of the chemical composition of biomass. *Fuel, 89*(5), 913–933. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2009.10.022

Vassilev, S. V., Vassileva, C. G., Song, Y.-C., Li, W.-Y., & Feng, J. (2017). Ash contents and ash-forming elements of biomass and their significance for solid biofuel combustion. *Fuel, 208*, 377–409. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2017.07.036

Wang, S., Dai, G., Yang, H., & Luo, Z. (2017). Lignocellulosic biomass pyrolysis mechanism: A state-of-the-art review. *Progress in Energy and Combustion Science, 62*, 33–86. https://doi.org/10.1016/j.pecs.2017.05.004

Xiao, L.-P., Lv, Y.-H., Yang, Y.-Q., Zou, S.-L., Shi, Z.-J., & Sun, R.-C. (2023). Unraveling the lignin structural variation in different bamboo species. *International Journal of Molecular Sciences, 24*(12), Article 10304. https://doi.org/10.3390/ijms241210304

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Caracterização física da madeira proveniente de podas urbanas do município de Monte Carmelo – MG visando seu aproveitamento

Thomas Massolin dos Santos Silva[1]; Maria Julia Bernardino[1]; Cleomar Pereira Lima[1]; Olívia Pereira Lopes[1]; Emmanuel Rezende Naves[1]; Bernardo Teixeira de Castro[1], João Vítor Estevam Pinto[1], Regina Maria Gomes[1].

[1] Universidade Federal de Uberlândia

Resumo: A crescente geração de resíduos oriundos de podas urbanas apresenta-se como um desafio para muitos municípios brasileiros, frente à necessidade de descarte adequado. Neste cenário, o presente estudo teve como objetivo caracterizar fisicamente os resíduos de podas urbanas do município de Monte Carmelo/MG, visando avaliar o potencial para o aproveitamento energético. Foram analisadas as propriedades de fator de casca, umidade inicial e densidade básica das espécies coletadas. Entre os resultados obtidos verificou-se diferenças significativas entre densidade básica das espécies, destacando-se a *Lophanthera lactescens* (0,60 g.cm^{-3}) e o *Hymenaea courbaril* (0,55 g.cm^{-3}) pelos maiores valores. O fator de casca apresentou baixa variabilidade, enquanto a umidade inicial variou de 37,73 a 62,23%. Pelos resultados obtidos conclui-se que os resíduos analisados apresentam potencial para serem utilizados como fontes de energia, o que poderá colaborar com a gestão mais sustentável de resíduos lenhosos.

Palavras-chave: Biomassa Florestal; Resíduos Lenhosos; Sustentabilidade.

Physical characterization of wood from urban pruning in the municipality of Monte Carmelo – MG aiming at its utilization

Abstract: The increasing generation of residues from urban tree pruning has become a challenge for many Brazilian municipalities due to the improper disposal of these materials. In this context, the present study aimed to physically characterize wood obtained from urban tree pruning in the municipality of Monte Carmelo, Minas Gerais, Brazil, in order to evaluate its potential for reuse. The physical properties analyzed were bark factor, initial moisture content, and basic density of the collected species. The results revealed significant differences in basic density among the species, with *Lophanthera lactescens* (0.60 g cm^{-3}) and *Hymenaea courbaril* (0.55 g cm^{-3}) showing the highest values. The bark factor exhibited low variability, while the initial moisture content ranged from 37.73% to 62.23%. Based on the obtained results, it can be concluded that the analyzed residues have potential for reuse as biomass. However, further studies are still needed, which may contribute to more sustainable management of woody residues.

Keywords: Forest Biomass; Woody Residues; Sustainability.

1. Introdução

Um problema enfrentado pelos municípios brasileiros tem sido a sobrecarga de aterros sanitários pelo descarte de resíduos gerados pelas podas urbanas que são constituídos principalmente por galhos, troncos e raízes. Esse material, quando não destinado de forma correta, acarreta diversos impactos ambientais, como o acúmulo em áreas inadequadas, emissão de gases a partir da sua decomposição e o desperdício de uma biomassa com potencial valioso (Dias *et al*., 2014), trazendo a possibilidade de participar como matéria-prima em diferentes cadeias produtivas, o que indica a necessidade de ações e estratégias para a sua valorização. Com isso, a principal alternativa para o aproveitamento desses resíduos é a utilização como fonte de energia.

O uso da madeira para fins energéticos é uma prática bastante utilizada, principalmente em países com forte base floresta como o Brasil. A biomassa florestal, abrangendo os resíduos madeireiros, surge como uma alternativa sustentável e renovável para a geração de energia, colaborando com a diminuição da dependência de combustíveis fósseis (Pena-Vergara *et al*., 2022). No entanto, para o adequado aproveitamento, é indispensável compreender as características do material, o que acarreta a necessidade de avaliar a qualidade da madeira destinada à geração de energia.

A qualidade da madeira destinada para a geração de energia é diretamente relacionada a propriedades como densidade, fator de casca (K) e umidade inicial. Madeiras que possuem maior densidade, menor teor de umidade e maior proporção de lenho em relação a casca tendem a proporcionar maior rendimento energético, uma vez que disponibilizam maior quantidade de biomassa e demandam menor consumo de energia para a evaporação da água durante a combustão. Portanto, a caracterização da madeira é fundamental para analisar sua viabilidade, afim de garantir o seu uso eficiente.

Apesar do potencial desses resíduos, ainda são escassas as informações sobre as propriedades físicas da madeira proveniente de podas urbanas em municípios brasileiros. Diante deste contexto, o presente estudo tem como objetivo realizar a caracterização da madeira proveniente de podas urbanas no munícipio de Monte Carmelo – Minas Gerais, visando avaliar o potencial para a geração de energia, através da análise dessas propriedades, buscando trazer

informações que colaborem para a valorização desses resíduos, estimulando práticas sustentáveis e auxiliando em estratégias para a gestão ambiental nos municípios.

2. Material e métodos

As amostras utilizadas neste estudo foram provenientes de resíduos lenhosos oriundos de podas realizadas no município de Monte Carmelo/MG. Considerando que o material foi obtido a partir de diferentes locais de podas realizadas na cidade, anotou-se a data e a coordenada geográfica da coleta. A Tabela 1 apresenta as espécies arbóreas avaliadas, seus respectivos nomes científicos e populares, bem como as datas de coleta das amostras.

Tabela 1 – Espécies e datas de coleta

Identificação	Nome científico	Nome popular	Data de coleta
Testemunha	*Eucalyptus* sp.	Eucalipto (cavaco)	06/03/2026
A	*Persea americana*	Abacate	05/03/2026
B	*Handroanthus* sp.	Ipê	05/03/2026
C	*Terminalia argentea*	Capitão-do-mato	14/04/2026
D	*Lophanthera lactescens*	Lofantera	15/04/2026
E	*Cedrela* sp.	Cedro	15/04/2026
F	*Hymenaea courbaril*	Jatobá-da-mata	15/04/2026
G	*Morus* sp.	Amoreira	15/04/2026
H	*Polineurônio* sp.	Peroba	15/04/2026

As coordenadas geográficas foram utilizadas para a confecção de mapa indicando o local das coletas realizadas no município de Monte Carmelo, com o auxílio do software Qgis e para a organização visual e montagem final foi utilizada a plataforma Canva.

Para padronização do material amostrado, foram coletados somente galhos com diâmetro igual ou superior a 5 cm, uma vez que esse limite permite a obtenção de amostras com dimensões suficientes para a realização das devidas análises. Além das amostras provenientes das podas urbanas, foi utilizado cavaco de *Eucalyptus* sp. como testemunha, adotado como material de referência para comparação das propriedades físicas avaliadas. A escolha do *Eucalyptus* sp. deve-se ao seu amplo uso na produção de biomassa energética no Brasil, além da alta disponibilidade de informações na literatura sobre suas propriedades físicas, permitindo uma referência consolidada para interpretação dos resultados obtidos.

Após a coleta, as amostras foram encaminhadas ao Laboratório de Anatomia da Madeira (LAMAD) da Universidade Federal de Uberlândia (UFU), campus Boa Vista, no qual foram

realizadas as etapas de preparo do material e com auxílio de especialistas em identificação de espécies arbóreas foi realizado o levantamento das dez espécies coletadas.

Logo após a coleta, foram retiradas cinco amostras de cada espécie coletada para a determinação do teor de umidade inicial. Para isso, foram cortados cinco segmentos de madeira com aproximadamente 3 cm de comprimento, obtido a partir da região central do galho, buscando representar de forma mais homogênea a umidade do material. A determinação do teor de umidade inicial, seguiu a metodologia descrita na ABNT NBR 14929 (2017), adotando-se cinco repetições.

Após a retirada da amostra destinada à determinação do teor de umidade, o restante do material foi submetido à secagem natural, em local coberto e ventilado, permanecendo nesta condição até equilíbrio com a umidade ambiente. E durante este período procedeu-se a determinação do diâmetro do material, que foi obtido com a utilização de um paquímetro digital. Para tanto foram medidos os diâmetros no sentido vertical e horizontal do corpo da amostra, além da espessura da casca. Para caracterização da amostragem, o material coletado foi agrupado em classes de diâmetro e distribuídos por espécie.

O diâmetro sem casca foi calculado de acordo com a Equação 1.

$$Dsc = Dcc - (2\,x\,Ec) \qquad (1)$$

em que: Dsc = Diâmetro sem casca (mm); Dcc = Diâmetro com casca (mm); Ec = Espessura da casca (mm).

Em seguida, o fator de casca foi calculado pela relação entre os diâmetros sem e com casca, de acordo com a metodologia descrita por Husch et. al. (1982), conforme a Equação 2.

$$K = \frac{Dsc}{Dcc} \qquad (2)$$

em que: K = Fator de casca; Dsc = Diâmetro sem casca (mm); Dcc = Diâmetro com casca (mm).

A densidade básica foi calculada em função da relação entre massa absolutamente seca e o volume saturado da amostra, de acordo com a ABNT NBR 11941 (2003).

Os dados foram organizados em planilhas eletrônicas no Microsoft Excel, onde foram realizadas para a variável diâmetros com casca dos galhos foram levantados os valores médio, máximo e mínimo, bem como o número de galhos amostrados. Para as variáveis fator de casca e umidade inicial, o cálculo da média aritmética, o desvio padrão e o coeficiente de variação, com o objetivo de observar a tendência e variabilidade dos dados. Os valores de média dos diâmetros com casca e densidade básica obtidos foram submetidos à análise de variância (ANOVA) para verificar a existência de diferenças significativas ($p < 0,05$) entre as espécies analisadas, as

médias foram comparadas através do teste de Tukey à 5% de probabilidade, utilizando-se o software R.

Além disso, foi utilizado a ferramenta de inteligência artificial ChatGPT :OpenAI, versão GPT 5-5, como apoio na revisão textual, tradução do resumo para o inglês e a organização das informações, vale destacar que a ferramenta não foi empregada para geração e interpretação dos dados da pesquisa.

3. Resultados e discussão

A primeira etapa do trabalho consistiu na coleta e identificação das amostras a serem utilizadas neste estudo, esses dados são fundamentais para entender a disponibilidade do material.

A Figura 1 apresenta o mapa da localização dos pontos de coleta de resíduos oriundos de podas urbanas no município de Monte Carmelo, Minas Gerais. As espécies coletadas foram o Abacate (A), Ipê (B), Capitão-do-mato (C), Lofantera (D), Jatobá-da-mata (E), Amoreira (G) e Peroba (H).

O mapeamento das amostras, apresentado na Figura 1, possibilitou identificar a localização de cada indivíduo utilizado no estudo, evidenciando a distribuição espacial das árvores coletadas no perímetro urbano de Monte Carmelo.

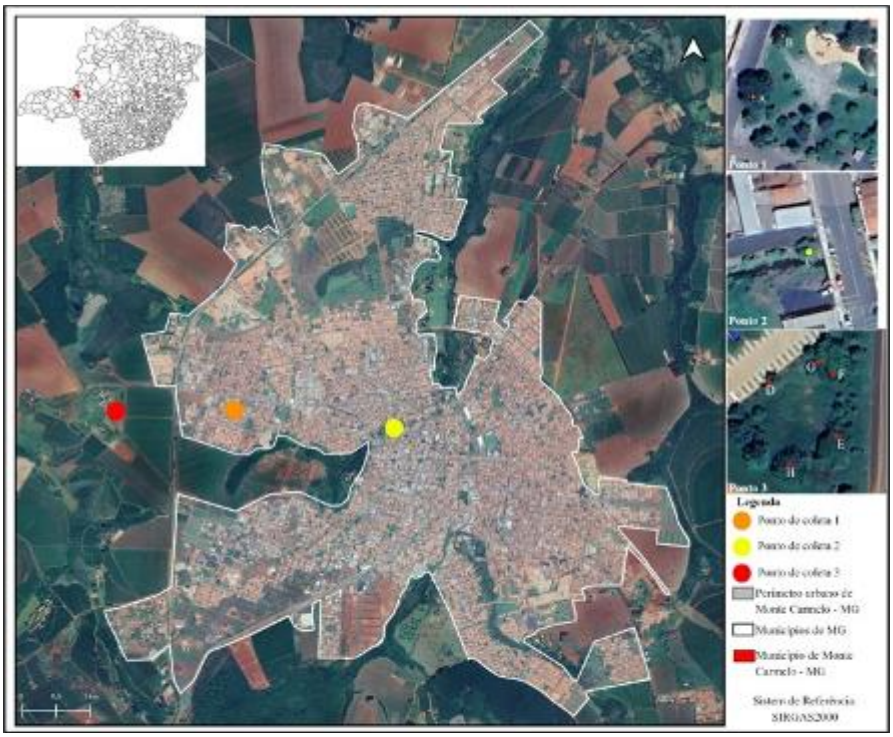


Figura 1 – Mapeamento dos pontos de coleta

Essa variação está relacionada ao planejamento das podas urbanas e às necessidades de manejo da arborização, fatores que influenciam diretamente a geração desse tipo de resíduo. Dessa forma, a obtenção de matéria-prima pode ocorrer de maneira irregular ao longo do tempo, representando um desafio para empreendimentos que pretendam utilizar exclusivamente resíduos de poda urbana, como por exemplo, fonte de biomassa para geração de energia, conforme relatado por Cortez; Coelho (2012).

A imprevisibilidade na oferta de resíduos pode dificultar o abastecimento contínuo de unidades consumidoras de biomassa, exigindo estratégias que garantam maior regularidade no fornecimento. Entre essas estratégias destacam-se a implantação de pátios para armazenamento dos resíduos provenientes das podas, permitindo a formação de estoques para utilização em períodos de menor disponibilidade (Nelo, 2023).

Após a identificação das espécies, as amostras coletadas foram medidas e os resultados obtidos encontram na Tabela 2, que apresenta o número de amostras (n), os valores mínimo, médio e máximo do diâmetro com casca dos galhos coletados e a média de densidade básica para cada espécie. Essas informações permitem caracterizar a variabilidade dimensional do material utilizado nas análises e fornecem uma visão geral da composição da amostragem.

Tabela 2 – Espécies que foram coletadas, número de galhos coletados e diâmetros com casca dos galhos - diâmetro mínimo (Ø min.), média do diâmetro (Ø), diâmetro máximo (Ø max.) e densidade básica (DB)

Espécies	n	Ø min. (cm)	Ø (cm)	Ø max. (cm)	DB(g cm^{-3})
Eucalipto (Cavaco)	-	-	-	-	0,43 d
Abacate	41	8,40	14,59 d	29,24	0,40 de
Ipê	88	6,74	13,32 d	28,96	0,36 e
Capitão-do-mato	14	13,10	32,78 a	69,14	0,51 bc
Lofantera	26	9,48	25,05 ab	51,59	0,60 a
Cedro	23	13,34	26,26 ab	43,49	0,41 de
Jatobá-da-mata	24	9,08	19,48 bc	45,32	0,55 ab
Amoreira	32	10,43	27,36 ab	58,57	0,39 de
Peroba	31	8,52	17,22 cd	29,47	0,52 bc

A análise realizada mostrou a presença de heterogeneidade biométrica entre os indivíduos, algo que é intrínseco dos resíduos de podas urbanas. A espécie portadora do maior diâmetro médio foi o Capitão-do-mato (32,78 cm), se apresentando estatisticamente semelhante às espécies Amoreira, Cedro e Lofantera. Anatomicamente, as maiores dimensões sugerem uma

maturidade cambial mais avançada, ou seja, maior presença de tecidos lenhosos, o que resulta em uma menor proporção de casca em relação à madeira. Estudos demonstram que galhos com maiores diâmetros tendem a conter maior densidade básica e menor teor de umidade inicial, quando comparados aos ramos finos, que contêm predominantemente tecidos juvenis que por terem paredes celulares mais finas e maiores dimensões de lúmen, retendo mais umidade (Silveira *et al.*, 2013).

Do ponto de vista energético, o uso de materiais com maiores diâmetros influencia na redução da geração de finos durante a queima, por possuírem menores percentuais de casca.

Em contrapartida, o Ipê (13,32cm) e o Abacate (14,59cm) foram constatados com as menores dimensões. Apesar disso, ambas espécies apresentam médias acima, quando comparados com a definição de galhos grossos pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo (IPT, 2022) que adota valores superiores de 8 cm, como todo o material foi classificado acima deste valor, demonstrou-se propício para o aproveitamento energético.

Em relação ao número de amostras por espécie também foi verificado variação em função da disponibilidade de material durante o período de coleta.

A Lofantera foi a espécie que apresentou a maior densidade básica média (0,60 $g.cm^{-3}$), enquanto a abacate apresentou a menor média (0,36 $g.cm^{-3}$). A média de densidade básica do Jatobá-da-mata (0,55 $g.cm^{-3}$) não diferiu da Lofantera. Por sua vez, as espécies de Peroba e Capitão-do-mato apresentaram comportamento intermediário, enquanto o cavaco de Eucalipto, Cedro, Ipê e Amoreira apresentaram os menores valores, a densidade da maioria das amostras foram maiores comparadas ao material referência, visto que o cavaco de eucalipto apresentou densidade de 0,43 $g.cm^{-3}$. Considerando apenas as espécies nativas, os dados analisados encontram-se no intervalo de 0,36 a 0,60 $g.cm^{-3}$, onde esses valores estão dentro da faixa de 0,36 a 1,052 $g.cm^{-3}$ reportada no estudo de Ramos *et al*. (2024), para diferentes espécies nativas no processo de carbonização, evidenciando que os indivíduos estudados apresentaram comportamento compatível com o observado na literatura.

Algumas características que irão influenciar nessa propriedade da madeira, são a espessura das paredes celulares, a proporção dos lúmens e entre cerne e alburno, sendo aspectos que variam de acordo com a espécie.

Após a medição dos diâmetros com e sem casca dos galhos, foi realizado o cálculo do fator de casca (K) das espécies amostradas, conforme a Tabela 3. Como pode-se observar na Tabela 3, os fatores de casca variaram entre 0,83 e 0,94, tendo o Ipê como a espécie que apresentou o valor e o Cedro foi a espécie que apresentou o maior. Menor fator de casca indica

maior proporção relativa de casca em relação ao diâmetro dos galhos. Em relação aos coeficientes de variação, indicaram uma baixa variabilidade dos dados, representando uma boa homogeneidade das amostras avaliadas. Os valores obtidos neste estudo foram bem próximos aos observados por Correia et al. (2017), que relatam média de 0,93 para fator de casca de fustes de espécies florestais. Do ponto de vista energético, essa característica é desejável, pois a madeira geralmente apresenta maior densidade energética, maior rendimento gravimétrico e menor produção de cinzas quando comparada à casca. Assim, espécies com maiores valores de K tendem a fornecer uma biomassa mais eficiente para processos de combustão e carbonização.

Tabela 3 – Fator de casca (K) e Teor de umidade inicial (%) das amostras

Espécie	Fator de casca (K)			Teor de umidade inicial (%)		
	Média	DP	CV (%)	Média	DP	CV (%)
Eucalipto (cavaco)	-	-	-	42,20	8,8135	20,88
Abacate	0,86	0,4212	4,80	62,23	1,9417	3,12
Ipê	0,83	0,0558	6,73	53,53	1,9273	3,60
Capitão-do-mato	0,93	0,0327	3,50	42,45	2,2103	5,21
Lofantera	0,92	0,0269	2,93	41,54	1,6247	3,91
Cedro	0,94	0,0190	2,02	37,73	1,1598	3,07
Jatobá-da-mata	0,87	0,0413	4,75	41,29	2,7187	6,58
Amoreira	0,92	0,0309	3,37	52,15	6,3961	12,27
Peroba	0,90	0,0525	5,86	44,83	1,7239	3,85

A Tabela 3 também apresenta o teor de umidade inicial das amostras, que é uma das principais propriedades físicas da biomassa, pois influencia o desempenho energético do material de forma direta, já que biomassas com maior umidade acabam consumindo parte da energia que deveria ser liberada durante a combustão, para realizar a evaporação da água, reduzindo o poder calorífico e dificultando a queima, para contornar essa situação demandaria maior tempo de armazenamento e área para secagem natural ou gastos superiores para a secagem artificial.

Como pode-se observar na Tabela 3, os valores médios de umidade inicial ficaram no intervalo entre 37,73% e 62,23%, sendo o menor valor obtido para as amostras de resíduos de Cedro e os maiores para as amostras de Abacate. A causa dessa variação pode estar correlacionada com diversos fatores, como características intrínsecas da espécie, estado fisiológico da árvore no momento da poda, condições ambientais na coleta e tempo de poda até a coleta dos resíduos.

Comparando-se os resultados, observou-se que grande parte das espécies apresentaram teores de umidade inicial abaixo aos relatados por Oliveira *et al*. (2005), que obtiveram valores médios entre 62% e 102%, ao avaliarem sete espécies de eucalipto.

4. Conclusões

A caracterização física de resíduos lenhosos oriundos de podas urbanas do município de Monte Carmelo/MG mostrou que o material amostrado possui potencial para ser reaproveitado para fins energéticos, embora existam diferenças entre as espécies avaliadas. Em relação a densidade básica, as espécies Lofantera e Jatobá-da-mata apresentaram os maiores valores. Já os resultados obtidos para o fator de casca (K) não apresentaram alta variabilidade entre as espécies. Em relação aos teores de umidade inicial, verificou-se com alta oscilação entre as espécies, o que evidencia necessidade de secagem prévia do material.

Outro fator observado neste trabalho, foi a disponibilidade dos resíduos de poda, o uso desse material para fins energéticos depende da adoção de estratégias de gestão, como por exemplo, formação de estoques, ampliação de área de coleta, planejamento e programação das podas.

A principal contribuição deste trabalho consiste em fornecer dados inéditos sobre densidade básica, fator de casca e teor de umidade inicial de resíduos de poda urbana de espécies arbóreas presentes no município de Monte Carmelo/MG, contribuindo para a avaliação técnica do potencial energético desses resíduos e para o desenvolvimento de estratégias de valorização da biomassa urbana no contexto da gestão municipal de resíduos sólidos.

Recomenda-se a realização de estudos futuros, que avaliem propriedades como o poder calorifico, aperfeiçoando a caracterização energética do material.

5. Agradecimentos

Os autores agradecem à Universidade Federal de Uberlândia – UFU pelo auxílio para a realização desta pesquisa, à professora Regina Maria Gomes pela orientação ao longo do desenvolvimento deste trabalho e ao Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica – PIBIC/UFU pela bolsa de iniciação científica, pois o apoio financeiro foi crucial para o desenvolvimento da pesquisa.

6. Referências bibliográficas

Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2003). NBR 11941: Madeira – Determinação da densidade básica. ABNT. Catálogo ABNT

Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2017). NBR 14929: Madeira – Determinação do teor de umidade de cavacos. ABNT. Catálogo ABNT

Brasil. (2010). Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm

Correia, J., Fantini, A., & Piazza, G. (2017). Equações volumétricas e fator de forma e de casca para florestas secundárias do litoral de Santa Catarina. Floresta e Ambiente, 24, e20150237. https://doi.org/10.1590/2179-8087.023715

Cortez, C. L., & Coelho, S. T. (2012). Estudo do potencial de geração de energia elétrica a partir de resíduos de poda de árvores urbanas. XII Safety, Health and Environment World Congress (SHEWC 2012), São Paulo, Brasil, p. 498–502. COPEC Proceedings – artigo 121

Dias, D. M., Martinez, C. B., & Barros, R. T. V. (2014). Estimativa da geração de resíduos sólidos urbanos como subsídio para ações voltadas à sustentabilidade ambiental. Revista Brasileira de Ciências Ambientais, (33), 13–22.

Husch, B., Miller, C. I., & Beers, T. W. (1982). Forest mensuration (3rd ed.). John Wiley & Sons.

Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo. (2022). Resíduo de poda de árvores urbanas: como reaproveitar? IPT. https://ipt.br/wp-content/uploads/2024/08/Residuo-de-poda.pdf

Nelo, L. M. A. (2020). Levantamento de dados para gestão de reaproveitamento dos resíduos da arborização urbana no município de São Bernardo do Campo. Engenharia Urbana em Debate, 4(1). https://doi.org/10.59550/engurbdebate.v4i1.83

Oliveira, J. T. S., Hellmeister, J. C., & Tomazello Filho, M. (2005). Variação do teor de umidade e da densidade básica na madeira de sete espécies de eucalipto. Revista Árvore, 29(1), 115–127. https://doi.org/10.1590/S0100-67622005000100013

Pena-Vergara, G., Castro, L. R., Gasparetto, C. A., & Bizzo, W. A. (2022). Energy from planted forest and its residues characterization in Brazil. Energy, 239, 122243. https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.122243

Ramos, R. D., Longue Júnior, D., Pereira, G. S., Silva, J. V. M., Valle, M. L. A., & Dias Júnior, A. F. (2024). Influência da densidade básica e da composição química da madeira para o processo de carbonização. *Ciência Florestal*, *34*(4), e87722. https://doi.org/10.5902/1980509887722

Silveira, L. H. C., Rezende, A. V., & Vale, A. T. (2013). Teor de umidade e densidade básica da madeira de nove espécies comerciais amazônicas. *Acta Amazonica*, 43(2), 179–184. https://sci-hub.st/10.1590/s0044-59672013000200007

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Caracterização físico-química de biochars produzidos a partir de casca de *Coffea arabica* L. e cavacos de *Eucalyptus* spp.

Kazuy Christine Meireles Martins[1]; Angélica de Cássia Oliveira Carneiro [1]; Dandara Paula da Silva Guimarães [1;] Ricardo Fernandes Pena[1]

[1] Departamento de Engenharia Florestal, Universidade Federal de Viçosa (UFV), Viçosa/MG,

Resumo: A produção de biochars a partir de biomassas lignocelulósicas representa uma alternativa para a valorização de biomassas e para o armazenamento de carbono. Este estudo objetivou avaliar e comparar as propriedades físico-químicas de biochars produzidos a partir de cascas de café (*Coffea arabica* L.) e cavacos de *Eucalyptus* spp. As biomassas foram submetidas à secagem em estufa a 103 ± 2 °C até massa constante e posteriormente pirolisadas em forno tipo mufla a 650 °C durante 60 min. Foram determinados o rendimento gravimétrico, a composição imediata, o pH e a condutividade elétrica dos biochars. Os resultados mostraram que o biochar de casca de café apresentou maior rendimento gravimétrico (34,1%) em comparação ao de *Eucalyptus* spp. (24,1%). Por outro lado, o biochar de *Eucalyptus* spp. apresentou maior teor de carbono fixo e menor teor de cinzas. As análises de pH e condutividade elétrica evidenciaram diferenças significativas entre os materiais, com maior pH para o biochar de *Eucalyptus* spp. e maior condutividade elétrica para o biochar de casca de café. Conclui-se que a biomassa de origem influenciou diretamente as propriedades dos biochars, sendo o material de *Eucalyptus* spp. caracterizado pelo maior teor de carbono fixo e menor teor de cinzas, enquanto o de casca de café apresentou maior presença de sais solúveis.

Palavras-chave: Pirólise; Composição Imediata; Biomassa Lignocelulósica

Physicochemical characterization of biochars produced from coffee husks and *Eucalyptus* spp. chips

Abstract: The production of biochars from lignocellulosic biomasses represents an alternative for biomass valorization through thermochemical conversion. This study aimed to evaluate and compare the physicochemical properties of biochars produced from coffee husks (*Coffea arabica* L.) and *Eucalyptus* spp. chips. The biomasses were dried in an oven at 103 ± 2 °C until constant mass and subsequently pyrolyzed in a muffle furnace at 650 °C for 60 min. Gravimetric yield, proximate composition, pH, and electrical conductivity of the biochars were determined.

The results showed that coffee husk biochar presented a higher gravimetric yield (34.1%) than *Eucalyptus* spp. biochar (24.1%). In contrast, *Eucalyptus* spp. biochar presented higher fixed carbon content and lower ash content. The pH and electrical conductivity analyses showed significant differences between the materials, with higher pH for *Eucalyptus* spp. biochar and higher electrical conductivity for coffee husk biochar. It is concluded that the biomass source directly influenced the properties of the biochars, with *Eucalyptus* spp. biochar showing higher fixed carbon content and lower ash content, while coffee husk biochar showed higher ash content and higher presence of soluble salts.

Keywords: Pyrolysis; Proximate Composition; Lignocellulosic Biomass

1. Introdução

A crescente geração e disponibilidade de biomassas lignocelulósicas provenientes das atividades agrícolas e florestais tem impulsionado a busca por alternativas tecnológicas capazes de promover sua valorização e reduzir impactos ambientais associados ao descarte ou ao aproveitamento inadequado desses materiais. Entre essas biomassas, destacam-se a casca de *Coffea arabica* L. e os cavacos de *Eucalyptus* spp., que apresentam composições químicas distintas e podem ser convertidos em produtos de maior valor agregado por meio de processos termoquímicos. Nesse contexto, a pirólise tem sido amplamente estudada por possibilitar a conversão da biomassa em biochar, material carbonáceo cujas propriedades físico-químicas variam em função da matéria-prima e das condições de produção (Lehmann & Joseph, 2015; Tomczyk et al., 2020).

As propriedades físico-químicas dos biochars, como rendimento gravimétrico, composição imediata, pH e condutividade elétrica, são fundamentais para compreender a qualidade e o comportamento químico dos materiais obtidos. Essas características são influenciadas pela composição da biomassa, especialmente pelos teores de lignina, holocelulose, extrativos e cinzas, bem como pela temperatura e pelo tempo de residência empregados durante a pirólise. Dessa forma, biomassas distintas podem originar biochars com diferentes proporções de carbono fixo, materiais voláteis, cinzas, sais solúveis e diferentes valores de pH e condutividade elétrica (Tomczyk et al., 2020; Ippolito et al., 2020; He et al., 2024).

A caracterização de biochars produzidos a partir de biomassas agrícolas e florestais é importante para indicar rotas mais adequadas de aproveitamento desses materiais. No caso da casca de café, a presença de constituintes minerais pode influenciar propriedades como teor de cinzas, pH e condutividade elétrica. Já os cavacos de *Eucalyptus* spp., por sua composição lignocelulósica, podem contribuir para a produção de biochars com maior teor de carbono fixo e menor teor de cinzas. Assim, a comparação entre esses materiais permite compreender como a biomassa de origem afeta a composição imediata e as propriedades químicas dos biochars produzidos.

Nesse contexto, este trabalho teve como objetivo avaliar e comparar as propriedades físico-químicas de biochars produzidos a partir de casca de *Coffea arabica* L. e cavacos de *Eucalyptus* spp., visando compreender a influência da biomassa de origem sobre o rendimento gravimétrico, a composição imediata, o pH e a condutividade elétrica dos materiais obtidos.

2. Material e métodos

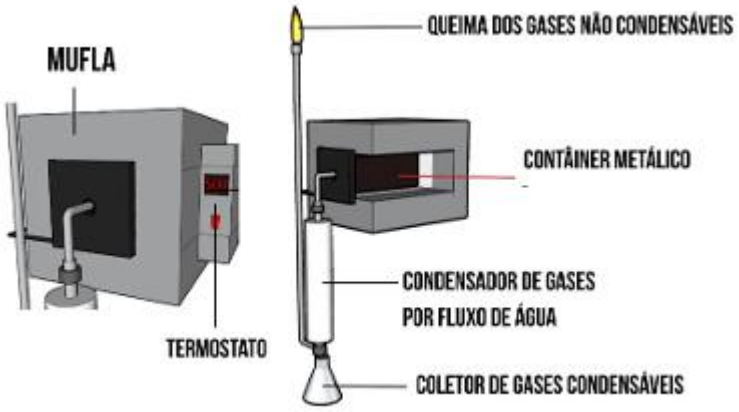
a. Matéria-prima

Foram utilizados resíduos de casca de *Coffea arabica* L. com tamanho médio de 3,8mm e cavacos de *Eucalyptus* spp. com altura de aproximadamente 18,51mm para a produção dos biochars. As biomassas foram previamente secas em estufa de circulação forçada de ar a 103 ± 2 °C até atingirem massa constante, visando à padronização da umidade antes do processo de pirólise.

b. Produção dos biochars

Os experimentos foram conduzidos considerando duas biomassas lignocelulósicas: casca de Coffea arabica L. e cavacos de Eucalyptus spp. As biomassas secas foram submetidas à pirólise em forno tipo mufla (GP Científica 2000), na condição de 650 °C e 60 min de residência. Foram realizadas três carbonizações independentes para cada biomassa, totalizando três repetições por tratamento.

Figura 29 – Sistema utilizado para a produção dos biochars em forno tipo mufla, composto por recipiente metálico, controle de temperatura e sistema de condução dos gases gerados durante a pirólise.



c. Caracterização dos biochars

Os biochars foram caracterizados quanto ao rendimento gravimétrico, composição química imediata, pH e condutividade elétrica. O rendimento gravimétrico foi determinado com base na relação entre a massa de biochar obtida após a pirólise e a massa inicial de biomassa seca utilizada no processo, conforme a Equação 1.

$$RG(\%) = \frac{M_b}{M_i} \times 100 \qquad (1)$$

Em que RG corresponde ao rendimento gravimétrico (%), Mb à massa de biochar obtida após a pirólise (g) e Mi à massa inicial de biomassa seca utilizada no processo (g).

A análise química imediata dos biochars foi realizada com base na norma ASTM D1762-84 (2021), determinando-se os teores de materiais voláteis (Equação 2) e cinzas (Equação 3). O teor de carbono fixo (Equação 4) foi calculado por diferença, conforme a ASTM D3172-13 (2021), a partir da subtração dos teores de materiais voláteis e cinzas em relação à massa total da amostra seca.

$$MV\,(\%) = \frac{M_i - M_f}{M_i} \times 100 \qquad (2)$$

Em que MV corresponde ao teor de materiais voláteis (%), Mi à massa inicial da amostra seca antes do aquecimento (g) e Mf à massa final da amostra após o aquecimento (g).

$$CZ\,(\%) = \frac{M_c}{M_i} \times 100 \qquad (3)$$

Em que CZ corresponde ao teor de cinzas (%), Mc à massa de cinzas obtida após a combustão completa da amostra (g) e Mi à massa inicial da amostra seca utilizada na análise (g).

$$CF\,(\%) = 100 - (MV + CZ) \qquad (4)$$

Em que CF corresponde ao teor de carbono fixo (%), MV ao teor de materiais voláteis (%) e CZ ao teor de cinzas (%).

A determinação do pH e da condutividade elétrica dos biochars foi realizada utilizando amostras com granulometria inferior a 2 mm e superior a 0,5 mm. Para o preparo da suspensão, foram adicionados 5 g de amostra em 100 mL de água deionizada, na proporção de 1:20 (m/v). A mistura foi mantida sob agitação a 150 rpm durante 1 hora, à temperatura de 25 °C, conforme metodologia adaptada de Singh et al. (2017). Em seguida, a suspensão permaneceu em repouso por 30 min antes da leitura do pH, realizada com auxílio de pHmetro digital. A condutividade elétrica foi determinada na mesma suspensão, utilizando-se condutivímetro Tecnal, modelo TEC-4MP.

d. Análise estatística

Após a realização das três carbonizações independentes à temperatura de 650 °C por 60 min, obteve-se a média dos valores de rendimento gravimétrico, composição química imediata, pH e condutividade elétrica. Os valores de pH e condutividade elétrica foram submetidos à análise de variância (ANOVA) em delineamento fatorial, considerando os fatores biomassa, temperatura e tempo de residência. Quando observadas diferenças significativas, as médias foram comparadas

pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. O rendimento gravimétrico foi determinado para cada repetição a partir da relação entre a massa de biochar obtida após a pirólise e a massa inicial de biomassa seca, sendo os resultados expressos como média das três repetições.

3. Resultados e discussão

A Tabela 1 apresenta as propriedades físico-químicas dos biochars produzidos a partir de casca de café (Coffea arabica L.) e cavacos de Eucalyptus spp. obtidos por pirólise a 650 °C durante 60 min. Observam-se diferenças expressivas entre os materiais, evidenciando que a biomassa de origem exerceu influência direta sobre as características dos biochars produzidos.

Tabela 1 - Propriedades físico-químicas dos biochars produzidos a partir de casca de café (*Coffea arabica* L.) e cavacos de *Eucalyptus* spp. a 650 °C por 60 min

Propriedades	*Coffea arabica* L.	*Eucalyptus* spp.
Rendimento Gravimétrico (%)	34,1	24,1
Materiais voláteis (%)	15,9	9,33
Carbono Fixo (%)	66,88	89,36
Cinzas (%)	17,22	1,31
pH	3,47 b	7,60 a
CE (mS cm^{-1})	5,91 a	0,08 b

Letras diferentes na mesma linha indicam diferença significativa pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$).

O biochar produzido a partir da casca de café apresentou rendimento gravimétrico superior (34,1%) ao obtido para Eucalyptus spp. (24,1%). Esse comportamento pode ser atribuído à composição química da biomassa, especialmente ao maior teor de extrativos e de cinzas presentes na casca de café, componentes que favorecem a permanência da fração sólida durante a pirólise. Em contrapartida, o maior teor de holocelulose do Eucalyptus spp. contribui para uma maior degradação térmica e formação de compostos voláteis, reduzindo o rendimento em biochar (Tomczyk et al., 2020; Ippolito et al., 2020).

As análises de pH e condutividade elétrica evidenciaram diferenças significativas entre os biochars. O material produzido a partir de *Eucalyptus* spp. apresentou pH significativamente superior ao obtido para a casca de café, enquanto esta apresentou maior condutividade elétrica, indicando maior concentração de sais solúveis.

De maneira geral, os biochars apresentaram diferenças marcantes em sua composição imediata. O biochar produzido a partir de cavacos de *Eucalyptus* spp. destacou-se pelo maior teor de carbono fixo, indicando maior concentração da fração carbonácea estável. Já o biochar de casca de café apresentou maior teor de cinzas e maior condutividade elétrica, características associadas à maior presença de constituintes minerais e sais solúveis. Esses resultados indicam que a biomassa de origem influencia diretamente a composição e as propriedades químicas dos biochars produzidos.

4. Conclusões

A caracterização físico-química dos biochars produzidos a partir de casca de Coffea arabica L. e cavacos de Eucalyptus spp. demonstrou que a biomassa de origem influenciou diretamente as propriedades dos materiais obtidos na condição de pirólise a 650 °C por 60 min. O biochar produzido a partir da casca de café apresentou maior rendimento gravimétrico, maior teor de cinzas e maior condutividade elétrica, indicando maior presença de constituintes minerais e sais solúveis em sua composição. Por outro lado, o biochar produzido a partir de cavacos de Eucalyptus spp. apresentou maior teor de carbono fixo, menor teor de cinzas e pH mais elevado, evidenciando maior concentração da fração carbonácea fixa e menor presença de constituintes minerais. Dessa forma, conclui-se que os biochars avaliados apresentam características físico-químicas distintas e complementares, reforçando a importância da caracterização dos materiais para orientar o aproveitamento adequado de diferentes biomassas na produção de biochars.

5. Agradecimentos

Este trabalho foi viabilizado, em parte, pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) - Processo APQ-05311-24; APQ-04599-25 e pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) - Processo n° 444395/2024-5.

6. Referências bibliográficas

ASTM International. (2021). ASTM D1762-84(2021): Standard test method for chemical analysis of wood charcoal. ASTM International.

ASTM International. (2021). ASTM D3172-13(2021): Standard practice for proximate analysis of coal and coke. ASTM International.

He, D., Luo, Y., & Zhu, B. (2024). Feedstock and pyrolysis temperature influence biochar properties and its interactions with soil substances: Insights from a DFT calculation. Science of the Total Environment, 922, 171259. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2024.171259

Ippolito, J. A., Cui, L., Kammann, C., Wrage-Mönnig, N., Estavillo, J. M., Fuertes-Mendizabal, T., Cayuela, M. L., Sigua, G., Novak, J., Spokas, K., & Borchard, N. (2020). Feedstock choice, pyrolysis temperature and type influence biochar characteristics: A comprehensive meta-data analysis review. Biochar, 2, 421–438. DOI: 10.1007/s42773-020-00067-x

Lehmann, J., & Joseph, S. (Eds.). (2015). Biochar for environmental management: Science, technology and implementation (2nd ed.). Routledge.

Singh, B., Dolk, M. M., Shen, Q., & Camps-Arbestain, M. (2017). Biochar pH, electrical conductivity and liming potential. Em B. Singh, M. Camps-Arbestain, & J. Lehmann (Eds.), Biochar: A guide to analytical methods (pp. 23–38). CSIRO Publishing.

Tomczyk, A., Sokołowska, Z., & Boguta, P. (2020). Biochar physicochemical properties: Pyrolysis temperature and feedstock kind effects. Reviews in Environmental Science and Bio/Technology, 19, 191–215. DOI: 10.1007/s11157-020-09523-3

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Caracterização fitoquímica da madeira de duas espécies da família Fabaceae: *Enterolobium contortisiliquum* e *Pterogyne nitens*

Ana Helise Abreu Rodrigues da Silva[1]; Hanna Lisa Leffever Ribeiro dos Santos[1]; Rickson Alves Marques de Oliveira[1]; Íris Rodrigues Malheiros[1]; Isabela Dias de Carvalho[1]; Rafael Lucas Marassi[1]; Ananias Francisco Dias Júnior[2]; Natália Dias de Souza[1]

[1] Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (UFRRJ)
[2] Universidade Federal do Espírito Santo (UFES)

Resumo: A caracterização fitoquímica de espécies florestais nativas é uma importante estratégia para a prospecção de compostos bioativos com potencial farmacológico e biotecnológico. Este estudo teve como objetivo caracterizar a composição química da madeira e de seus extrativos de *Enterolobium contortisiliquum* e *Pterogyne nitens*, espécies nativas da Mata Atlântica pertencentes à família Fabaceae. Foram determinados os teores de extrativos totais, holocelulose e lignina insolúvel, além da triagem fitoquímica dos extratos metanólicos. *E. contortisiliquum* apresentou maior teor de holocelulose (78,75%), enquanto *P. nitens* apresentou maiores teores de lignina (23,89%) e extrativos (2,30%). Ambas as espécies apresentaram alcaloides, compostos fenólicos, flavonoides, triterpenoides e saponinas. Taninos condensados e leucoantocianidinas foram detectados apenas em *P. nitens*, enquanto catequinas ocorreram em *E. contortisiliquum*. Os resultados indicam que ambas as espécies constituem fontes promissoras de metabólitos secundários com potencial farmacológico, biotecnológico e industrial, contribuindo para a valorização sustentável dos recursos florestais nativos e fortalecendo cadeias produtivas locais.
Palavras-chave: Triagem fitoquímica; Bioprospecção; Produtos naturais

Phytochemical Characterization of the Wood of Two Fabaceae Species: *Enterolobium contortisiliquum* and *Pterogyne nitens*

Abstract: The phytochemical characterization of native forest species is an important strategy for the prospecting of bioactive compounds with pharmacological and biotechnological potential. This study aimed to characterize the chemical composition of the wood and its extractives from *Enterolobium contortisiliquum* and *Pterogyne nitens*, native species of the Atlantic Forest belonging to the Fabaceae family. The contents of total extractives, holocellulose, and insoluble lignin were determined, in addition to the phytochemical screening of methanolic extracts. *E. contortisiliquum* showed a higher holocellulose content (78.75%), whereas *P. nitens* exhibited higher lignin (23.89%) and extractive contents (2.30%). Both species presented alkaloids, phenolic compounds, flavonoids, triterpenoids, and saponins. Condensed tannins and leucoanthocyanidins were detected only in *P. nitens*, while catechins occurred in *E. contortisiliquum*. The results indicate that both species represent promising sources of secondary metabolites with pharmacological, biotechnological, and industrial potential, contributing to the sustainable valorization of native forest resources and strengthening local production chains.

Keywords: Phytochemical screening; Bioprospecting; Natural products

1. Introdução

O conhecimento tradicional sobre plantas medicinais constitui uma importante fonte para a pesquisa em produtos naturais. Desenvolvido por povos indígenas e comunidades tradicionais ao longo de gerações, esse saber tem orientado a identificação de espécies com metabólitos secundários de interesse farmacológico. Entretanto, sua perda, decorrente de transformações socioculturais, reforça a necessidade de registro e valorização por meio da caracterização fitoquímica de espécies nativas brasileiras (MILLIKEN, 2021).

Os vegetais produzem metabólitos secundários, como alcaloides, flavonoides, compostos fenólicos, terpenoides e taninos, tornando a investigação fitoquímica relevante para a descoberta de moléculas com potencial terapêutico (ANGELINI, 2024). Na madeira, esses compostos ocorrem como extrativos e, embora em menor quantidade, influenciam características como cor, odor e resistência natural à degradação (ELSHAFIE; CAMELE; MOHAMED, 2023).

A caracterização química da madeira identifica seus principais constituintes, como celulose, hemicelulose, lignina e metabólitos secundários, fundamentais para suas funções estruturais e fisiológicas. Essas informações são relevantes diante da ampla biodiversidade florestal brasileira (APPEZZATO-DA-GLÓRIA; CARMELLO-GUERREIRO, 2006; ZHANG; LI; XU, 2022).

Dentre a variedade de espécies há duas que chamam atenção, como o *Enterolobium contortisiliquum* (Vellozo) Morong (*E. contortisiliquum*), conhecida popularmente como timboril ou timbaúva, possui importância ecológica e madeireira, rica em metabólitos secundários, como taninos e saponinas, cujos extratos apresentam potencial para modular a resistência bacteriana e potencializar a ação de antibióticos (CARVALHO, 2003; SILVEIRA et al., 2017) e a *Pterogyne nitens* Tulasne (*P. nitens*), conhecida como amendoim-bravo, que destaca-se por produzir compostos fenólicos e flavonoides associados à atividade anti-helmíntica, evidenciando seu potencial farmacológico para o controle de parasitos gastrointestinais (CARVALHO, 2003; LIMA et al., 2021).

Considerando o potencial farmacológico atribuído aos metabólitos secundários e a escassez de informações sobre a composição fitoquímica da madeira de espécies nativas da Mata Atlântica, este estudo teve como objetivo realizar o levantamento do perfil fitoquímico da

madeira de *Enterolobium contortisiliquum* e *Pterogyne nitens*, pertencentes à família Fabaceae, visando identificar as principais classes de metabólitos secundários presentes e contribuir para a prospecção de compostos bioativos com potencial aplicação farmacológica e biotecnológica.

2. Material e métodos

As amostras de madeira de *Enterolobium contortisiliquum* e *Pterogyne nitens* foram coletadas de quatro indivíduos adultos na Estação Experimental de Ciências Florestais de Anhembi (SP), em cinco posições ao longo do fuste (base, 25, 50, 75 e 100% da altura). As amostras de cada espécie foram homogeneizadas, formando uma amostra composta, e processadas em moinho de facas tipo Willey. Para as análises, utilizou-se a fração retida na peneira de 60 mesh e passante na de 40 mesh, conforme a norma TAPPI T204 cm-97 (TAPPI, 1997) e metodologia adaptada de Abreu et al. (2006).

Os extrativos foram obtidos a partir de 10 g de madeira homogeneizada, submetida à extração sequencial em aparelho Soxhlet com ciclohexano, acetato de etila e metanol (400 mL), durante 12 h para cada solvente. As análises foram realizadas em triplicata, e os extratos foram concentrados em rotavapor e secos em capela.

O percentual do teor de extrativo de cada uma das três etapas foi calculado pela divisão entre peso dos extrativos obtidos divido pela massa de serragem colocada no cartucho, multiplicou-se por 100 para obter sua porcentagem. Sendo o teor total, o somatório das porcentagens de cada fase da extração.

O material isento de extrativos passou por dois processos, determinação de holocelulose que foi determinado pelo método de cloração, sendo a amostra foi submetida à reação com clorito de sódio e ácido acético em banho-maria a 70 °C, com adições sucessivas dos reagentes até a separação completa das fibras, em seguida filtração a vácuo, seco em estufa (103 ± 2 °C, por 24 horas) e pesado.

Quantificação da lignina que foi realizada pelo método de Klason, utilizando 0,3g de madeira isenta de extrativos tratada com ácido sulfúrico 72%. Após repouso e refluxo por quatro horas, a lignina insolúvel foi filtrada a vácuo, lavada com água destilada aquecida e seca em estufa (103 °C ± 2 °C, por 24 horas). Os teores foram determinados a partir da razão entre a massa seca do componente isolado (holocelulose ou lignina) e a massa seca inicial da amostra de madeira, multiplicada por 100 para expressar o resultado em porcentagem.

Em relação à prospecção fitoquímica, os ensaios para a identificação das classes de metabólitos secundários presentes nos extrativos seguiram as metodologias propostas por

MATOS (1997). As análises foram feitas a partir do extrato hidrofílico (metanol) em triplicata. O extrato foi submetido a testes para a verificação de fenóis e taninos (reação com cloreto férrico), antocianinas, antocianidinas e flavonóides (teste de variação de pH, com hidróxido de sódio e ácido clorídrico), leucoantocianidinas, catequinas e flavonas (teste de variação de pH e aquecimento, com hidróxido de sódio e ácido clorídrico), flavonóis, flavanonas, flavanonois e xantonas (teste de Shinoda), esteroides e triterpenóides (teste de Lierbemann – Burchard), saponinas (teste de espuma), resinas (teste de turvação do extrato) e alcalóides (reação com Dragendorff e Mayer).

3. Resultados e discussão

Ao realizar a caracterização química quantitativa das madeiras das espécies de *Enterolobium contortisiliquum* e *Pterogyne nitens* foram constatados os seguintes valores médios de holocelulose, lignina e extrativos totais (Tabela 1).

Tabela 1 – Composição química da madeira de espécies da Mata Atlântica: holocelulose, lignina e extrativos e seus respectivos Desvio Padrão (%) em relação a replicabilidade do experimento em triplicatas.

Componentes da madeira	*E.contortisiliquum*	*P.nitens*
Holocelulose (%)	78,75 (2,06)	65,47 (2,41)
Lignina Insolúvel (%)	15,56 (3,33)	23,89 (2,75)
Extrativos Total (%)	1,27 (0,42)	2,30 (0,17)

A madeira de *Enterolobium contortisiliquum* apresentou o maior teor de holocelulose (78,75%), enquanto *Pterogyne nitens* apresentou os maiores teores de lignina (23,89%) e de extrativos (2,30%) (Tabela 1).

A holocelulose é o principal constituinte afetado pelo tratamento térmico da madeira, devido à maior suscetibilidade das hemiceluloses à degradação em altas temperaturas (CARNEIRO *et al.*, 2023). Em contrapartida, madeiras com elevados teores desse componente são indicadas para a produção de lâminas, pois a laminação utiliza água para amolecer a madeira, aumentando sua plasticidade e trabalhabilidade (HUANG *et al.*, 2024). As madeiras de *E. contortisiliquum* apresentaram maior teor de holocelulose que *E. urophylla* (77,60%), indicando potencial para maior rendimento na produção de polpa celulósica. (DOS SANTOS *et al.*, 2016).

Obteve-se para espécie *E.contortisiliquum* teores de 15,56% (±3,33) de lignina e 1,27% (±0,42) de extrativos, ambos inferiores aos obtidos por Cintra (2009) que verificou para espécie teores 21,2% de lignina e 14,5% de extrativos. De acordo com autor a espécie apresentou alto poder calorífico, sugerindo seu potencial uso para a produção energética, com a necessidade de

estudos continuados para seleção de genótipos superiores em função da variabilidade nos resultados obtidos entre indivíduos.

Os teores de 65,47% (± 2,41) de holocelulose e 23,89% (± 2,75) de lignina encontrados na madeira de *P.nitens* estão de acordo com os valores de 65,4% de holocelulose, 28,4% de lignina e 5,9% de extrativos encontrados por Amorim *et al.* (2023). Pereira *et al.* (2019) encontrou ao estudar o potencial de polpação da *P.nitens* os seguintes valores, 66,6% de holocelulose, 26,5% de lignina total e 7,3% de extrativos, sugerindo que a espécie não é uma boa alternativa para a produção de polpa celulósica, pois apresenta teor de extrativos maior os relatados por Gomide *et al.* (2005) para várias espécies de eucaliptos utilizadas por empresas brasileiras de polpa celulósica (1,76 à 4,13%).

As variações nos valores encontrados podem estar relacionadas a fatores como idade e posição no tronco, que influenciam a composição química da madeira, especialmente os teores de holocelulose e extrativos (ESTEVES *et al.*, 2022).

A fim de identificar as principais classes de metabólitos presentes nas espécies da Mata Atlântica e ampliar o conhecimento sobre as suas possíveis aplicações foi realizada a prospecção fitoquímica (Tabela 2).

Tabela 2 – Triagem fitoquímica em extrato hidrofílico de espécies da família Fabaceae

Constituintes	*P. nitens*	*E. contortisiiliquum*
Alcaloides	+	+
Taninos Condensados	+	-
Fenóis	+	+
Flavonas, Flavonóis, Xantonas	+	+
Flavononóis	+	-
Leucoantocianidinas	+	-
Catequinas	-	+
Flavanonas	+	+
Flavonóis, Flavanonas, Flavanonóis e Xantonas	+	+
Triterpenóides	+	+
Saponinas	+	+

A espécie *E.contortisiliquum* positivou para as seguintes classes de compostos: alcaloides, fenóis, flavonas, flavonóis, xantonas, flavanonas e flavanonóis, catequinas, triterpenoides e saponinas (Tabela 2). Resultados condizentes com Barros *et al.* (2023) que ao estudar o potencial dos extratos das sementes de *E.contortisiliquum* como ovicida e larvicida do *Aedes aegypti* encontrou a presença de fenóis, flavonas, flavonóis, flavanonas e xantonas. Além desses compostos, sementes e cascas de frutos apresentaram taninos hidrolisáveis, saponinas,

triterpenoides, cumarinas e alcaloides. Estudos fitoquímicos identificaram dez substâncias, incluindo sete triterpenos, e as favas da espécie são associadas à intoxicação de bovinos e à ação abortiva (MIRANDA *et al.*, 2015; JÚNIOR *et al.*, 2021).

As classes de compostos presentes no extrato hidrofílico de *P.nitens* foram: alcaloides, taninos condensados, fenóis, flavonas, flavonóis, xantonas, flavanonóis, flavanonas, leucoantocianidinas, triterpenoides e saponinas (Tabela 2). Esses resultados assemelham-se aos dados encontrados por Sakita & Vallilo (1990) na casca e no lenho de *P.nitens* (saponinas, taninos, alcaloides, cumarinas, flavonoides, esteroides, antraderivados e triterpenoides). Regasani (2008) encontrou 26 metabólitos ao conduzir um estudo químico dos caules, frutos e flores de *P.nitens*, dentre essas substâncias incluem-se alcaloides guanidinicos, flavonoides e ácidos fenólicos que apresentaram atividades antitumoral, ação hemolítica, atividade antifúngica e potencial anti-inflamatório. Outros potenciais farmacológicos para essas classes foram identificados, tais como funções antidiabéticas e tratamento de leishmanioses (MAYER *et al.*, 2024).

Os resultados obtidos com *P. nitens* indicaram que a espécie constitui uma fonte promissora de compostos bioativos, especialmente ácidos fenólicos e flavonoides, com potencial para integrar estratégias sustentáveis de controle parasitário e reduzir a dependência de fármacos convencionais (LIMA *et al.*, 2021)

Ambas as espécies estudadas da família Fabaceae da mata atlântica apresentaram resultados positivos para as seguintes classes de compostos: alcaloides, flavonas, flavonóis, xantonas, flavanonas, triterpenóides e saponinas.

Os alcaloides representam a classe de metabolitos com maior diversidade estrutural, sendo bastante ativos em plantas. Essa classe é famosa pela presença de substâncias que possuem efeito acentuado no sistema nervoso, sendo muitas delas utilizadas como venenos ou alucinógenos (DE LIMA *et al.*, 2025). Os compostos fenólicos (flavanonóis, flavanonas, flavonóis, flavanonas, flavanonois e xantonas) correspondem à classe de metabólitos secundários na qual se encontra a maior parte dos compostos com atividade alelopática, controle de hormônio vegetais e inibição de enzimas (SIMÕES *et al.*, 2016).

As saponinas são associadas a diversas atividades biológicas, incluindo ações hemolítica, antiviral, anti-inflamatória, expectorante, cicatrizante, imunomoduladora, antimicrobiana e antioxidante. Além disso, despertam interesse pelo potencial citotóxico e antitumoral, por induzirem apoptose, modularem vias de sinalização celular e inibirem a proliferação de células

tumorais. Apesar dos resultados promissores, ainda são necessários estudos clínicos para confirmar sua eficácia e segurança em humanos (PODOLAK *et al.*, 2023).

As catequinas identificadas em *Enterolobium contortisiliquum* apresentam atividades antioxidante e anti-inflamatória, com potencial na prevenção de doenças crônicas. Contudo, estudos clínicos adicionais são necessários para confirmar sua eficácia e segurança em humanos (ANSARI *et al.*, 2025).

Esse estudo compara diferentes partes da planta em relação aos seus metabólitos secundários na literatura e o conhecimento desses compostos presentes nos extrativos da madeira das espécies da Mata Atlântica, nos permite buscar opções mais adequadas para a sua exploração comercial e ao mesmo tempo realizar um manejo sustentável incentivando a preservação desse bioma.

4. Conclusões

- A caracterização química da madeira de *Enterolobium contortisiliquum* e *Pterogyne nitens* evidenciou diferenças na composição dos constituintes estruturais e no perfil fitoquímico entre as espécies.
- *E. contortisiliquum* apresentou maior teor de holocelulose, enquanto *P. nitens* apresentou maiores teores de lignina e extrativos.
- A triagem fitoquímica revelou a presença de diferentes classes de metabólitos secundários, como alcaloides, compostos fenólicos, flavonoides, triterpenoides, saponinas e catequinas, reconhecidos por apresentarem importantes atividades biológicas descritas na literatura.
- As madeiras dessas espécies nativas da Mata Atlântica representam uma fonte promissora de metabólitos de interesse farmacológico e biotecnológico, contribuindo para a valorização de seus extrativos e para o aproveitamento sustentável dos recursos florestais.
- São necessários estudos complementares para o isolamento, identificação, quantificação e avaliação da atividade biológica dos compostos presentes, visando confirmar seu potencial de aplicação.

5. Agradecimentos

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela concessão da bolsa de Iniciação Científica, que possibilitou o desenvolvimento desta pesquisa.

6. Referências bibliográficas

Abreu, H. S., Carvalho, A. M., Monteiro, M. B. O., Pereira, R. P. W., Silva, H. R., Souza, K. C. A., Amparo, K. F., & Chalita, D. B. (2006). *Métodos de análise química da madeira*. Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro.

Amorim, G. A., Santos Junior, A. J. dos, Jacobem, R. A., Câmara, A. P., Pereira, A. K. S., & Dias Júnior, A. F. (2023). *Madeiras neotropicais de plantios de restauração florestal como matéria-prima de múltiplos produtos*. **Série Técnica IPEF, 26**(48), 29–33. https://doi.org/10.18671/sertec.v26n48.005

Angelini, P. (2024). Plant-derived antimicrobials and their crucial role in combating antimicrobial resistance. *Antibiotics, 13*(8), 746. https://doi.org/10.3390/antibiotics13080746

Ansari, P., Reberio, A. D., Ansari, N. J., Kumar, S., Khan, J. T., Chowdhury, S., Abd El-Mordy, F. M., Hannan, J. M. A., Flatt, P. R., Abdel-Wahab, Y. H. A., et al. (2025). Therapeutic potential of medicinal plants and their phytoconstituents in diabetes, cancer, infections, cardiovascular diseases, inflammation and gastrointestinal disorders. *Biomedicines, 13*(2), 454. https://doi.org/10.3390/biomedicines13020454

Appezzato-da-Glória, B., & Carmello-Guerreiro, S. M. (Eds.). (2006). *Anatomia vegetal* (2nd ed.). Editora UFV.

Barros, F., Azevedo, F. R., Cândido, E. L., Alencar, C., Pereira Júnior, F. N., & Rodrigues, A. R. S. (2023). Phytochemical prospection, hemagglutinating and insecticidal activity of saline extracts from the seeds of *Enterolobium contortisiliquum* (Vell.) Morong (Fabaceae) on *Aedes aegypti* (Diptera: Culicidae). *Brazilian Journal of Biology, 83*, e274635. https://doi.org/10.1590/1519-6984.274635

Carneiro, M. E., Ribeiro, A. O., Protásio, T. P., Trugilho, P. F., Vieira, H. C., & Hein, P. R. G. (2023). *Effects of thermal treatment on the physical, chemical, anatomical, and thermal properties of* Fraxinus excelsior *wood*. *Wood Material Science & Engineering*. Advance online publication. https://doi.org/10.1080/17480272.2023.2281950

Carvalho, P. E. R. (2003). *Espécies arbóreas brasileiras* (Vol. 1). Embrapa Informação Tecnológica.

Cintra, T. C. (2009). *Avaliações energéticas de espécies florestais nativas plantadas na região do Médio Paranapanema, SP* (Dissertação de mestrado, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo). Universidade de São Paulo.

de Lima, E. P., Laurindo, L. F., Catharin, V. C. S., et al. (2025). Polyphenols, alkaloids, and terpenoids against neurodegeneration: Evaluating the neuroprotective effects of

phytocompounds through a comprehensive review of the current evidence. *Metabolites*, *15*(2), 124. https://doi.org/10.3390/metabo15020124

dos Santos, R., de Mello Júnior, J. A., Caraschi, J. C., Ventorim, G., & Pereira, F. A. (2016). Polpação kraft e kraft/AQ da madeira pré-hidrolisada de híbrido de *Eucalyptus urophylla* × *Eucalyptus grandis*. *Ciência Florestal*, *26*(4), 1281–1290. https://doi.org/10.5902/1980509825124

Elshafie, H. S., Camele, I., & Mohamed, A. A. (2023). A comprehensive review on the biological, agricultural and pharmaceutical properties of secondary metabolites of plant origin. *International Journal of Molecular Sciences, 24*, 3266. https://doi.org/10.3390/ijms24043266

Esteves, B., Cruz-Lopes, L., Viana, H., Ferreira, J., Domingos, I., & Nunes, L. J. R. (2022). The influence of age on the wood properties of Paulownia tomentosa (Thunb.) Steud. Forests, 13(5), 700. https://doi.org/10.3390/f13050700

Gomide, J. L., Colodette, J. L., Oliveira, R. C. de, & Silva, C. M. (2005). Caracterização tecnológica, para produção de celulose, da nova geração de clones de *Eucalyptus* do Brasil. *Revista Árvore*, *29*(1), 129–137. https://doi.org/10.1590/S0100-67622005000100014

Huang, Y., Hu, J., Peng, H., Chen, J., Wang, Y., Zhu, R., Yu, W., & Zhang, Y. (2024). *A new type of engineered wood product: Cross-laminated-thick veneers*. *Case Studies in Construction Materials, 20*, e02753. https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e02753

Júnior, J. J. A., Smiljanic, K. B. A., de Lima Netto, A. M., et al. (2021). Plantas tóxicas de importância pecuária na região de Perolândia-GO. *Brazilian Journal of Development*, *7*(7), 74029–74045.

Lima, C. S., Pereira, M. H., Gainza, Y. A., Hoste, H., Regasini, L. O., & Chagas, A. C. S. (2021). Anthelmintic effect of *Pterogyne nitens* (Fabaceae) on eggs and larvae of *Haemonchus contortus*: Analyses of structure–activity relationships based on phenolic compounds. *Industrial Crops and Products, 164*, 113348. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2021.113348

Matos, F. J. A. (1997). *Introdução à fitoquímica experimental* (2nd ed.). EUFC.

Mayer, A. M. S., Rodríguez, A. D., Taglialatela-Scafati, O., & Fusetani, N. (2024). *Marine pharmacology in 2019–2021: Marine compounds with antibacterial, antidiabetic, antifungal, anti-inflammatory, antiprotozoal, antituberculosis, and antiviral activities; affecting the immune and nervous systems, and other miscellaneous mechanisms of action*. *Marine Drugs, 22*(1), 9. https://doi.org/10.3390/md22010009

Milliken, W. (2021). Traditional medicines amongst indigenous groups in Roraima, Brazil: A retrospective. *Ethnoscientia, 6*(3). https://doi.org/10.18542/ethnoscientia.v6i3.10503

Miranda, M. L. D., Garcez, F. R., & Garcez, W. S. (2015). Triterpenos e outros constituintes dos frutos de *Enterolobium contortisiliquum* (Vell.) Morong (Fabaceae). *Revista Virtual de Química, 7*(6), 2597–2605.

Pereira, A. K. S., Longue, D., Mafra, C. D. S., Colodette, J. L., & Gomes, F. J. B. (2019). Determinação da composição química e potencial de polpação da madeira *Pterogyne nitens* Tul. *Ciência Florestal, 29*(4), 1490–1500.

Podolak, I., Grabowska, K., Sobolewska, D., Wróbel-Biedrawa, D., Makowska-Wąs, J., & Galanty, A. (2023). Saponins as cytotoxic agents: An update (2010–2021). Part II—Triterpene saponins. *Phytochemistry Reviews, 22*, 113–167. https://doi.org/10.1007/s11101-022-09830-3

Regasini, L. O. (2008). *Estudo químico de* Pterogyne nitens *(Caesalpinioideae), síntese e potencial farmacológico de alcaloides guanidínicos e análogos* (Tese de doutorado, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho").

Sakita, M. N., & Vallilo, M. I. (1990). Estudos fitoquímicos preliminares em espécies florestais do Parque Estadual do Morro do Diabo, Estado de São Paulo. *Revista do Instituto Florestal, 2*(2), 215–226. https://doi.org/10.24278/2178-5031.199022164

Silveira, Z. S., et al. (2017). Antibacterial enhancement of antibiotic activity by *Enterolobium contortisiliquum* (Vell.) Morong. *Asian Pacific Journal of Tropical Biomedicine, 7*(10), 945–949. https://doi.org/10.1016/j.apjtb.2017.09.006

Simões, C. M. O., Schenkel, E. P., de Mello, J. C. P., Mentz, L. A., & Petrovick, P. R. (2016). *Farmacognosia: Do produto natural ao medicamento*. Artmed.

Technical Association of the Pulp and Paper Industry. (1997). *TAPPI T204: Solvent extractives of wood and pulp*. TAPPI Press.

Zhang, X., Li, L., & Xu, F. (2022). Chemical characteristics of wood cell wall with an emphasis on ultrastructure: A mini-review. *Forests, 13*(3), 439. https://doi.org/10.3390/f13030439

Caracterização macroscópica de madeiras de Lecythidaceae amazônicas:subsídiosàidentificaçãoeàfiscalizaçãoflorestal

YasminAraújodosSantos[1];YohanaBarrosSilva[1];KarolayneOliveiradaSilva[1];Mayla Carvalho Costa[1]; Amanda Carvalho de Melo[1]; Carlos Eduardo da Silva Fernandes[1]; Fernanda Ilkiu Borges de Souza[2]; Luiz Eduardo de Lima Melo[1]

[1]UniversidadedoEstadodoPará-CampusVIII,CentrodeCiênciasNaturaiseTecnologia,Xiloteca Joaquim Ivanir Gomes (JIGw)

[2]Embrapa Amazônia Oriental. DepartamentodeBotânica. Xiloteca doInstitutoAgronômicodoNorte (IAN)

Resumo: Aexploraçãoilegaldemadeirana Amazôniareforçaanecessidadedemétodosconfiáveisparaaidentificaçãodeespéciescomercializadas.Esteestudotevecomoobjetivodescreverosprincipaiscaracteresmacroscópicosdamadeiradeespéciesde Lecythidaceaeeavaliarsuaaplicaçãonaidentificaçãotaxonômica,visandoapoiarafiscalizaçãoflorestalnoestadodoPará.Foramanalisadasseisespéciesda Xiloteca "Joaquim Ivanir Gomes" (JIGw),utilizandolupaconta-fios(10x)eestereomicroscópio.Asespéciesapresentaramdiferençasnascamadas de crescimento, vasos, parênquima axial, raios ecanais secretores.*Bertholletiaexcelsa*exibiucaracteresdiagnósticosfacilmenteobserváveis,enquantoespéciesde*Couratari*exigiramampliação óptica para diferenciação. A combinação desses caracteres permitiudistinguirasespéciesavaliadas,demonstrandoqueaanatomiamacroscópicaéeficienteparaaidentificaçãopreliminardemadeirasdeLecythidaceaeeparaapoiaraçõesdefiscalizaçãoflorestal.

Palavras-chave: Monitoramento,Anatomia,Conservação.

MacroscopicCharacterization of AmazonianLecythidaceae Wood:Support for Wood Identification and Forest Law Enforcement

Abstract: Illegal logging in the Amazon reinforces the need for reliable methods to identify commercialtimber species. This studyaimed to describe the main macroscopic wood characters of Lecythidaceae species and evaluate their application in taxonomic identificationtosupportforestinspectioninthestateofPará,Brazil.Sixspeciesfromthe "Joaquim Ivanir Gomes" Wood Collection (JIGw) were analyzed using a 10x thread-countinglensandastereomicroscope.Thespeciesdifferedingrowthrings,vessels,axial parenchyma, rays, and secretorycanals.*Bertholletia excelsa*exhibited easilyobservable diagnostic characters, whereas*Couratari*species required optical magnification for differentiation. The combination ofthese characters allowed the evaluated species to be distinguished,demonstratingthatmacroscopicwoodanatomyiseffectiveforpreliminary identification of Lecythidaceae timber and for supporting forest inspection efforts.

Keywords: Monitoring,Anatomy,Conservation.

1. Introdução

Osregistrosdemonitoramentoporsatélitepublicadospelo Imazon, emsetembro de2024, indicaramamaiordegradaçãoflorestaldosúltimos15anos,chegandoa20.238 km².OEstadodoParáconcentrou57%dessadegradação,passandode196km²para 11.558 km² em um intervalo de um ano (Amorim et al., 2024). A extração ilegal de madeiraeousoexcessivodosrecursosflorestaiscontribuemsignificativamenteparaesse cenário, resultando na redução da diversidade biológica e em sérios riscos aos ecossistemas globais (Reboredo, 2013; Souza & Prevedello, 2020).

Em todo o território nacional, a legalidade da madeira transportada é verificada por meio do Documento de Origem Florestal (DOF), principal instrumento de fiscalização e monitoramento da cadeia produtiva da madeira no Brasil (Brasil, 2017). Nesse contexto, a correta identificação taxonômica da madeira constituietapa essencial paraverificaracompatibilidadeentreomaterialtransportadoeasinformaçõesconstantes na documentação florestal. Embora diferentes técnicas possam ser empregadas na identificação deespécies,aanatomiada madeiraéamplamenteempregadaemperíciase ações de fiscalização, por aliar confiabilidade, rapidez e aplicabilidade na triagem de produtos florestais (Dormontt et al., 2015; Low et al., 2023).

A análise anatômica permite reconhecer caracteres diagnósticos úteis à diferenciação taxonômica mesmo após o processamento da madeira, por meio da comparação de elementos celulares, como parênquima, vasos e raios (Mainieri &

Chimelo, 1989;Gasson, 2011).Entreasabordagensanatômicas, aanálise macroscópica se destaca como método eficiente para a triagem inicial de toras comercializadas, mediante o exame visual das superfícies transversal, radial e tangencial (Alves, 2012; Gontijo, 2017; Zenid, 2008).

No entanto, a identificação precisa é um desafio para grupos como as Lecythidaceae, que incluem 10 gêneros no Brasil (Jardim Botânico do Rio de Janeiro, 2024). A similaridade entre espécies e a escassez de estudos anatômicos dificultam sua identificação, inclusive entre gêneros distintos, especialmente em campo (Bernal et al., 2011). Além de sua importância ecológica na Amazônia, diversas espécies apresentam elevado valor comercial e são frequentemente exploradas e transportadas na cadeia produtiva da madeira, reforçando a necessidade de informações sobre seus caracteresdiagnósticos.

Dessa forma, ageraçãodeinformaçõesanatômicascontribuiparao

aperfeiçoamento da identificação em campo e subsidiar ações de fiscalização florestal. Assim, este estudo teve como objetivo identificar e descrever os principais caracteres macroscópicos da madeira de espécies de Lecythidaceae, visando subsidiar sua identificação e fortalecer as ações de fiscalização florestal no estado do Pará.

2. Materialemétodos

Foramavaliadosseisespéciesdafamília Lecythidaceae,provenientesdaXiloteca "Joaquim Ivanir Gomes" (JIGw), da Universidade do Estado do Pará (UEPA), representativos de espécies de interesse comercial na Amazônia.

Descrições macroscópicas da madeira foramrealizadas, seguindo a metodologia padrão para o estudo (IAWA Committee, 1989). Fotomacrografias das superfícies transversais das amostras foram obtidas e utilizadas para a documentação das características anatômicas observadas.A caracterização anatômica macroscópica foi realizadacomlupaconta-fios(10x)eestereomicroscópioLeicaMZ16acopladoacâmera digital Leica.

Adescriçãoeasmensuraçõesanatômicasmacroscópicasdetalhadas,distinçãodas camadas de crescimento; parênquima axial, visibilidade e tipo; raios, visibilidade, frequência, espaçamento, estratificação, altura, largura; vasos, tipos, distribuição, diâmetro tangencial, frequência e obstrução, foram realizadas segundo as Normas de Procedimentos em Estudos de Anatomia de Madeira do IBAMA (Coradin & Muniz,1992).



Figura1-(a)Lixasdecinta,(b)Processo depolimentodasamostras, (c)Estereomicroscópio.

3. Resultadosediscussão

A análise macroscópica das madeiras da família Lecythidaceae evidenciou diferenças anatômicas relevantes entre as seis espécies avaliadas do acervo da Xiloteca JIGw (*Couratari guianensis, Couratari oblongifolia, Lecythis pisonis, Lecythis lurida, Bertholletia excelsa*e*Eschweilera grandiflora*), permitindo reconhecer caracteres diagnósticos úteis para sua diferenciação taxonômica (Tabela 2). Esses resultados demonstramque a combinação de diferentes caracteres anatômicos, e não a observação isolada de uma única característica, constitui a principal estratégia para a identificação macroscópica de espécies de Lecythidaceae, especialmente em grupos com elevada similaridade estrutural.

Tabela2.Característicasanatômicasgeraisemacroscópicasdeespéciesdafamília Lecythidaceae que compõem acervo da xiloteca Joaquim Ivanir Gomes (JIGw)

Característicaanatômica Gênero/Espécie	*Couratari guianensis*	*Couratari oblongifolia*	*Lecythis pisonis*	*Lecythis iurida*	*Bertholletia excelsa*	*Eschweilera grandiflora*
CAMADADECESCIMENTO						
Distinta			x		x	x
Indistinta	x	x		x		
VASOS						
Visibilidade						
Visibilidade a olho nu	x	x	x	x	x	x
Visibilidadesomentesoblente10 x						
Diâmetrotangencial(*)						
Muitopequenos:≤0,05.Pequenos: 0,06 a 0,1.				x	x	
Médios:0,11a0,2.	x	x				x
Grandes: 0,21a0,30.Muitograndes:≥ 0,31.			x			
Frequênciadevasoem10mm²(**)						
Muitopoucos:≤12.Poucos: 13 a 30.						
Pouconumerosos:31a65.		x	x		x	x
Numerosos:66a125.	x			x		
Muitonumerosos:126a250.						
Numerosíssimos:≥ 251.						
Disposição(agrupamento)						
Solitário						
Múltiplosemcadeiasradiaiscurtas (2–4 vasos)	x	x	x	x	x	x
Múltiplosemlongascadeias radiais(5vasos)	x	x	x		x	x
Porosidade						
Difusa						x
Anelporoso						
Anelsemiporoso	x	x	x	x	x	x
Arranjo						
TangencialRadial Diagonal	x	x	x	x	x	x
Dentrítico						
Obstrução						
Vasosdesobstruídos						
Vasos	x	x	x		x	

obstruídos*Gomas*						
Tilos	x	x	x	x	x	x
	x	x	x		x	x
PARÊNQUIMAAXIAL						
Visibilidade						
Visívelaolhonu					x	
Comlentedemão10x	x	x	x	x		x
Tipos						
Emfaixareticuladocontrastado					x	x
Emlinhareticuladopouco contrastado	x13,	x8,	x7,	x13,		
Frequênciadeparênquimaa 1mm^2(***)(quantidade/média)	2	2	8	6	8,3	8,4
RAIOS						
Visibilidade						
Visibilidadeaolhonu						
Visibilidadesomentesoblente10x	x	x	x	x		
Contraste					x	
Contrastado			x	x		
Poucocontrastado		x				x
Larguraderaio(mm)	x					x
fino:≤0,05						
Médio:0,06a0,1					x	
Moderadamentelargos:0,11a0,2						
Muitolargos: 0,21a0,4		x				
Extremamentelargos: ≥0,41				x		
Frequênciaderaioem5mm						
Muitopouco:≤25	x		x			x
Pouco: 25 a 50			x			
Numerosos51a80		x			x	
Muitonumerosos:≥81						
CANAISSECRETORES				x		x
Canalaxial(Presenteouausente)						
Normal	x				x	
Difuso						
Emlinhastangenciais						
Traumático						
		x				
			x	x		
	x					x
					x	

Entre as espécies analisadas,*Bertholletia excelsa*apresentou caracteres macroscópicos mais evidentes de identificação, pois camadas de crescimento, vasos,

parênquimaaxialeraiospuderamserobservadosaolhonu,favorecendosuaidentificação em campo e em laboratório.

No gênero*Lecythis*, observaram-se diferenças macroscópicas diagnósticas.*Lecythis pisonis*apresentou vasos grandes, com diâmetro tangencial entre 0,21 e 0,30 mm, enquanto*Lecythis iurida*apresentou vasos predominantemente solitários e obstruídos por gomas, características úteis para sua distinção. Em*Eschweilera*

grandiflora,verificou-seaocorrênciasimultâneadegomasetilosnosvasos,atributoque a diferencia das demais espécies. A utilização conjunta desses caracteres aumenta a confiabilidadedaidentificação,reduzindo apossibilidadede interpretaçõesequivocadas baseadas em características anatômicas isoladas.

Embora*Couratari guianensis*e*Couratari oblongifolia*apresentem elevada similaridade anatômica, a observação comlente de aumento de 10xpermitiu diferenciá-las pela frequência de vasos e raios e pelo tipo de canal secretor.*Couratari guianensis*apresentou canais traumáticos, enquanto*Couratari oblongifolia*apresentou canais secretores em linhas tangenciais, evidenciando a importância da ampliação óptica na identificação dessas espécies.

Demodogeral,acombinação decaracterísticascomo visibilidadedasestruturas, diâmetro e frequência dos vasos, tipos de parênquima axial, frequência dos raios e ocorrência de canais secretores permitiu reconhecer padrões anatômicos úteis para distinguir as espécies estudadas, conforme evidenciado nas comparações visuais apresentadas na Figura 2. Precisa discutir as imagens da Figura 2, demonstrando os elementos encontrados.

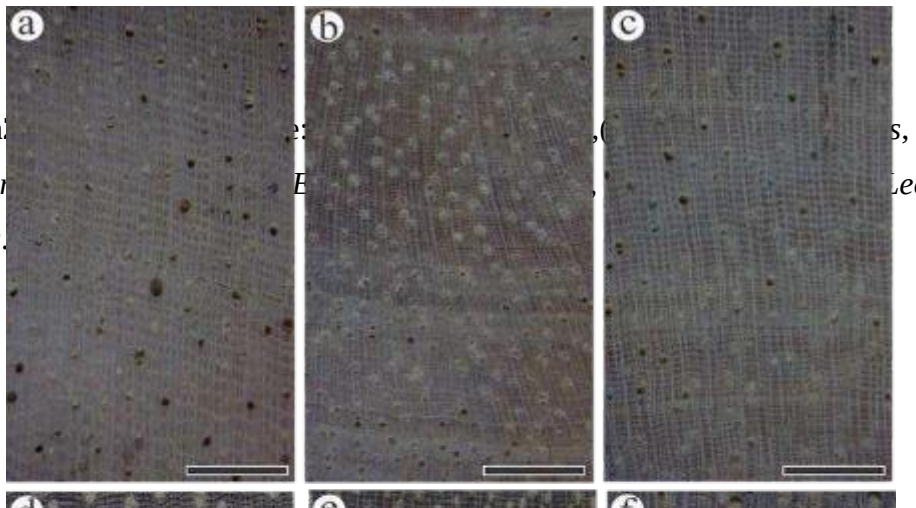


Figura s, (c)*Cou* *Lecythis pisonis*.

4. Conclusões

A análise macroscópica das madeiras de Lecythidaceae permitiu reconhecer caracteres anatômicos diagnósticos capazes de diferenciar as seis espécies avaliadas, demonstrando que a combinação de atributos como vasos, parênquima axial, raios e canais secretores constitui um critério eficiente para sua identificação.

Osresultadosevidenciamqueaanatomia macroscópicarepresentauma ferramentaútil para a triagem inicial de madeiras da família Lecythidaceae, contribuindo para estudosanatômicoseapoiando açõesdefiscalização econtroledo comércio deprodutos florestais na Amazônia.

5. Agradecimentos

Os autores agradecem ao Programa de Iniciação Científica e Tecnológica daUniversidadedoEstadodo Pará(UEPA)pelaconcessão dasbolsasde iniciação científica,ao ProgramadePós-GraduaçãoemTecnologia,RecursosNaturaiseSustentabilidade na Amazônia (PPGTEC/UEPA) pelo apoio institucional e à Chamada Pública MCTI/FINEP/FNDCT/Identidade Brasil– Recuperação e Preservação de Acervos2024 (Ref. 3103/24), projeto nº 5827, convênio nº 0125.0186.00, pelo apoio financeiro.

6. Referênciasbibliográficas

Alves,A.F.S.,&Resende,L.J.(2020).Arelevânciadamediaçãodeconflitos socioambientaisparaaconscientizaçãoambientaldasociedadecontemporânea.*Trayectorias Humanas Trascontinentales, 7*, 63–78.https://www.unilim.fr/trahs/2082Alves,M.V.S. (2012).*Identificaçãomacroscópicademadeiras:ferramentapara o controledocomércioetransportedeprodutosflorestais*.LaboratóriodeProdutos Florestais, Serviço Florestal Brasileiro.

Amorim,L.,Santos,B.,Ferreira,R.,Ribeiro,J.,Dias,M.,SouzaJr.,C.,&Veríssimo,A. (2024).*Sistema de Alerta de Desmatamento (SAD) – Setembro de 2024*. Imazon. https://imazon.org.br/publicacoes/sistema-de-alerta-de-desmatamento-sad-setembro-de-2024/

Bernal,R.A.,Coradin,V.,Camargos,J.,Costa,C.,&Pissarra,J.(2011).*Woodanatomyof Lecythidaceae speciescalled "Tauari".IAWAJournal,32*(1),97–112.https://doi.org/10.1163/22941932-90000046

Brandes, A. F. N., Novello, B. Q., Domingues, G. A. F., Barros, C. F., &Tamaio, N. (2020).*Endangeredspeciesaccountfor10%ofBrazil'sdocumentedtimbertrade.Journalfor Nature Conservation, 55*, 125821.https://doi.org/10.1016/j.jnc.2020.125821

Brasil. Ministério do Meio Ambiente. (2017).*Documento de Origem Florestal (DOF): Sistemadecontrole daorigemdosprodutosflorestais*. Brasília, DF: Ministério doMeioAmbiente.

Coradin, V.T.R., &Muniz, G.I.B. de.(1992).*Normaseprocedimentosemestudosde anatomiadamadeira:I–Angiospermae;II–Gimnospermae*(SérieTécnica,n.15).InstitutoBrasileirodoMeioAmbienteedosRecursos NaturaisRenováveis,LaboratóriodeProdutosFlorestais.https://www.gov.br/florestal/pt-br/assuntos/laboratorio-de-produtos-florestais/conteudos/livros/livros-editados-pelo-lpf/normas-de-procedimentos-em-estudos-de-anatomia-de-madeira_1-angiospermae-2-gimnospermae_lpf-serie-tecnica-ndeg15.pdf

Dormontt,E.E.,Boner,M.,Braun,B.,Breulmann,G.,Degen,B.,Espinoza,E.,Gardner, S., Guillery,P.,Hermanson,J.C.,Koch,G.,Lee,S.L.,Kanashiro, M.,Rimbawanto,A., Thomas, D., Wiedenhoeft, A. C., Yin, Y., & Lowe, A. J. (2015).*Forensic timber identification: It's time to integrate disciplines to combat illegal logging*.*Biological Conservation, 191*, 790–798.https://doi.org/10.1016/j.biocon.2015.06.038

Florsheim, S. M. B., Ribeiro, A. P., Longui, E. L., Andrade, I. M., Sonsin-Oliveira, J., Chimelo,J.P.,Soares,R.K.,Gouveia,T.C.,Marques,V.N.,&Wiedenhoeft,A. (2020).*Identificação macroscópica de madeiras comerciais do estado de São Paulo*. Instituto Florestal.https://repositorio.cetesb.sp.gov.br/handle/123456789/2519

Gasson,P.(2011).*Howprecisecan wood identificationbe? Woodanatomy'sroleinsupportof the legal timber trade, especially CITES.IAWA Journal, 32*(2), 137–154.https://doi.org/10.1163/22941932-90000049

Gonçalves,T.A.P.,Nisgoski,S.,Oliveira,J.S.,Marcati,C.R.,Ballarin,A. W.,&Muñiz,

G. I. B. (2016).*A contribution to the identification of charcoal origin in Brazil II – Macroscopic characterization of cerrado species*.*Anais da Academia Brasileira de Ciências*, *88*(2), 1045-1054.https://doi.org/10.1590/0001-3765201620150322

Gontijo,A.B. (2017).*Identificação macroscópicademadeirascomerciaisbrasileiras: guiaprático parafiscalização econtrole*.UniversidadeFederaldeLavras.

IAWA Committee. (1989).*IAWA list of microscopic features for hardwood identification*.*IAWA Bulletin New Series*, *10*(3), 219–332.https://doi.org/10.1163/22941932-90000496

InsideWood. (2004–present).*InsideWood: A web resource for hardwood anatomy*. North Carolina State University.http://insidewood.lib.ncsu.edu

Jardim Botânico do Rio de Janeiro. (2024).*Lecythidaceae in Flora e Funga do Brasil*. Flora e Funga do Brasil.https://floradobrasil.jbrj.gov.br/FB145

Low,M.C.,Schmitz,N.,Boeschoten,L.E.,Cabezas,J.A.,Cramm,M.,Haag,V.,Koch, G., Meyer-Sand, B. R. V., Paredes-Villanueva, K., Price, E., Thornhill, A. H., Van Brusselen,J.,Zuidema,P.A.,Deklerck,V.,Dormontt,E. E.,Shapcott,A.,&Lowe,A.

J. (2023). Tracing the world's timber: The status of scientific verification technologies for species and origin identification.*IAWA Journal*, *44*(1), 63–84.https://doi.org/10.1163/22941932-bja10097

Mainieri,C.,&Chimelo,J.P.(1989).*Fichasdecaracterísticasdasmadeirasbrasileiras*. Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo.

Nellemann,C.,Henriksen,R.,Pravettoni,R.,Stewart,D.,Kotsovou,M.,Schlingemann, M.A.J.,Shaw,M.,&Reitano,T.(Eds.).(2018).*Worldatlasofillicitflows:ARHIPTO-INTERPOL-GI assessment*. RHIPTO – Norwegian Center for Global Analyses, INTERPOL, & Global Initiative Against Transnational Organized Crime.https://globalinitiative.net/wp-content/uploads/2018/09/Atlas-Illicit-Flows-FINAL-WEB-VERSION-copia-compressed.pdf

Perdigão,C.R.V.,BragaJúnior,M.M.,Gonçalves,T.A.P.,Araujo,C.S.,Mori,F.A.,Barbosa,A.C.M. C.,Souza,F.I.B.,Motta,J.P.,&Melo, L. E. L.(2020).*Forestrycontrolin the Brazilian Amazon I: Wood and charcoal anatomy of three endangered species*.*IAWA Journal*, *41*(4), 490–509.https://doi.org/10.1163/22941932-bja10016

Reboredo,F.(2013).*Socio-economic,environmental,andgovernanceimpactsof illegal logging*.*Environment Systems and Decisions*, *33*(2), 295–304.https://doi.org/10.1007/s10669-013-9444-7

Souza, A. C., & Prevedello, J. A. (2020).*The importance of protected areas for overexploitedplants:Evidencefromabiodiversityhotspot*.*Biological Conservation*, *245*, 108482.https://doi.org/10.1016/j.biocon.2020.108482

Zenid,G.J.(2008).ComercializaçãodemadeirasnoBrasil:Aimportânciadacorreta identificaçãodasespécies.InJ.T.S.Oliveira,N.C.Fiedler,&M.Nogueira(Orgs.), *Tecnologiasaplicadasaosetormadeireiro III*(pp.73–97).SupremaGráficaeEditora.

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Caracterização química de clones de *Eucalyptus* spp. visando à produção de polpa celulósica de dissolução

Paulo Eduardo Botelho Meira[1]; Samira Souza de Moura[1]; Davi Souza Vieira[1]; Ana Márcia Macedo Ladeira Carvalho[1]; Emanuella Mesquita Pimenta[2]; Cristiane Pereira Lasmar[2]

[1] Universidade Federal de Viçosa
[2] LD Celulose S.A.

Resumo: A produção de polpa celulósica de dissolução exige matéria de alta pureza química, com muita celulose e pouca hemicelulose e extrativos. Este estudo caracterizou quimicamente três clones de *Eucalyptus* spp. para a obtenção de polpa solúvel. Analisou-se o teor de extrativos em acetona e os açúcares estruturais (glicose, xilose, manose, arabinose e galactose), estimando a celulose e as hemiceluloses totais. Os dados foram submetidos à análise de variância e as médias ao teste de Tukey a 5% de probabilidade. Houve diferença significativa entre os clones para os extrativos em acetona, xilose, manose e hemiceluloses; já a glicose, celulose, arabinose e galactose não apresentaram diferenças entre si. O Clone 03 teve o menor teor de hemiceluloses (11,30%) e xilose (10,30%), mantendo a celulose igual aos outros clones avaliados. A análise química é promissora para a seleção preliminar de clones e para ajudar em futuros estudos de polpação e avaliação da qualidade final do produto obtido.

Palavras-chave: Madeira; Glicanas; Xilanas.

Chemical Characterization of *Eucalyptus* spp. Clones for Dissolving Pulp Production

Abstract: The production of dissolving pulp requires material of high chemical purity, with high cellulose and low hemicellulose and extractives. This study chemically characterized three *Eucalyptus* spp. clones to obtain soluble pulp. Acetone extractives content and structural sugars (glucose, xylose, mannose, arabinose, and galactose) were analyzed, estimating cellulose and total hemicelluloses. Data underwent analysis of variance and means Tukey test at 5% probability. Significant differences occurred among clones for acetone extractives, xylose, mannose, and hemicelluloses; glucose, cellulose, arabinose, and galactose showed no differences among themselves. Clone 03 had the lowest hemicelluloses (11.30%) and xylose (10.30%) content, maintaining cellulose equal to the other evaluated clones. Chemical analysis is promising for preliminary clone selection and to help in future pulping studies and final product quality evaluation.

Keywords: Wood; Glucan; Xylan.

1. Introdução

As polpas celulósicas especiais têm assumido papel estratégico na indústria florestal devido à diversificação da celulose em produtos de alto valor agregado. Destaca-se a polpa

celulósica de dissolução, caracterizada pelo elevado grau de pureza química (alto teor de **α**-celulose, normalmente superior a 90%) e baixos teores de hemiceluloses, extrativos e minerais. Diferentemente das polpas para fabricação de papéis, focadas na resistência mecânica, a polpa de dissolução exige matérias-primas específicas para garantir alta reatividade química, eficiência na derivatização e uniformidade de produtos como fibras têxteis regeneradas (viscose, modal e lyocell) e derivados (acetato, nitrocelulose, éteres de celulose e celulose microcristalina) (Quintana et al., 2024).

Nas últimas décadas, o mercado mundial desse insumo tem crescido continuamente, impulsionado pela expansão da indústria têxtil e pela busca por materiais sustentáveis e biodegradáveis em alternativa às fibras sintéticas derivadas do petróleo (Rajan et al., 2024). A consolidação da polpa de dissolução como importante insumo da bioeconomia tem estimulado o desenvolvimento de novas tecnologias e a seleção de matérias-primas lignocelulósicas com qualidade adequada, uma vez que a qualidade da madeira influencia diretamente o rendimento industrial, o consumo de reagentes e a eficiência das etapas de pré-hidrólise, deslignificação e branqueamento.

Entre as matérias-primas utilizadas, as espécies do gênero *Eucalyptus* destacam-se pela elevada produtividade, rápido crescimento, ampla adaptação edafoclimática e excelentes propriedades tecnológicas. O Brasil ocupa posição de destaque na produção dessa madeira devido ao melhoramento genético, manejo silvicultural intensivo e condições climáticas favoráveis (Silva et al., 2022). Essas características tornam o país um importante fornecedor de fibras curtas para os mercados de polpa e papel, favorecendo também a expansão da produção de polpa de dissolução.

Entretanto, diferenças genéticas entre espécies e clones de *Eucalyptus* resultam em variações significativas na composição química da madeira (teores de celulose, hemiceluloses e carboidratos estruturais), afetando o rendimento e o comportamento na polpação (Mboowa, 2024). Para a polpa de dissolução, madeiras com maior concentração de celulose e menor teor de hemiceluloses demandam menor severidade nas etapas de purificação, o que reduz o consumo de reagentes e favorece a obtenção de polpas de elevada pureza (Balkissoon et al., 2023).

Os carboidratos estruturais da parede celular vegetal constituem uma ferramenta essencial para avaliar esse potencial tecnológico: a glicose é o principal monômero da celulose, enquanto xilose, manose, arabinose e galactose compõem as hemiceluloses (Zhang et al., 2022). A quantificação desses açúcares permite estimar a composição dos polissacarídeos e

compreender a influência de cada clone na eficiência dos processos industriais de conversão da biomassa (Patil et al., 2023), fornecendo dados relevantes para a seleção de materiais genéticos. Portanto, o presente trabalho teve como objetivo avaliar a composição química da madeira de diferentes clones de *Eucalyptus* spp., visando identificar materiais com maior potencial para a produção de polpa celulósica de dissolução.

2. Material e métodos

2.1 Material

A madeira utilizada neste estudo foi proveniente de três clones de *Eucalyptus* spp. cedidos por uma empresa brasileira produtora de polpa celulósica de dissolução.

Para cada clone, foram selecionadas cinco árvores representativas do plantio comercial com 7 anos de idade, das quais foram retirados cinco discos com diâmetro mínimo de 8 cm, sem altura específica, ao longo do fuste, destinados à preparação das amostras, para caracterização química.

2.2 Métodos

2.2.1 Preparo das amostras de madeira

De cada disco foram retiradas duas cunhas diametralmente opostas para representar todas as regiões do lenho. As cunhas provenientes dos três discos de cada árvore foram transformadas em cavacos, os quais foram posteriormente misturados para obtenção de uma amostra composta representativa de cada árvore. Em seguida, os cavacos foram armazenados em ambiente coberto e ventilado até a estabilização do teor de umidade e acondicionados em sacos de polietileno para posterior processamento.

Posteriormente, os cavacos foram moídos em moinho de facas tipo *Willey* e a serragem obtida foi homogeneizada. Para cada clone, realizou-se o quarteamento sucessivo da serragem até a obtenção de aproximadamente 200 g de amostra representativa.

2.2.2 Preparação e classificação da serragem

A serragem foi classificada conforme o procedimento descrito na norma TAPPI T257 cm-85, sendo utilizada nas análises a fração que passou pela peneira de 40 mesh e ficou retida na peneira de 60 mesh.

2.2.3 Determinação dos extrativos solúveis em acetona

O teor de extrativos solúveis em acetona foi determinado de acordo com a norma TAPPI T204 cm-17.

2.2.4 Determinação dos carboidratos estruturais

Os teores de glicanas, xilanas, mananas, arabinanas e galactanas foram determinados conforme o procedimento estabelecido pela norma SCAN-CM 71:09, permitindo a quantificação individual dos principais monossacarídeos constituintes da parede celular da madeira.

2.2.5 Determinação dos teores de celulose e hemiceluloses

O teor de celulose foi estimado pelo conteúdo de glicanas. Já o de hemiceluloses resultou da soma de xilanas, mananas, arabinanas e galactanas, com correções para grupos acetil (2,9%) e ácidos urônicos (4,1%) (Gomide et al., 2005), com base nos carboidratos estruturais determinados por cromatografia iônica (IC).

2.2.6 Delineamento experimental e análise estatística

O experimento foi conduzido em delineamento inteiramente casualizado, sendo avaliados três clones de *Eucalyptus* spp. As médias foram submetidas à análise de variância (ANOVA) e comparadas pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade, utilizando-se o software R.

3. Resultados e discussão

A composição química da madeira dos três clones de *Eucalyptus* spp. é apresentada na Tabela 1. A análise de variância seguida pelo teste de Tukey (5% de probabilidade) evidenciou diferenças significativas entre os clones para os teores de extrativos em acetona, xilose, manose e hemiceluloses, enquanto os teores de arabinose, galactose, glicose e celulose não diferiram estatisticamente entre os materiais avaliados.

Tabela 1 - Composição química da madeira dos clones de *Eucalyptus* spp. destinadas à produção de polpa celulósica de dissolução

Propriedades Químicas	Clone 01	Clone 02	Clone 03
Extrativos em acetona (%)	1,95 b	2,91 a	2,28 b
Arabinose (%)	0,10 a	0,10 a	0,10 a

Propriedades Químicas	Clone 01	Clone 02	Clone 03
Galactose (%)	0,95 a	0,90 a	0,90 a
Glicose (%)	45,40 a	45,50 a	45,55 a
Xilose (%)	10,80 a	10,85 a	10,30 b
Manose (%)	0,10 b	0,30 a	0,00 c
Celulose (%)	45,30 a	45,20 a	45,55 a
Hemiceluloses (%)	12,05 b	12,45 a	11,30 c

O teor de extrativos em acetona variou entre 1,95 e 2,91%, sendo o Clone 02 aquele que apresentou a maior concentração desse componente. Os Clones 01 e 03 não diferiram estatisticamente entre si e apresentaram menores valores. Os extrativos constituem um grupo heterogêneo de compostos de baixa massa molecular que, embora representem pequena fração da madeira de eucalipto, podem influenciar negativamente os processos industriais, aumentando o consumo de reagentes químicos, favorecendo a formação de depósitos (*pitch*) e reduzindo a eficiência do branqueamento (dos Santos et al., 2024). Assim, menores teores de extrativos são desejáveis para a produção de polpas celulósicas de elevada pureza.

Os teores de glicose apresentaram valores próximos entre os clones, variando de 45,40 a 45,55%, sem diferenças estatísticas significativas. Esse resultado demonstra elevada uniformidade da fração celulósica entre os materiais avaliados, indicando potencial semelhante quanto ao principal constituinte estrutural responsável pelo rendimento e pela qualidade da polpa de dissolução. Em madeiras de *Eucalyptus*, a glicose corresponde predominantemente às unidades de glicanas da celulose, sendo considerada um dos principais indicadores da qualidade química da matéria-prima.

Em relação às hemiceluloses, observou-se diferença significativa entre os clones. O Clone 02 apresentou o maior teor (12,45%), seguido do Clone 01 (12,05%) e do Clone 03 (11,30%). Essa diferença foi influenciada principalmente pelos teores de xilose e manose. A xilose, principal monossacarídeo constituinte das xilanas de folhosas, apresentou menor concentração no Clone 03 (10,30%), enquanto os Clones 01 e 02 não diferiram entre si. Da mesma forma, a manose apresentou diferenças entre todos os clones, sendo máxima no Clone 02 (0,30%) e ausente no Clone 03.

Sob o ponto de vista tecnológico, menores teores de hemiceluloses são desejáveis para a produção de polpa celulósica de dissolução, uma vez que essas frações precisam ser removidas durante as etapas de pré-hidrólise, polpação e purificação para obtenção de polpas com elevada pureza e alto teor de α-celulose (Quintana et al., 2024). Dessa forma, o menor teor de hemiceluloses observado no Clone 03 representa uma característica favorável para essa finalidade. Os teores de arabinose e galactose permaneceram praticamente constantes entre os clones, indicando reduzida variabilidade genética para esses constituintes. Esses açúcares normalmente representam pequena fração da composição química da madeira de espécies do gênero *Eucalyptus* e exercem influência menos expressiva na qualidade da polpa quando comparados às xilanas.

Os valores de celulose obtidos neste estudo (45,20–45,55%) são compatíveis com aqueles normalmente reportados para madeiras de *Eucalyptus* destinadas à produção de polpa celulósica, cujos teores geralmente variam entre 43 e 48%. Da mesma forma, os teores de hemiceluloses observados (11,30–12,45%) encontram-se ligeiramente inferiores aos relatados para diversos híbridos comerciais, normalmente compreendidos entre 13 e 18%, evidenciando uma composição química favorável para aplicações que demandam elevada pureza da celulose.

Estudos conduzidos por Balkissoon et al. (2023) demonstraram que a composição de carboidratos constitui um dos principais parâmetros para seleção de materiais genéticos destinados à produção de polpas especiais, uma vez que madeiras com maiores proporções de glicanas e menores teores de xilanas apresentam maior potencial para obtenção de polpas de elevada pureza. De forma semelhante, Vallejos et. al (2022) destacam que a redução do conteúdo de hemiceluloses é um requisito fundamental para a fabricação de polpas de dissolução empregadas na produção de fibras regeneradas e derivados de celulose.

Considerando conjuntamente os resultados obtidos, observa-se que, embora os três clones apresentem composição celulósica semelhante, o Clone 03 reúne as características químicas mais favoráveis para a produção de polpa celulósica de dissolução, principalmente em função do menor teor de hemiceluloses e da menor concentração de xilose, indicando menor necessidade de remoção desses constituintes durante o processamento industrial.

4. Conclusões

A caracterização química evidenciou diferenças significativas entre os clones de *Eucalyptus* spp. para os teores de extrativos em acetona, xilose, manose e hemiceluloses,

enquanto os teores de glicose, celulose, arabinose e galactose não apresentaram diferenças estatísticas significativas.

Entre os materiais avaliados, o Clone 03 destacou-se por apresentar o menor teor de hemiceluloses e de xilose, mantendo teor de celulose semelhante aos demais clones. Essas características são consideradas favoráveis à produção de polpa celulósica de dissolução, uma vez que indicam menor conteúdo de carboidratos não celulósicos passíveis de remoção durante as etapas de processamento.

Os resultados demonstram que a composição química da madeira constitui uma ferramenta importante para a seleção preliminar de clones de *Eucalyptus* com potencial para a produção de polpa celulósica de dissolução. Entretanto, a confirmação desse potencial requer a realização de ensaios de polpação e a caracterização da polpa produzida.

5. Agradecimentos

Os autores agradecem à LD Celulose pelo fornecimento do material para o desenvolvimento da pesquisa, CNPq, à EMBRAPII e à FAPEMIG pelo apoio financeiro. Agradecem, ainda, ao Departamento de Engenharia Florestal/UFV, aos Laboratórios LPM, LAPEM e LCP, bem como à Fundação SIF, pelo suporte técnico e infraestrutura disponibilizada.

6. Referências bibliográficas

Balkissoon, S., Andrew, J., & Sithole, B. (2023). Dissolving wood pulp production: A review. Biomass Conversion and Biorefinery, 13(18), 16607–16642. https://doi.org/10.1007/s13399-021-02058-2

dos Santos, V. B., da Conceicao, G. J., Rodrigues, P. D., Cirilo, N. R. M., Almeida, M. N. F., Rocha, M. F. V., & Vidaurre, G. B. (2024). Impact of age and genotype on the quality of eucalyptus wood for dissolving pulp. Industrial Crops and Products, 218, 118930. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2024.118930

Gomide, J. L., Colodette, J. L., Oliveira, R. C. de, & Silva, C. M. (2005). Caracterização tecnológica para produção de celulose da nova geração de clones de *Eucalyptus* do Brasil. Revista Árvore, 29(1), 129–137. https://doi.org/10.1590/S0100-67622005000100014

Mboowa, D. (2024). A review of the traditional pulping methods and the recent improvements in the pulping processes. Biomass Conversion and Biorefinery, 14(1), 1–12. https://doi.org/10.1007/s13399-021-02268-8

Patil, P. S., Fernandes, C. G., Sawant, S. C., Lali, A. M., & Odaneth, A. A. (2023). High-throughput system for carbohydrate analysis of lignocellulosic biomass. Biomass Conversion and Biorefinery, 13(14), 12889–12901. https://doi.org/10.1007/s13399-021-01962-x

Quintana, E., Valls, C., & Roncero, M. B. (2024). Dissolving-grade pulp: A sustainable source for fiber production. Wood Science and Technology, 58(1), 23–85. https://doi.org/10.1007/s00226-023-01519-2

Rajan, K., Berton, P., Rogers, R. D., & Shamshina, J. L. (2024). Is kraft pulping the future of biorefineries? A perspective on the sustainability of lignocellulosic product development. Polymers, 16(23), 3438. https://doi.org/10.3390/polym16233438

Scandinavian Pulp, Paper and Board Testing Committee. (2009). SCAN-CM 71:09: Carbohydrate composition by high-performance anion-exchange chromatography with pulsed amperometric detection (HPAEC-PAD). SCAN.

Silva, V. E., Buzzetti, S., Montanari, R., Panosso, A. R., Moreira, S. C. D., & Silva, J. F. D. (2022). Influence of the climate on productivity and the eucalyptus drought response and a proposal for maximizing wood productivity in function of soil attributes in Brazil. Ciência Florestal, 32(2), 523–547. https://doi.org/10.5902/1980509863814

Technical Association of the Pulp and Paper Industry. (1985). TAPPI T257 cm-85: Sampling and preparing wood for analysis. TAPPI Press.

Technical Association of the Pulp and Paper Industry. (2017). TAPPI T204 cm-17: Solvent extractives of wood and pulp. TAPPI Press.

Vallejos, M. E., Olmos, G. V., Taleb, M. C., Felissia, F. E., Ehman, N. V., Peresin, M. S., & Maximino, M. G. (2022). Dissolving pulp from eucalyptus sawdust for regenerated cellulose products. Cellulose, 29(8), 4645–4659. https://doi.org/10.1007/s10570-022-04561-8

Zhang, X., Li, L., & Xu, F. (2022). Chemical characteristics of wood cell wall with an emphasis on ultrastructure: A mini-review. Forests, 13(3), 439. https://doi.org/10.3390/f13030439

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Caracterização química do lodo primário da indústria de celulose kraft para potencial aplicação no solo

Camila Juliana Sampaio Pereira[1]; Ariane Mateus de Souza[1]; Luis Henrique Cabral Barral[1]; Kezia Ellen Bonfim[1]; Thaynara Silva Oliveira[1]; Ana Marcia Macedo Ladeira Carvalho[1]; Angélica de Cássia Oliveira Carneiro[1]; João Gilberto Meza Ucella Filho[1]
[1] Universidade Federal de Viçosa 01

Resumo: O processo Kraft gera grandes volumes de lodo primário (LP), cuja destinação convencional ocorre, principalmente, em aterros sanitários, embora parte desse material possa ser reincorporada à produção de papel de menor valor agregado ou destinada à incineração para geração de energia. Nesse contexto, este trabalho teve como objetivo caracterizar quimicamente o lodo primário proveniente da indústria de celulose Kraft e avaliar seu potencial para aplicação no solo. Foram realizadas análises elementares (C, H, N, S e O) e a quantificação de macro, micronutrientes e metais potencialmente tóxicos por espectrofotometria de absorção atômica. Os resultados evidenciaram elevado teor de carbono (45,3%), principal constituinte do material, indicando elevada fração orgânica, além da presença de nutrientes essenciais, com destaque para o potássio, macronutriente encontrado em maior concentração. Os metais potencialmente tóxicos apresentaram baixas concentrações, indicando a necessidade de estudos complementares quanto à biodisponibilidade e às condições de aplicação. Dessa forma, o lodo primário apresenta potencial para incorporação ao solo, constituindo uma alternativa promissora para sua valorização e para o fortalecimento dos princípios da economia circular.

Palavras-chave: Micronutrientes; macronutrientes; economia circular.

Chemical Characterization of Primary Sludge from the Kraft Pulp Industry for Potential Soil Application

Abstract: The Kraft process generates large amounts of primary sludge (PS), whose conventional disposal is mainly carried out in landfills, although part of this material can be reincorporated into the production of lower value-added paper products or incinerated for energy generation. In this context, this study aimed to chemically characterize primary sludge generated by the Kraft pulp industry and evaluate its potential for soil application. Elemental analyses (C, H, N, S, and O) and the determination of macro- and micronutrients, as well as potentially toxic metals, were performed by atomic absorption spectrophotometry. The results revealed a high carbon content (45.3%), the predominant constituent of the material, indicating a high organic fraction, as well as the presence of essential plant nutrients, with potassium being the predominant macronutrient. Potentially toxic metals were detected at low concentrations, indicating the need for further studies regarding their bioavailability and appropriate application conditions. Overall, primary sludge showed potential for soil incorporation, representing a promising alternative for its valorization while supporting the principles of the circular economy.

Keywords: Macronutrients; micronutrients; circular economy.

1. Introdução

O processo kraft destaca-se como a principal tecnologia empregada na produção de polpa celulósica devido às suas diversas vantagens operacionais. Entre elas, sobressai a elevada flexibilidade quanto à matéria-prima utilizada, possibilitando o processamento de diferentes espécies de madeira e de fibras não madeireiras, sem comprometer a eficiência do processo (Rodrigues *et al.*, 2024).

A produção global de celulose para papel ascendeu a cerca de 190,1 milhões de toneladas métricas em 2024 (Statista, 2024). Apenas a produção de celulose no Brasil atingiu um recorde de 25,5 milhões de toneladas em 2024, representando um aumento de 5,2% em relação ao ano anterior (Ibá, 2025). Toda essa fabricação de polpa celulósica também está associada à geração de grandes volumes de resíduos sólidos, líquidos e emissões gasosas, reforçando a necessidade da adoção de tecnologias que promovam o tratamento e a valorização desses resíduos (Mandeep *et al.*, 2019).

Entre os resíduos sólidos gerados no processo, o lodo primário (LP) é produzido na etapa de decantação primária das estações de tratamento de efluentes, sendo formado pela sedimentação gravitacional dos sólidos suspensos e podendo concentrar aproximadamente 80% dos sólidos suspensos totais presentes no efluente (Alves, 2024). Parte desse material pode ser reincorporada ao processo produtivo das fábricas de papel para a fabricação de produtos de menor valor agregado, como papel-cartão, ou destinada à incineração para geração de energia. Entretanto, a disposição em aterros sanitários ainda representa a principal forma de destinação desse resíduo (Eikelboom *et al.*, 2018; Turner; Wheeler; Oliver, 2022). Diante desse cenário, o lodo primário tem despertado crescente interesse científico em razão de suas propriedades físico-químicas e do seu potencial de reaproveitamento, sendo investigado como matéria-prima para diferentes aplicações de maior valor agregado.

Um meio de reutilização do LP pode ser sua incorporação ao solo, tendo em vista que a utilização de materiais orgânicos, incluindo esterco animal, biossólidos, resíduos agroindustriais, resíduos de culturas, adubos verdes e outros subprodutos industriais, pode favorecer a qualidade do solo ao promover melhorias em suas características biológicas, químicas e físicas, sobretudo em solos degradados de textura grosseira (Räty *et al.*, 2024). A crescente demanda por sistemas agrícolas mais sustentáveis tem impulsionado o emprego de materiais orgânicos como fertilizantes e condicionadores de solo, em consonância com os princípios da economia circular e com estratégias voltadas à manutenção e ao aprimoramento da saúde do solo (Harder, 2021; Lal, 2016).

O aproveitamento de biomassas residuais tem se consolidado como uma estratégia promissora para o desenvolvimento de processos mais sustentáveis, uma vez que esses materiais apresentam ampla disponibilidade, baixo custo de obtenção, viabilidade ecológica e benefícios ambientais compatíveis com os princípios da economia circular (Olugbenga *et al.*, 2024). Nesse contexto, a aplicação agrícola de lodos orgânicos oriundos da indústria de celulose e papel tem sido amplamente investigada em diferentes condições edafoclimáticas, apresentando, de modo geral, efeitos benéficos sobre a produtividade das culturas e a melhoria das propriedades físicas do solo (Rasa *et al.*, 2021). Dessa forma, o reaproveitamento desse resíduo representa uma alternativa promissora para sua valorização, reduzindo a necessidade de disposição final e fortalecendo os princípios da economia circular.

A economia circular fundamenta-se na adoção de sistemas produtivos em circuito fechado, nos quais os resíduos são reinseridos na cadeia produtiva como matérias-primas para novos processos, promovendo o uso mais eficiente dos recursos naturais (Oliveira, 2019). Esse modelo está diretamente relacionado à inovação e ao desenvolvimento de produtos e processos capazes de prolongar o ciclo de vida dos materiais, substituindo o modelo linear de produção e consumo por uma abordagem regenerativa (Leitão, 2015). Como consequência, favorece a redução do consumo de matérias-primas, energia e água, além de minimizar a geração de resíduos e os impactos ambientais.

Nesse contexto, a bioeconomia circular tem sido reconhecida como um importante instrumento para acelerar a transição para sistemas produtivos mais sustentáveis e de baixa emissão de carbono, promovendo a valorização de resíduos lignocelulósicos e de outras biomassas como fontes renováveis para a obtenção de energia, materiais e produtos de maior valor agregado (Olugbenga *et al.*, 2024). Diante do cenário atual acerca da necessidade de reaproveitamento de resíduos, o presente trabalho tem como objetivo principal caracterizar quimicamente o lodo primário gerado a partir da produção de polpa celulósica e avaliar seu potencial para ser incorporado no solo.

2. Material e métodos

2.1.Coleta do material

O lodo primário (LP) empregado neste estudo foi obtido de uma indústria de produção de polpa celulósica branqueada pelo processo Kraft, localizada no estado de Minas Gerais. Após a coleta, o material foi transportado para o Laboratório de Celulose e Papel (LCP) da Universidade Federal de Viçosa, onde foi mantido em câmara fria a 7 °C até o início das análises experimentais, com o intuito de preservar suas características físico-químicas.

As etapas de preparo da biomassa, antes do prosseguimento das análises, foram realizadas no Laboratório de Celulose e Papel (LCP), no Laboratório de Painéis e Energia da Madeira (LAPEM) e no Laboratório de Resíduos da Indústria Florestal (LABRIF), todos pertencentes à Universidade Federal de Viçosa (UFV). Antes da etapa de caracterização, quando necessário, o lodo primário foi submetido à secagem em duas etapas. Inicialmente, o material permaneceu em secagem ao ar livre e, posteriormente, foi acondicionado em sala de aclimatação até atingir a estabilização do teor de umidade, garantindo condições adequadas para as análises subsequentes.

2.2.Análise elementar

A composição elementar do lodo primário foi determinada utilizando um analisador elementar TruSpec Micro (LECO). As amostras foram submetidas à combustão em temperaturas de até 1.050 °C, promovendo a conversão dos elementos em gases, os quais foram posteriormente purificados, separados conforme suas massas moleculares e quantificados automaticamente pelo sistema do equipamento.

Os teores de carbono (C), hidrogênio (H) e nitrogênio (N) foram determinados pelo módulo TruSpec Micro, sendo o nitrogênio quantificado por detector de condutividade térmica, enquanto o dióxido de carbono (CO_2) e o vapor de água (H_2O), provenientes da combustão, foram determinados por espectroscopia na região do infravermelho. O teor de enxofre (S) foi obtido por meio do módulo TruSpec S. O conteúdo de oxigênio (O) foi estimado por diferença, conforme estabelecido pela norma EN 15296 (DIN, 2011).

2.3. Análise de minerais e metais pesado

A amostra foi submetida à calcinação em forno mufla a 600 °C, conforme o método AOAC 923.03, para obtenção das cinzas. Posteriormente, as cinzas foram solubilizadas em solução de ácido clorídrico (HCl, 1:1, v/v). A solução obtida foi filtrada e transferida para balão volumétrico de 50 mL, sendo o volume completado até o menisco. O extrato resultante foi então utilizado para a determinação dos metais por espectrometria de absorção atômica. Os elementos presentes no extrato obtido foram determinados por espectrofotometria de absorção atômica, utilizando espectrofotômetro Varian, modelo SpectrAA 100. Foram quantificados os teores de sódio (Na), cálcio (Ca), ferro (Fe), potássio (K), magnésio (Mg), manganês (Mn), fósforo (P), zinco (Zn) e cobre (Cu), conforme a metodologia descrita por Sarruge e Haag (1974).

2.4.Análise de dados

Os dados obtidos foram submetidos à análise estatística descritiva, sendo calculados os valores de média, desvio padrão, mínimo e máximo para cada variável analisada, a partir das repetições experimentais realizadas. A estatística descritiva foi empregada para caracterizar a composição química do lodo primário e avaliar a variabilidade dos resultados, sem a aplicação de testes de comparação de médias, uma vez que o objetivo do estudo consistiu na caracterização do material. O tratamento estatístico dos dados foi realizado no software Microsoft Excel®, utilizado para a organização dos resultados e obtenção dos parâmetros estatísticos descritivos.

3. Resultados e discussão

3.1. Caracterização elementar e potencial de aplicação no solo

Os resultados obtidos a partir da análise elementar para as amostras de lodo primário estão expostos na Tabela 1. Para a determinação da composição elementar, os valores foram corrigidos considerando-se o teor de cinzas da amostra (1,832%), correspondente à sua fração inorgânica. O teor de carbono (C) estimado, para as porções de LP, foi de aproximadamente 45%, sendo considerado o elemento quantificado em maior proporção, seguido pelo hidrogênio (H), cujo teor foi de 6,530%. Segundo (Gonçalves *et al.*, 2025), os altos teores de carbono e hidrogênio sugerem a existência de uma quantidade significativa de material orgânico, provavelmente devido à presença de material fibroso orgânico.

Tabela 1 - Resultados da análise elementar para amostras de lodo primário**Erro! Vínculo não válido.**

O elevado teor de carbono (C) observado é um aspecto relevante, visto que o carbono orgânico corresponde, em geral, a cerca de 45 a 60% da massa da matéria orgânica do solo. Dessa forma, maiores aportes de carbono podem contribuir para o incremento da matéria orgânica, que constitui a principal fonte de energia para os microrganismos edáficos, favorecendo a atividade biológica e os processos de ciclagem de nutrientes (Lal, 2016).

Os teores de nitrogênio (N) e enxofre (S), por outro lado, foram de 0,057% e 0,332%, respectivamente. A quantidade de N descrito é tido como abaixo do esperado do que o necessário para aplicação no solo, pois este elemento é um macronutriente crítico para a produtividade ideal da cultura (Shahzad *et al.*, 2025). Apesar de apresentar baixo teor de S é um elemento comum que está presente no lodo primário gerado das indústrias de celulose (Gonçalves *et al.*, 2025). O enxofre é um macronutriente vegetal essencial envolvido em processos críticos, como a formação de clorofila e aminoácidos, síntese de vitaminas e regulação enzimática (Shahzad *et al.*, 2025).

3.2. Caracterização de metais pesados e minerais do lodo primário para utilização no solo

Os quatorze elementos inorgânicos necessários para que as plantas completem seu ciclo de vida são denominados nutrientes essenciais às plantas e classificados em macronutrientes e micronutrientes, de acordo com sua concentração na matéria seca vegetal (Bang *et al.*, 2021). A análise para quantificar minerais e metais pesados (Tabela 2), conferiu a possibilidade de realizar a diferenciação dos elementos por grupos de macro e micronutrientes e os minerais potencialmente tóxicos ao solo.

Erro! Vínculo não válido.

No grupo de macronutrientes, o elemento com maior concentração é o potássio (K), englobando um resultado positivo, visto que o K é essencial para o crescimento das plantas e desempenha um papel fundamental na regulação dos processos fotossintéticos, fisiológicos e bioquímicos (Dhillon *et al.*, 2019). O Ca, é o segundo elemento em maior proporção no grupo dos macronutriente, para Thor (2019), este não é apenas um nutriente em si, curiosamente em sua função como segundo mensageiro, está envolvido na sinalização da disponibilidade de nutrientes e alterações no mesmo. Ademais, o cálcio é essencial para plantas superiores, porque é necessário como um elemento estrutural e desempenha um papel essencial na sinalização celular (Bang *et al.*, 2021).

Embora a concentração de magnésio (7,14 mg L^{-1}) tenha sido inferior à observada para outros macronutrientes, sua presença é relevante, do ponto de vista agronômico, uma vez que o Mg participa da composição da clorofila e da ativação de enzimas relacionadas à fotossíntese e ao metabolismo de carboidratos. Segundo Maathuis (2009), as concentrações de magnésio na solução do solo variam normalmente entre 125 µM e 8,5 mM, sendo suficientes para atender às exigências nutricionais das plantas por meio do fluxo de massa. Dessa forma, o lodo primário pode atuar como uma fonte complementar desse nutriente quando incorporado ao solo, especialmente em sistemas que visam o reaproveitamento de resíduos orgânicos.

Dentro do grupo de micronutrientes, a baixa concentração de zinco (Zn), correspondente a 1,37 mg L^{-1}, é visto como um limitante, pois Zn é um elemento vital para o crescimento ideal das plantas e contribui para processos como síntese de proteínas, interações DNA-proteína, desenvolvimento de sementes, produção de clorofila e proteção contra estresse

(Shahzad *et al.*, 2025). Os demais micronutrientes apresentados na Tabela 2, em uma concentração inferior a 0,5 g por kg, de matéria seca vegetal, são considerados essenciais para a nutrição vegetal (Dhaliwal et al., 2019).

Todos os elementos do grupo de metais potencialmente tóxicos apresentaram-se abaixo de 1,00 mg L^{-1}, com exceção do chumbo (Pb), que apresentou um ligeiro aumento, cerca de 1,47 mg L^{-1} de concentração nas amostras de LP. Para Eikelboom *et al.* (2018), o teor de metais pesados em lodo de polpa kraft digerido não excede os limites legais, mas os elementos potencialmente tóxicos na fábrica de polpa de kraft lodo digerido são um risco na aplicação terrestre, tendo em vista que seu acumulo no solo agrícola e sua persistência no solo superficial podem causar problemas na cadeia alimentar.

A presença de metais potencialmente tóxicos em resíduos destinados à aplicação agrícola não representa, isoladamente, um indicativo de risco ambiental. O potencial de transferência desses elementos para a cadeia alimentar depende da concentração inicial presente no resíduo, da dose aplicada e das propriedades do solo, especialmente pH, teor de matéria orgânica e conteúdo de argila, que influenciam diretamente sua biodisponibilidade (Silva *et al.*, 2023).

Outras opções para aplicação do LP são citadas, enquanto biomassa, como por exemplo a compostagem (Eikelboom *et al.*, 2018). A compostagem de lodo gerados na produção de polpas celulósicas, antes da aplicação terrestre, pode ajudar a melhorar as características químicas, reduzir o conteúdo do organismo patogênico e reduzir o volume geral de resíduos, aumentando sua densidade a granel (Turner; Wheeler; Oliver, 2022). Adicionalmente, estudos recentes, em escala laboratorial, destacam que a utilização do LP pode contribuir para minimização do número de irrigações quando aplicado no solo. Os resultados discutidos por Räty *et al.*, (2023), mostram que, apesar da decomposição sofrida pelo lodo com o passar do tempo, sua aplicação aumentaram a quantidade de água retida no solo, sobretudo em solos arenosos, sendo necessárias reaplicações periódicas manter os benefícios nas propriedades físicas do solo.

4. Conclusões

A caracterização química do lodo primário proveniente da indústria de celulose kraft evidenciou elevada concentração de carbono, além da presença de macro e micronutrientes essenciais ao desenvolvimento vegetal, indicando potencial para sua incorporação ao solo. Apesar da presença de metais potencialmente tóxicos, os teores observados reforçam a

necessidade de estudos complementares que avaliem sua biodisponibilidade, bem como os efeitos das doses de aplicação e das propriedades do solo sobre sua mobilidade.

5. Agradecimentos

Os autores agradecem à Universidade Federal de Viçosa (UFV), ao Departamento de Engenharia Florestal (DEF-UFV), ao Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal (PPGCF-UFV), à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG), à Sociedade de Investigações Florestais (SIF), ao Laboratório de Celulose e Papel (LCP), ao Laboratório de Painéis e Energia da Madeira (LAPEM), ao Laboratório de Propriedades da Madeira (LPM) e ao Laboratório de Resíduos da Indústria Florestal (LABRIF) pelo apoio institucional, infraestrutura laboratorial, suporte técnico e científico que possibilitaram o desenvolvimento deste trabalho.

6. Referências bibliográficas

Alves, F S, Castro, T A C, Gonçalves, L M, Pedroza, M M, Paula, E C, Cardoso, M. (2024), Characterization of sludge from a cellulose pulp mill for its potential biovalorization, Nordic Pulp & Paper Research Journal, vol. 40, no. 1, pp. 203-218. https://doi.org/10.1515/npprj-2024-0059

Bang, T C., Husted, S., Laursen, K. H., Persson, D. P., Schjoerring, J.K. (2021), The molecular–physiological functions of mineral macronutrients and their consequences for deficiency symptoms in plants. New Phytol, 229: 2446-2469. https://doi.org/10.1111/nph.17074

DIN EN 15296 (2011) Conversion of analytical results from one basis to another. Berlim: CEN: 15 p

Dhillon, J. S., Eickhoff, E. M., Mullen, R. W. and Raun, W. R. (2019), World Potassium Use Efficiency in Cereal Crops. Agronomy Journal, 111: 889-896. https://doi.org/10.2134/agronj2018.07.0462

Eikelboom, M., Lopes A. D. C. P., Silva C. M., Rodrigues F. Á., Zanuncio A. J. V., Zanuncio J. C. (2018) A multi-criteria decision analysis of management alternatives for anaerobically digested kraft pulp mill sludge. PLoS ONE, v. 13, n. 1, p. e0188732. https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC5751971/

Gonçalves, L. M., Mendoza-Martinez, C., Salcedo-Puerto, O., Emebu, S., Paula, E. C., Cardoso, M. (2025) Assessment of solar drying of Brazilian pulp mill primary sludge. Journal of Material Cycles and Waste Management, v. 27, n. 1, p. 111–123, https://link.springer.com/article/10.1007/s10163-024-02095-2

Halder, P., Marzbali, M. H., Patel, S., Short, G., Surapaneni, A., Gupta, R., Shah, K. (2023) Bioresource Technology Reports Ammonium nitrogen (NH + 4 -N) recovery from synthetic wastewater using biosolids-derived biochar. Bioresource Technology Reports, v. 23, n. May, p. 101592. https://doi.org/10.1016/j.biteb.2023.101592

Harder, R., Giampietro, M., Smukler, S. (2021) Towards a circular nutrient economy. A novel way to analyze the circularity of nutrient flows in food systems. Resources, Conservation and Recycling, v. 172, p. 105693. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105693

Indústria Brasileira de Árvores. (2025). Relatório anual 2025. https://iba.org/wp-content/uploads/2025/10/relatorioAnual2025.pd f

Lal, R. (2016) Soil health and carbon management. Food and Energy Security, v. 5, n. 4, p. 212–222. https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/fes3.96

Leitão, A. (2015) Economia circular: uma nova filosofia de gestão para o séc. XXI. Circular economy: a new management philosophy for the XXI st century. Portuguese Journal of Finance, Management and Accounting, v. 1, n. 2, p. 149–171. https://ciencia.ucp.pt/ws/portalfiles/portal/39919898/114_613_2_PB.pdf

Maathuis, F. J. M. Physiological functions of mineral macronutrients. Current Opinion in Plant Biology, v. 12, n. 3, p. 250–258. https://doi.org/10.1016/j.pbi.2009.04.003

Mandeep, G.K.G., Liu, H., Shukla, P. (2019) Pulp and paper industry–based pollutants, their health hazards and environmental risks. Current Opinion in Environmental Science & Health, [s. l.], v. 12, p. 48–56. https://doi.org/10.1016/j.coesh.2019.09.010

Oliveira, F. R., França, S. L. B. Rangel, L. A. D. (2019) Princípios de economia circular para o desenvolvimento de produtos em arranjos produtivos locais. Interações (Campo Grande), p. 1179–1193. https://doi.org/10.20435/inter.v20i4.1921

Olugbenga, O. S., Adeleye, P. G., Oladipupo, S. B., Adeleye, A. T., John, K. I. (2024) Biomass-derived biochar in wastewater treatment- a circular economy approach. Waste Management Bulletin, v. 1, n. 4, p. 1–14. https://doi.org/10.1016/j.wmb.2023.07.007

Rasa, K. Pennanen, T., Peltoniemi, K., Velmala, S., Fritze, H., Kaseva, J., Joona, J., Uusitalo, R. (2021) Pulp and paper mill sludges decrease soil erodibility. Journal of Environmental Quality, v. 50, n. 1, p. 172–184. https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/jeq2.20170

Räty, M., Termonen, M., Hyvönen, J., Uusi-Kämppä, J., Järvenranta, K., Soinne, H., Nikama, J., Rasa, K., Järvinen, M., Keskinen, R. (2024) The amendment value of pulp and paper mill sludges in Finnish coarse-textured soil. Geoderma Regional, v. 39, p. e00894, https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2024.e00894

Räty, M., Termonen, M., Soinne, H., Nikama, J., Rasa, K., Järvinen, M., Lappalainen, R., Auvinen, H., Keskinen, R. (2023) Improving coarse-textured mineral soils with pulp and paper mill sludges: Functional considerations at laboratory scale. Geoderma, v. 438, p. 116617. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2023.116617

Rodrigues, B. V. C., Carneiro, A. O., Torres, C. M. M. E., Caldeira, D. C. D., Demuner, I. F., Silva, C. M. (2024) Potential energy generation of sludge from a thermomechanical pulp (TMP) mill. Journal of Material Cycles and Waste Management, 26:5, v. 26, n. 5, p. 3102–3113, https://link.springer.com/article/10.1007/s10163-024-02031-4

Sasu, D. D. (2024). Global pulp production by type. Statista. https://www.statista.com/statistics/596069/pulp-production-distribution-worldwide-by-grade/

Shahzad, M., Hayat, R., Mujtaba, G., Rehman, W. U., Nadeem, M. (2025) Biofertilizers in sustainable agriculture: mechanisms, applications, and future prospects. Discover Agriculture, v. 3, n. 1, p. 224-, https://link.springer.com/article/10.1007/s44279-025-00318-0

Silva, S., Carson, P., Indrapala, D. V., Warwick, B., Reichman, S. M. (2023) Land application of industrial wastes: impacts on soil quality, biota, and human health. Environmental Science and Pollution Research, v. 30, n. 26, p. 67974–67996. https://link.springer.com/article/10.1007/s11356-023-26893-7

Sarruge, J. R.; Haag, H. P. (1974) Análises químicas de plantas. Piracicaba, SP, Brasil: ESALQ- Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz

Thor, K. (2019) Calcium—Nutrient and Messenger. Front. Plant Science, v. 10, p. 449564. https://doi.org/10.3389/fpls.2019.00440

Turner, T., Wheeler, R., Oliver, I. W. (2022) Evaluating land application of pulp and paper mill sludge: A review. Journal of Environmental Management, v. 317, p. 115439. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.115439

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Caracterização Química e Determinação da Densidade Básica de Dois Clones de *Pinus taeda* L.

Romulo Koeche[1]; Polliana D'Angelo Rios[1]; Rodrigo Schmitz[1]; Natália Durigo Melo[1;]
Thamara dos Santos Osaki[1]; José Fellip Catique Marinho[1]; Alexsandro Bayestorff da Cunha[1];

[1] Centro de Ciências Agroveterinárias – CAV. Universidade do Estado de Santa Catarina UDESC -Avenida Luiz de Camões, nº 2090, no Bairro Conta Dinheiro, em Lages, Santa Catarina (CEP 88520-000).

Resumo: O setor florestal brasileiro demanda matérias-primas de qualidade e com propriedades tecnológicas bem caracterizadas para otimizar os processos industriais. O objetivo deste trabalho foi avaliar a densidade básica ao longo do fuste e a composição química da madeira de dois clones de *Pinus taeda* L. (W15 e W20), provenientes de um plantio experimental comercial em Campo Belo do Sul, no estado de Santa Catarina. A amostragem consistiu em cinco árvores por clone, das quais foram retirados discos nas posições de 0, 25, 50, 75 e 100% da altura comercial. A densidade básica foi determinada pelo método de imersão em água, e a caracterização química (extrativos, lignina e cinzas) foi realizada em triplicata a partir de amostras compostas dos discos da base (0%). Ambos os clones apresentaram redução da densidade básica no sentido base-topo sem interação significativa (clone x posição). Contudo, o clone W15 apresentou maior densidade básica média (0,354 g/cm^3 e maior homogeneidade longitudinal, com estabilização dos valores a partir de 25% da altura comercial. O clone W20 exibiu menor densidade (0,321 g/cm³)e queda contínua até o topo. Quimicamente, o W20 acumulou teores significativamente superiores de extrativos totais (2,32%) e cinzas (0,22%), valores mais que duas vezes superiores aos do W15, enquanto o W15 destacou-se pelo maior teor de lignina (28,97%). Conclui-se que o clone W15 possui maior aptidão para processos que exigem uniformidade e menor consumo de reagentes (como celulose e serraria), enquanto o W20 apresenta maior heterogeneidade e requer estratégias de segregação de toras para seu aproveitamento industrial.

Palavras-chave: *Pinus taeda*; Densidade básica; Extrativos; Lignina; Homogeneidade do fuste.

Chemical Characterization and Basic Density Determination of Two *Pinus taeda* L. Clones

Abstract: The Brazilian forestry sector demands high-quality raw materials with well-characterized technological properties to optimize industrial processes. This study aimed to evaluate the basic density along the stem and the chemical composition of wood from two *Pinus taeda L*. clones (W15 and W20) from a commercial experimental plantation in Campo Belo do Sul, Santa Catarina State, Brazil. Sampling consisted of five trees per clone, from which discs

were collected at 0, 25, 50, 75, and 100% of the commercial height. Basic density was determined by the water immersion method, and chemical characterization (extractives, lignin, and ash content) was performed in triplicate from composite samples of the base discs (0%). Both clones showed a reduction in basic density in the base-to-top direction, with no significant interaction (clone × position). However, clone W15 showed a higher mean basic density (0,354 g/cm³) and greater longitudinal homogeneity, with values stabilizing from 25% of the commercial height onwards. Clone W20 exhibited lower density 0,321 g/cm³ and a continuous decrease toward the top. Chemically, W20 accumulated significantly higher contents of total extractives (2,32%) and ash (0,22%) more than twice the values observed in W15 whereas W15 stood out for its higher lignin content (28.97%). It is concluded that clone W15 is better suited for industrial processes requiring high uniformity and lower chemical consumption (such as pulp production and sawmilling), whereas W20 exhibits greater heterogeneity and requires log segregation strategies for optimal industrial utilization.

Keywords: *Pinus taeda*; Basic density; Extractives; Lignin; Stem homogeneity.

1. Introdução

O setor florestal brasileiro possui grande relevância econômica, ambiental e social, destacando-se mundialmente pela elevada produtividade das florestas plantadas e pela utilização de tecnologias voltadas ao manejo e ao melhoramento genético de espécies florestais. Dentre as espécies de maior importância para o setor madeireiro nacional, o *Pinus taeda* apresenta amplo destaque devido à sua adaptabilidade às condições climáticas do Sul do Brasil, rápido crescimento e versatilidade de uso industrial.

O aumento da demanda por matéria-prima de qualidade tem impulsionado o desenvolvimento de programas de melhoramento genético voltados à seleção de materiais com maior produtividade e melhores propriedades tecnológicas da madeira. Segundo Nascimento et al. (2023), a caracterização tecnológica da madeira constitui a base científica para direcionar materiais genéticos às aplicações industriais adequadas e orientar programas de melhoramento florestal

De acordo com Longui et al. (2025) a densidade básica da madeira é uma das propriedades físicas mais importantes para a indústria florestal, pois está diretamente associada à produtividade e qualidade do carvão, celulose e resistência físico-mecânica do papel. As propriedades físicas da madeira, especialmente a densidade, possuem relação direta com o rendimento industrial e qualidade dos produtos obtidos. Além disso, a densidade pode variar em função do material genético e da posição longitudinal no fuste das árvores (Szaban *et al*., 2023).

As características químicas da madeira determinam aproveitamento industrial. A quantificação de extrativos permite avaliar aspectos relacionados à durabilidade natural, comportamento químico e potencial de utilização da madeira.

A concentração desses componentes varia conforme o tipo e as partes da madeira, alterando as propriedades químicas de camada para camada na parede celular (Zhang et al., 2022). Os produtos derivados da madeira dependem diretamente de sua composição química, tornando sua caracterização fundamental para processos industriais (Hidalgo et al., 2024).

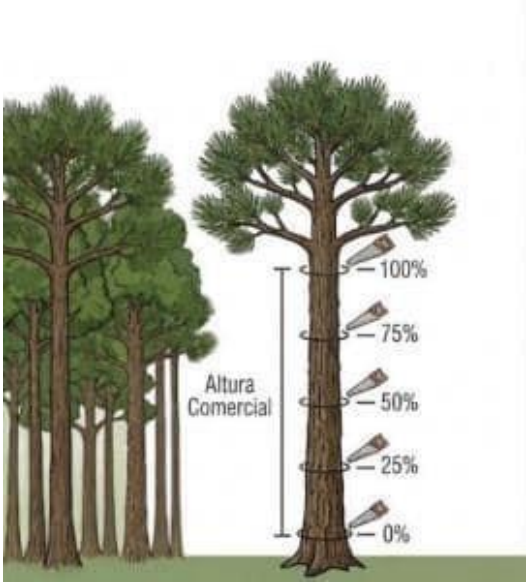
Logo, o estudo teve como objetivo determinar a composição química, a densidade básica da madeira de dois diferentes clones de *Pinus taeda*, denominados W20 e W15, provenientes de um plantio experimental comercial pertencente a uma empresa localizada no município de Campo Belo do Sul, Santa Catarina, a fim de determinar o melhor uso comercial dos clones.

2. Material e métodos

Foram avaliados dois clones de *Pinus taeda* (W15 e W20), oriundos de plantio experimental em espaçamento de 2,5 × 3,0 m, localizado no município de Campo Belo do Sul, SC. Para cada clone, amostraram-se cinco árvores e retiraram-se discos nas posições de 0, 25, 50, 75 e 100% da altura comercial com critério de ponta de 8 centímetros.

A densidade básica da madeira foi determinada pelo método de imersão em água, conforme a norma ABNT NBR 11941 (2003). O delineamento para a análise da densidade básica seguiu um esquema fatorial 2 x 5 (dois clones e cinco posições relativas no fuste), totalizando 49 observações, na Figura 1 apresenta-se o esquema de amostragem.

Figura 1. Figura esquemática da amostragem de discos ao longo do fuste.



Fonte: Autor, 2026.

Para a caracterização química da madeira de cada clone, foram avaliadas seis propriedades em triplicata, a partir da amostra homogeneizada dos discos da base (0%). As metodologias e normas técnicas empregadas estão descritas na Tabela 1. O teor de holocelulose foi determinado por diferença em relação aos teores de extrativos totais, lignina e cinzas.

Tabela 1. Normas e métodos empregados na caracterização química da madeira dos clones de *Pinus taeda* L.

Análise	Norma
Teor de cinzas	TAPPI T222 (1993)
Extrativos totais	NBR 14660 (ABNT, 2004)
Teor extrativos em hidróxido de sódio	NBR 7990 (ABNT, 2002)
Teor de extrativos em etalno-tolueno	NBR 14853 (ABNT, 2003)
Teor de lignina	TAPPI T413 (1993)
Teor de holocelulose	$T_{holocelulose} = 100 - (T_{extrativos\ totais} + T_{lignina} + T_{cinzas})$

Fonte: Autor, 2026.

A densidade básica média por clone foi calculada por meio das medições efetuadas ao longo do fuste. Dada a restrição amostral de dois materiais genéticos (n = 2), condição que impossibilita o cálculo de coeficientes de correlação e a aplicação de testes de significância estatística, a relação entre as variáveis químicas e a densidade básica foi abordada sob um panorama exploratório e descritivo, como tendência qualitativa.

Os pressupostos de normalidade dos resíduos e homogeneidade de variâncias foram verificados pelos testes de Shapiro-Wilk e de Levene (centrado na mediana).

Para a densidade básica, como os resíduos na escala original não atenderam à normalidade, aplicou-se transformação Box-Cox. As diferenças entre médias foram avaliadas pelo teste de Tukey ($\alpha = 0,05$) em duas direções: comparação entre clones dentro de cada posição e comparação entre posições dentro de cada clone.

Para as análises químicas, atendidos ambos os pressupostos para todas as propriedades, a comparação entre clones foi realizada pelo teste t de Student ($\alpha = 0,05$).

A associação entre as propriedades químicas e a densidade básica média de cada clone foi avaliada de forma exploratória e descritiva, por se tratar de apenas dois clones, condição em

que não é possível estimar coeficiente de correlação nem realizar teste de significância. A associação é apresentada como tendência qualitativa, sem inferência estatística.

As análises foram conduzidas no ambiente R versão 4.6.0 (R Core Team, 2026). O modelo misto de densidade utilizou o pacote *Nlme*; as comparações múltiplas de Tukey, os pacotes *Emmeans* e *Multcomp*; o teste de Levene, o pacote *Car*. Os testes de Shapiro-Wilk e t de Student foram executados com funções do pacote base *Stats*.

3. Resultados e discussão

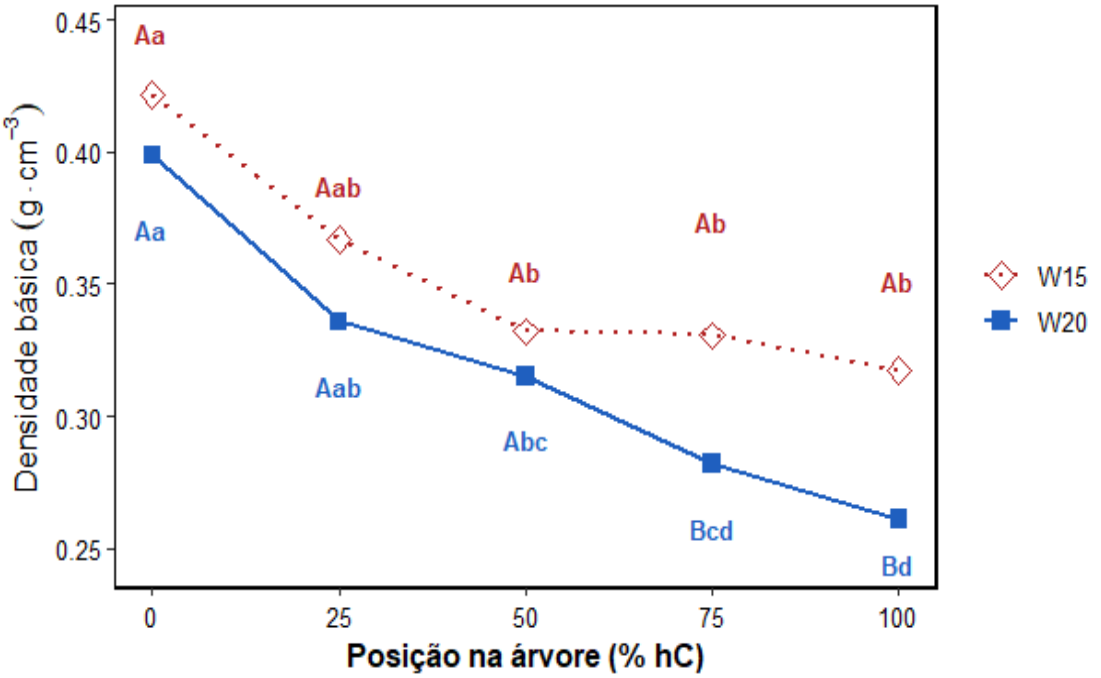
A Análise de Variância (ANOVA) do modelo misto indicou efeito significativo isolado para os fatores clone ($p<0,001$) e posição no fuste ($p<0,001$). A interação entre os fatores (clone x posição), não foi significativa ($p > 0,05$), o que demonstra que ambos os materiais genéticos apresentam um padrão longitudinal de variação da densidade básica similar ao longo da árvore, sem inversões de comportamento.

Ao avaliar a comparação entre os clones dentro de cada altura relativa (letras maiúsculas), observa-se que os materiais não diferem estatisticamente nas porções inferior e intermediária do fuste (0, 25 e 50%). No entanto, a partir de 75% da altura comercial e no topo (100%), o clone W20 passa a apresentar densidade básica significativamente menor em relação ao W15.

A redução da densidade básica no sentido base-topo é um padrão clássico e amplamente consolidado para espécies do gênero *Pinus* (Dimou; Tsaliki; Kitikidou, 2022). Essa tendência está diretamente associada às variações morfológicas da madeira ao longo da altura da árvore, de acordo com Górska et al. (2025). A madeira próxima à base exibe densidade mais alta, enquanto a madeira do topo apresenta menor densidade e resistência devido a traqueídeos menores e paredes celulares mais finas (melo *et al.*, 2015).

Todas as seis propriedades químicas atenderam aos pressupostos de normalidade (Shapiro-Wilk, $p > 0,05$) e homogeneidade de variâncias (Levene, $p > 0,05$), permitindo o uso do teste t de Student. Os dois clones diferiram significativamente em todas as propriedades avaliadas (Tabela 2). O clone W20 apresentou maiores teores de extrativos (totais, água fria, água quente e NaOH 1%) e de cinzas, enquanto o W15 apresentou maior teor de lignina. A maior diferença relativa ocorreu nos extrativos totais e em água fria, com valores praticamente dobrados no W20, e nas cinzas, mais que o dobro no W20.

Figura 2. Densidade básica da madeira (g/cm³) ao longo do fuste em dois clones de *Pinus taeda*.



Letras maiúsculas comparam clones dentro de cada posição; letras minúsculas comparam posições dentro de cada clone (Tukey, α = 0,05).

Fonte: Autor, 2026.

Tabela 2. Composição química da madeira de dois clones da espécie *Pinus taeda* (média ± desvio-padrão, n = 3 réplicas analíticas) e densidade básica média dos clones W15 e W20, com o p-valor do teste t de Student.

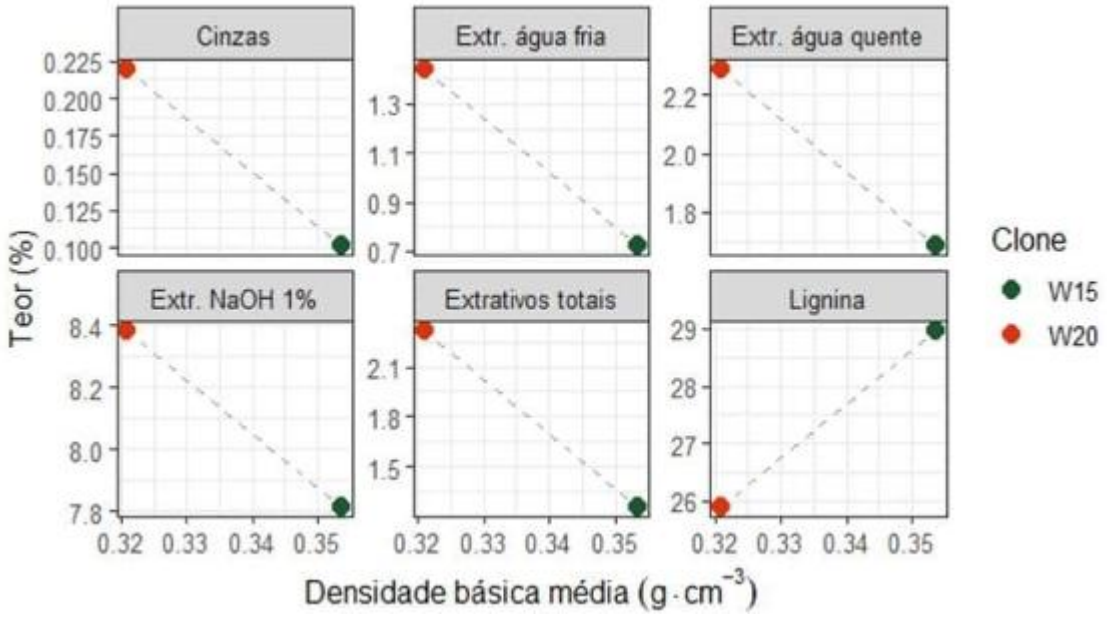
Propriedade (%)	**W15**	**W20**	**p-valor**	**Maior**
Extrativos totais	1,25 ± 0,12	2,32 ± 0,18	0,001	W20
Extrativos água fria	0,72 ± 0,08	1,44 ± 0,13	0,0013	W20
Extrativos água quente	1,69 ± 0,13	2,29 ± 0,16	0,0076	W20
Extrativos NaOH 1%	7,81 ± 0,25	8,38 ± 0,20	0,0368	W20
Lignina	28,97 ± 0,82	25,89 ± 0,65	0,007	W15
Cinzas	0,10 ± 0,02	0,22 ± 0,01	0,0003	W20
Densidade básica (g·cm⁻³)	0,354 ± 0,055	0,321 ± 0,054	0,0011*	W15

Fonte: Autor, 2026.

O clone W15 combinou maior densidade básica (0,354 g/cm³)com maior teor de lignina e menores teores de extrativos e cinzas. O clone W20, de menor densidade (0,321 g/cm³) apresentou o padrão oposto: mais extrativos e cinzas, menos lignina (Figura 3).

A densidade básica da madeira é sob forte controle genético em múltiplas espécies florestais, com estimativas de herdabilidade frequentemente superiores às de características de crescimento (Wang, *et al*., 2024). Em coníferas, a densidade é geralmente reconhecida como uma característica mais herdável que o crescimento radial (Takahashi, *et al*., 2024). Os valores obtidos na quantificação de extrativos totais se mostram inferiores aos encontrados por Baptista (2019) para *P. taeda* 4,51%e 3,50%, mas são próximos aos teores obtidos por Vivian *et al.* (2015) 2,40% a 3,30% para a mesma espécie.

Figura 3. Associação entre as propriedades químicas e a densidade básica média dos clones W15 e W20.



Fonte: Autor, 2026.

Considerando os dois clones, observa-se uma associação negativa aparente entre densidade básica e teor de extrativos/cinzas, e uma associação positiva aparente entre densidade e lignina. Esse padrão é coerente com a literatura, na qual maior proporção de lignina tende a acompanhar maior densidade da parede celular, ao passo que altos teores de extrativos e minerais nem sempre se convertem em massa estrutural (Zhu *etal*., 2024).

4. Conclusões

A densidade básica da madeira apresentou tendência decrescente no sentido base-topo para ambos os materiais genéticos, refletindo a variação anatômica e morfológica característica do gênero *Pinus*, sem interação significativa entre clone e posição no fuste.

O clone W15 destacou-se pela maior homogeneidade ao longo do fuste, apresentando estabilização da densidade básica a partir de 25% da altura comercial. Em contrapartida, o clone W20 exibiu maior heterogeneidade longitudinal, com decréscimo contínuo e sem estabilização até o topo do fuste.

Os clones apresentaram comportamentos químicos diferentes. O clone W20 acumulou teores mais elevados de extrativos e de cinzas (mais que o dobro em relação ao W15), enquanto o clone W15 caracterizou-se pelo maior teor de lignina.

O clone W15 possui maior aptidão para processos que exigem uniformidade e menor consumo de reagentes (como celulose e serraria), enquanto o W20 apresenta maior heterogeneidade e requer estratégias de segregação de toras para seu aproveitamento industrial.

5. Referências bibliográficas

Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2022). *Projeto de estruturas de madeira* (ABNT NBR 7190). ABNT.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2002). *Madeira - Determinação do teor de extrativos em extratores do tipo Soxhlet* (ABNT NBR 7990). ABNT.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2003). *Madeira - Determinação da densidade básica* (ABNT NBR 11941). ABNT.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2004). *Madeira - Amostragem e preparação para análise* (ABNT NBR 14660). ABNT.

Baptista, R. O. (2019). *Potencial da madeira de Pinus maximinoi aos sete anos para a produção de polpa celulósica kraft* [Dissertação de mestrado, Universidade de São Paulo]. Biblioteca Digital de Teses e Dissertações da USP.

Dimou, V., Tsaliki, A., & Kitikidou, K. (2023). Radial and longitudinal density variations in *Abies cephalonica* and *Pinus halepensis*. *Journal of Forestry Research*, 34(2), 555-565. https://doi.org/10.1007/s11676-022-01521-1

Górska, M., et al. (2025). Wood mechanical properties scale with distance to tree tip in the outermost growth ring of a Scots pine. *Trees*, 39(31), 1-10. https://doi.org/10.1007/s00468-025-02608-y

Hidalgo, F. A., Honorato-Salazar, J. A., & Colotl Hernández, G. (2024). Caracterização lignocelulósica da madeira de *Pinus patula* de Oaxaca, México. *Brazilian Journal of Animal and Environmental Research*, 7(4), 1-10. https://doi.org/10.34188/bjaerv7n4-004

Hu, J., Ren, W., Guo, F., Wang, H., & Yu, Y. (2024). Structural elucidation of lignin, hemicelluloses and LCC in bamboo fibers and parenchymal cells. *International Journal of Biological Macromolecules*, 270, 133341. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.133341

Longui, E. L., et al. (2025). Parâmetros e correlações genéticas para crescimento e propriedades da madeira em *Peltophorum dubium*. *Revista do Instituto Florestal*, 37, e962. https://doi.org/10.24278/rif.2025.37e962

Melo, R. (2015). Variação radial e longitudinal da densidade básica da madeira de *Pinus taeda* L. em diferentes idades. *Revista de Ciências Agrárias*.

Nascimento, C., et al. (2023). Technological properties of small-diameter wood in a reduced-impact logging area in tropical forest. *European Journal of Forest Research*, 142(5), 1-14. https://doi.org/10.1007/s10342-023-01588-3

Technical Association of the Pulp and Paper Industry. (1993). *Acid-insoluble lignin in wood and pulp* (TAPPI T 222 om-93). TAPPI.

Technical Association of the Pulp and Paper Industry. (1993). *Ash in wood, pulp, paper and paperboard: combustion at 525 °C* (TAPPI T 413 om-93). TAPPI.

Vivian, M. A., et al. (2015). Qualidade das madeiras de *Pinus taeda* e *Pinus sylvestris* para a produção de polpa celulósica kraft. *Scientia Forestalis*, 43(105), 183-191.

Zhang, X., Li, L., & Xu, F. (2022). Características químicas da parede celular da madeira com ênfase na ultraestrutura: uma mini-revisão. *Forests*, 13(3), 439. https://doi.org/10.3390/f13030439

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Coleção de referência na identificação forense de carvão vegetal: experiência da Antracoteca da Xiloteca JIGw

Maria Eduarda Silva Pereira[1]; Amanda Carvalho de Melo[1]; Beatriz Santos Neves [1]; Karolayne Oliveira da Silva[1]; Yasmin Araujo dos Santos[1]; Lidiane Pereira Ferreira[1]; Luiz Eduardo de Lima Melo[1]

[1] Universidade do Estado do Pará, Campus VIII, Centro de Ciências Naturais e Tecnologia, Xiloteca Joaquim Ivanir Gomes (JIGw)

Resumo: A identificação forense de carvão vegetal auxilia a fiscalização ambiental e o combate ao comércio ilegal de produtos florestais. Este estudo caracterizou a Antracoteca da Xiloteca "Joaquim Ivanir Gomes" (JIGw) e avaliou sua aplicação na identificação de carvão apreendido pela Polícia Rodoviária Federal. A coleção possui 187 amostras de referência, distribuídas em 56 espécies, 45 gêneros e 22 famílias botânicas. Foram analisados 22 laudos técnicos referentes a cerca de 1.170 m³ de carvão vegetal, por meio de comparação anatômica. Embora as cargas fossem declaradas como *Eucalyptus* spp., nenhuma apresentou compatibilidade com esse gênero. Foram identificados táxons de algumas famílias, com predominância de Fabaceae, Lecythidaceae, Sapotaceae, Combretaceae, Moraceae e Anacardiaceae. Os resultados evidenciam o potencial da Antracoteca JIGw como ferramenta científica para identificação forense e validação da rastreabilidade de produtos florestais.

Palavras-chave: Carvão vegetal; Identificação forense; Xiloteca.

Reference collections in forensic charcoal identification: the experience of the JIGw Xylotheque Anthracotheca

Abstract: Forensic charcoal identification aids environmental enforcement and efforts to combat the illegal trade in forest products. This study characterized the charcoal reference collection (anthracotheca) of the Joaquim Ivanir Gomes Wood Collection (JIGw) and evaluated its application in identifying charcoal seized by the Federal Highway Police. The collection comprises 187 reference samples representing 56 species, 45 genera, and 22 botanical families. Twenty-two technical reports covering approximately 1,170 m³ of charcoal were analyzed through anatomical comparison. Although the shipments were declared as *Eucalyptus* spp., none matched this genus. Taxa from several families were identified, with a predominance of Fabaceae, Lecythidaceae, Sapotaceae, Combretaceae, Moraceae, and Anacardiaceae. The results demonstrate the potential of the JIGw charcoal collection as a scientific tool for forensic identification and the validation of forest product traceability.

Keywords: Charcoal; Forensic identification; Xylarium.

a. 1. Introdução

A fiscalização ambiental de produtos florestais na Amazônia enfrenta desafios significativos, especialmente em razão da elevada diversidade de espécies, da complexidade da

cadeia logística e da ocorrência frequente de fraudes documentais, fatores que comprometem a verificação da origem e da correta identificação taxonômica dos materiais transportados. Embora sistemas de rastreabilidade, como o Documento de Origem Florestal (DOF) e a Guia Florestal (GF), representem instrumentos fundamentais para o controle e o monitoramento da exploração e do transporte de produtos florestais, sua efetividade está condicionada à capacidade de validar, durante as ações de fiscalização, a correspondência entre a composição real das cargas e as informações declaradas nos documentos oficiais (Dormontt *et al*., 2015; Gasson, 2011; Wiedenhoeft *et al*., 2019). Nesse contexto, a confirmação da identidade das espécies e da origem declarada dos produtos constitui uma etapa essencial para o fortalecimento dos mecanismos de controle florestal e para a redução de práticas ilegais associadas ao comércio de madeira (Schmitt & Scardua, 2015; Carvalho *et al*., 2019; Reydon *et al*., 2020; Brancalion *et al*., 2018).

Nesse contexto, as coleções biológicas de referência constituem uma infraestrutura científica importante para a identificação forense de produtos florestais, uma vez que reúnem materiais com identidade botânica conhecida, permitindo a comparação entre amostras de origem desconhecida e espécimes previamente caracterizados. Além de subsidiarem pesquisas taxonômicas e anatômicas, essas coleções desempenham papel estratégico na emissão de laudos técnicos, na capacitação de agentes públicos e no fortalecimento das ações de fiscalização ambiental (Gasson, 2011; Dormontt *et al*., 2015; da Silva *et al*., 2024).

Entre os produtos florestais, o carvão vegetal representa um desafio adicional para a fiscalização, pois a carbonização altera significativamente as características organolépticas da madeira, especialmente cor, textura e massa, levando frequentemente à percepção de que esse material não é passível de identificação taxonômica (Gonçalves & Scheel-Ybert, 2016). Entretanto, grande parte das características anatômicas do lenho, incluindo estruturas diagnósticas como parênquima e arranjos celulares, permanece preservada após a carbonização, permitindo a identificação taxonômica e tornando a anatomia do carvão vegetal uma importante ferramenta forense para subsidiar ações de fiscalização e rastreabilidade de produtos florestais (Gonçalves *et al*., 2014; Low *et al*., 2023).

Estudos conduzidos por Wiedenhoeft *et al*. (2019), Costa e*t al*. (2025) demonstram que fraudes envolvendo carvão vegetal e outros produtos florestais são recorrentes, principalmente pela substituição das espécies declaradas na documentação por táxons distintos daqueles efetivamente comercializados. Esse cenário evidencia que a conferência exclusivamente documental é insuficiente para assegurar a rastreabilidade dos produtos florestais, reforçando a

importância das coleções de referência como suporte à identificação anatômica em ações de fiscalização (Nellemann *et al*., 2018; Costa *et al*., 2025).

A Antracoteca da Xiloteca "Joaquim Ivanir Gomes" (JIGw), da Universidade do Estado do Pará (UEPA), reúne amostras de carvão vegetal obtidas por carbonização controlada de madeiras previamente identificadas botanicamente e tombadas em herbário e xiloteca, assegurando a rastreabilidade entre o carvão vegetal e sua espécie de origem. Essa coleção científica tem sido utilizada como suporte à emissão de laudos anatômicos relacionados às apreensões de carvão vegetal, realizadas por órgãos de fiscalização ambiental da região Sudeste do Estado do Pará, permitindo a comparação entre amostras questionadas e materiais de referência e contribuindo para a validação taxonômica de cargas apreendidas.

Dessa forma, o presente estudo teve como objetivo caracterizar a Antracoteca da Xiloteca JIGw e avaliar sua aplicação como coleção científica de referência para a identificação forense de carvão vegetal proveniente de ações de fiscalização ambiental (Gasson, 2011; Dormontt *et al*., 2015).

b. 2. Material e métodos

A Coleção de Referência de Carvão Vegetal da Xiloteca “Joaquim Ivanir Gomes” (JIGw), vinculada à Universidade do Estado do Pará (UEPA), é constituída por amostras de carvão vegetal obtidas por carbonização controlada de madeiras previamente identificadas botanicamente e depositadas na xiloteca institucional. As carbonizações foram realizadas em laboratório utilizando reator metálico de aço inoxidável com capacidade aproximada de 5 L. Os corpos de prova destinados à carbonização apresentavam dimensões padronizadas de 3 × 3 × 5 cm, sendo a quantidade de amostras em cada ensaio definida pela capacidade útil do reator, não havendo padronização da massa total de madeira carbonizada. A carbonização foi realizada em mufla elétrica durante aproximadamente 5 h, sob taxa de aquecimento de 1,66 °C min^{-1}, até 450 °C, permanecendo nessa temperatura por 2 h. Após o resfriamento, cada amostra de carvão permaneceu vinculada ao respectivo exemplar da xiloteca e ao respectivo material testemunho depositado em herbário, assegurando a rastreabilidade entre o carvão vegetal e sua espécie de origem.

A xiloteca está organizada segundo o sistema de classificação APG III, adotando a nomenclatura da Flora do Brasil, e possui banco de dados informatizado no software Nature 4.0, contendo informações taxonômicas, número de tombo, correspondência com exsicatas de herbário, procedência e demais dados de curadoria. As amostras são incorporadas em

numeração sequencial e organizadas por famílias botânicas, permitindo sua utilização como coleção científica de referência.

Para caracterização da coleção, foram levantadas informações referentes ao número de amostras, espécies, gêneros, famílias botânicas e procedência do material. A aplicação da coleção, foi avaliada por meio dos laudos técnicos de identificação anatômica de carvão vegetal emitidos em apoio às ações de fiscalização da Polícia Rodoviária Federal (PRF) no estado do Pará durante 2025, utilizando-se as informações constantes nos Termos Circunstanciados de Ocorrência (TCO), Guias Florestais (GF) e resultados das identificações anatômicas.

As solicitações de identificação foram encaminhadas oficialmente à UEPA pelos órgãos de fiscalização, sendo as amostras coletadas exclusivamente pelos agentes responsáveis e posteriormente entregues à Xiloteca JIGw, preservando-se a cadeia de custódia do material. A xiloteca atuou exclusivamente na identificação anatômica e emissão dos laudos técnicos. Os fragmentos de carvão foram fraturados manualmente no plano transversal e analisados em estereomicroscópio binocular com iluminação incidente (35×), utilizando-se os descritores anatômicos da IAWA Committee (1989). Após a emissão dos laudos, as amostras permaneceram sob guarda técnica da Xiloteca JIGw por até dois anos, para fins de rastreabilidade e eventual reanálise, mediante autorização do órgão solicitante.

c. 3. Resultados e discussão

3.1 Caracterização da Coleção de Referência de Carvão Vegetal

A Coleção de Referência de Carvão Vegetal da Xiloteca “Joaquim Ivanir Gomes” (JIGw) reúne um conjunto diversificado de táxons, constituindo uma base para as análises desenvolvidas neste estudo.

Tabela 1. Caracterização da Coleção de Referência de Carvão Vegetal da Xiloteca "Joaquim Ivanir Gomes" (JIGw)

Características	Valor
Amostras de carvão vegetal	187
Espécies	56
Gêneros	45
Famílias	22
Materiais vinculados à xiloteca	129
Materiais vinculados ao herbário	100
Materiais de híbridos de *Eucalyptus*	29

Fonte: Autores (2026).

A vinculação entre as amostras carbonizadas, os registros da xiloteca e as respectivas exsicatas de herbário assegura a rastreabilidade do acervo e confere maior confiabilidade às identificações realizadas (Tabela 1).

3.2 Composição taxonômica da coleção

A coleção apresentou predominância de representantes da família Fabaceae, seguida por Lecythidaceae, Combretaceae, Moraceae, Sapotaceae e Anacardiaceae (Tabela 2).

Tabela 2. Famílias botânicas mais representativas na Coleção de Referência de Carvão Vegetal da Xiloteca JIGw

Família	Espécies	Amostras	% do acervo
Fabaceae	11	21	11,2
Combretaceae	3	10	5,3
Lecythidaceae	8	9	4,8
Moraceae	4	7	3,7
Sapotaceae	4	7	3,7
Anacardiaceae	2	7	3,7

Fonte: Autores (2026).

A predominância dessas famílias amplia o potencial de uso da coleção, pois reúne espécies frequentes nas florestas amazônicas e em áreas sob manejo. Essa diversidade aumenta a probabilidade de correspondência entre amostras apreendidas e o acervo de referência, fortalecendo a confiabilidade das identificações.

3.3 Aplicação da coleção na fiscalização

Durante o período avaliado, a Antracoteca da Xiloteca JIGw foi empregada na emissão de laudos técnicos relacionados às apreensões de carvão vegetal realizadas pela Polícia Rodoviária Federal, permitindo avaliar sua aplicação em situações reais de fiscalização ambiental (Tabela 3).

Tabela 3. Caracterização das apreensões de carvão vegetal analisadas pela Antracoteca da Xiloteca JIGw. TCO = Termo Circunstanciado de Ocorrência

Variável	Valor
TCO analisados	22
Volume total apreendido (mdc ou m³)	≈ 1,170 m³
Estados de origem	Pará, Maranhão e Tocantins
Estados de destino	Pará e Maranhão (eixo siderúrgico Marabá–Açailândia)
Cargas compatíveis com *Eucalyptus* spp.	0
Cargas com espécies nativas identificadas	22

Famílias identificadas	7
Gêneros identificados	10
Predominância taxonômica	Fabaceae e Lecythidaceae

Fonte: Autores (2026).

As análises demonstraram que nenhuma das cargas apresentou compatibilidade anatômica com *Eucalyptus* spp., embora esse gênero constasse nas Guias Florestais. As identificações revelaram divergências entre a composição botânica das cargas e as informações declaradas na documentação florestal, com predominância de representantes das famílias Fabaceae e Lecythidaceae (Tabela 3).

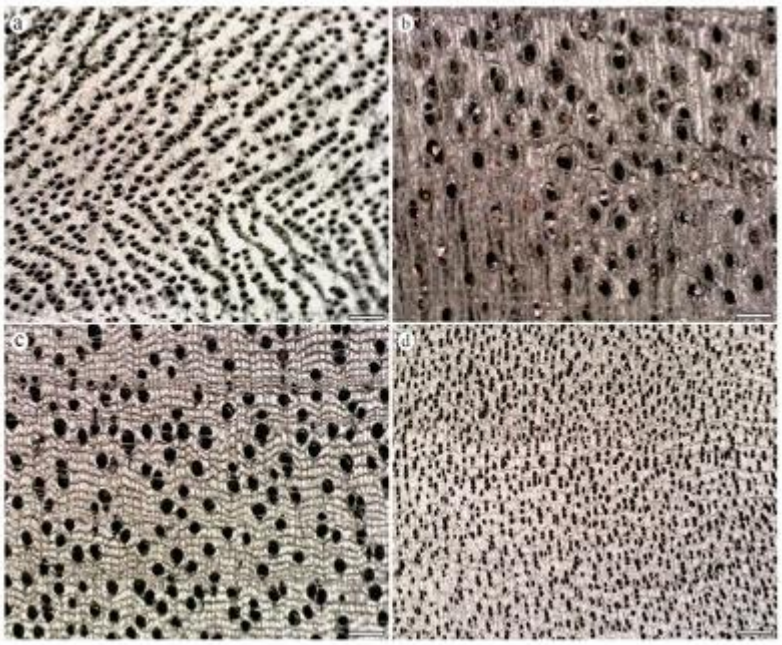


Figura 1. As características anatômicas destacadas diferenciam essas amostras do carvão de *Eucalyptus* spp. Barra de escala = 1 mm

Fonte: Autores (2026).

Caracteres anatômicos utilizados na diferenciação das amostras de carvão vegetal. (a) *Eucalyptus* spp., com vasos predominantemente solitários e parênquima vasicêntrico; (b) Fabaceae, com parênquima aliforme confluente; (c) Lecythidaceae, com parênquima em faixas estreitas e reticuladas; (d) Sapotaceae, com vasos pequenos e numerosos.

Fabaceae apresentou parênquima axial paratraqueal aliforme losangular e confluente, enquanto Lecythidaceae apresentou parênquima em faixas estreitas e reticuladas, caracteres diagnósticos distintos daqueles observados em *Eucalyptus* spp. A preservação desses caracteres após a carbonização permitiu diferenciar os táxons analisados e excluir o gênero declarado em todas as amostras.

A aplicação da Antracoteca da Xiloteca “Joaquim Ivanir Gomes” em amostras provenientes de fiscalização ambiental demonstrou sua utilidade como ferramenta de apoio à fiscalização ambiental, permitindo verificar a identidade taxonômica dos materiais apreendidos.

A preservação de caracteres anatômicos após a carbonização possibilitou a distinção dos táxons analisados, corroborando estudos da IAWA Committee (1989), Muñiz *et al*. (2012), Gonçalves *et al*. (2014) e Gonçalves e Scheel-Ybert (2016). A ausência de compatibilidade entre as amostras apreendidas e o gênero *Eucalyptus* spp., declarado nas Guias Florestais, reforça o uso da anatomia da madeira como método independente para validar documentos e fortalecer a rastreabilidade de produtos florestais.

d. 4. Conclusões

A caracterização da Antracoteca da Xiloteca "Joaquim Ivanir Gomes" demonstrou a relevância de coleções de referência para a aplicação da anatomia da madeira na ciência forense. Os resultados reforçam o papel das coleções científicas como infraestrutura estratégica para subsidiar ações de fiscalização, perícia ambiental e combate ao comércio ilegal de produtos florestais.

e. 5. Agradecimentos

Fundação Casa da Cultura de Marabá (FCCM) pela concessão de bolsas de iniciação científica, ao Programa de Pós-Graduação em Tecnologia, Recursos Naturais e Sustentabilidade na Amazônia (PPGTEC/UEPA) pelo apoio acadêmico e institucional e à Chamada Pública MCTI/FINEP/FNDCT/Identidade Brasil – Recuperação e Preservação de Acervos 2024 (Ref. 3103/24), projeto nº 5827, convênio nº 0125.0186.00, pelo apoio financeiro à pesquisa.

f. 6. Referências bibliográficas

Brancalion, P. H. S., Almeida, D. R. A., Vidal, E., Molin, P. G., Sontag, V. E., Souza, S. E. X. F., & Schulze, M. D. (2018). Fake legal logging in the Brazilian Amazon.

Science Advances, 4(8), eaat1192. https://doi.org/10.1126/sciadv.aat1192

Carvalho, W. D., Mustin, K., Hilário, R. R., Vasconcelos, I. M., Eilers, V., & Fearnside, P. M. (2019). Deforestation control in the Brazilian Amazon: A conservation struggle being lost as agreements and regulations are subverted and bypassed. *Perspectives in Ecology and Conservation, 17*(3), 122– 130. https://doi.org/10.1016/j.pecon.2019.06.002

Costa, A., Owens, F. C., Soares, R. K., & Wiedenhoeft, A. C. (2025). Fraud and misrepresentation in the lump charcoal market in the United States: A closer look inside the bag. *Forest Products Journal, 75*(2), 164–178.

Da Silva, A. A., Sousa, K. C., Souza, F. I. B., Nobre, J. R. C., Protásio, T. P., & Melo, L. E. L. (2024). Forestry control in the Brazilian Amazon III: Anatomy of wood and charcoal of tree species from sustainable forest management. *IAWA Journal, 45*(3),

297–334. https://doi.org/10.1163/22941932-bja10151

Dormontt, E. E., Boner, M., Braun, B., Breulmann, G., Degen, B., Espinoza, E., Gardner, S., Guillery, P., Hermanson, J. C., Koch, G., Lee, S. L., Kanashiro, M., Rimbawanto, A., Thomas, D., Wiedenhoeft, A. C., Yin, Y., Zahnen, J., & Lowe, A. J. (2015). Forensic timber identification: It's time to integrate disciplines to combat illegal logging. *Biological Conservation, 191*, 790–798. https://doi.org/10.1016/j.biocon.2015.06.038

Gasson, P. (2011). How precise can wood identification be? Wood anatomy's role in support of the legal timber trade, especially CITES. *IAWA Journal, 32*(2), 137–154.

Gonçalves, T. A. P., Ballarin, A. W., Nisgoski, S., & Muñiz, G. I. B. (2014). A contribution to the identification of charcoal origin in Brazil I: Anatomical characterization of *Corymbia* and *Eucalyptus*. *Maderas. Ciencia y Tecnología, 16*(3), 323–336. https://doi.org/10.4067/S0718-221X2014005000025

Gonçalves, T. A. P., Nisgoski, S., Oliveira, J. S., Marcati, C. R., Ballarin, A. W.,

& Muñiz, G. I. B. (2016). A contribution to the identification of charcoal origin in Brazil II: Macroscopic characterization of Cerrado species. *Anais da Academia Brasileira de Ciências, 88*(2), 1045–1054. https://doi.org/10.1590/0001-3765201620150322

Gonçalves, T. A. P., & Scheel-Ybert, R. (2016). Charcoal anatomy of Brazilian species. I. Anacardiaceae. *Anais da Academia Brasileira de Ciências, 88*(3 Suppl.), 1711–

1725. https://doi.org/10.1590/0001-3765201620150433

IAWA Committee. (1989). List of microscopic features for hardwood identification. *IAWA Bulletin, 10*(3), 219–332.

Low, M. C., Schmitz, N., Boeschoten, L., et al. (2023). Tracing the world's timber:

The status of scientific verification technologies for species and origin identification. *IAWA Journal, 44*, 63–84.

Muñiz, G. I. B., Nisgoski, S., França, M. C., & Schardosin, F. Z. (2012). Anatomia do carvão de espécies de Fabaceae e sua aplicação na identificação macroscópica. *Scientia Forestalis, 40*(94), 195–203.

Nellemann, C., Henriksen, R., Pravettoni, R., et al. (2018). *World atlas of illicit flows*. RHIPTO, INTERPOL & Global Initiative Against Transnational Organized Crime.

Reydon, B. P., Fernandes, V. B., & Telles, T. S. (2020). Land governance as a precondition for decreasing deforestation in the Brazilian Amazon. *Land Use Policy, 94*, 104598. https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2020.104598

Scheel-Ybert, R. (2004). Teoria e métodos em antracologia. *Arquivos do Museu Nacional, 62*(1), 3–14.

Schmitt, J., & Scardua, F. P. (2015). A descentralização das competências ambientais e a fiscalização do desmatamento na Amazônia. *Revista de Administração Pública, 49*(5), 1121–1142.

Wiedenhoeft, A. C., Simeone, J., Smith, A., Parker-Forney, M., Soares, R., & Fishman, A. (2019). Fraud and misrepresentation in retail forest products exceeds U.S. forensic wood science capacity. *PLOS ONE, 14*(7), e0219917. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0219917

Zemke, V. T., Koch, G., & Haag, V. (2025). Variation of quantitative anatomical features due to carbonization and their impact on size classes for charcoal identification.

Wood Science and Technology, 59, Article 43. https://doi.org/10.1007/s00226-025https://doi.org/10.1007/s00226-025-01641-x01641-x

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Dendrocronologia aplicada ao estudo do crescimento de Eremanthus erythropappus (DC.) MacLeish no município Liberdade de Minas Gerais

Mayara de L. Ferreira[1]; Lucas G. Pereira[1]; Thiago M. Santos[1]; Ruann R. de S. Santos[1]; Alana A. Silva[1]; Ana C. M. C. Barbosa[1]

[1] Universidade Federal de Lavras

Resumo: Diante da crescente exploração das florestas nativas, a candeia (*Eremanthus erythropappus* (DC.) MacLeish) destaca-se como espécie de alto valor econômico e ecológico no sul de Minas Gerais, associada à produção de óleo essencial (alfa-bisabolol) e ao manejo florestal sustentável. Este trabalho teve como objetivo caracterizar o crescimento radial da candeia no sítio de Liberdade (MG) por meio de técnicas dendrocronológicas, avaliando a taxa de crescimento diamétrico, a qualidade da cronologia construída e sua relação com variáveis climáticas. Discos de madeira de 20 árvores (39 raios) foram coletados, processados e datados por métodos dendrocronológicos convencionais, com validação estatística no COFECHA e padronização no ARSTAN. Os indivíduos amostrados apresentaram DAP médio de 11,83 cm e idade média de 37,7 anos, com taxa de crescimento de 0,321 cm/ano e estimativa de 28,6 anos para atingir o diâmetro mínimo de corte. A cronologia de Liberdade (1970-2017) apresentou intercorrelação de 0,444, sensibilidade média de 0,291 e EPS de 0,854, acima do limiar de robustez estatística recomendado. A correlação de Pearson identificou a precipitação de fevereiro (r = 0,32) como principal variável associada positivamente ao crescimento radial, com correlação negativa em abril (r = -0,30). A análise espacial, conduzida no KNMI Climate Explorer, associou esse sinal à atuação da Zona de Convergência do Atlântico Sul sobre a região. Os resultados evidenciam a sensibilidade climática da candeia em Liberdade e reforçam o potencial da dendrocronologia para subsidiar estratégias de manejo florestal sustentável adaptadas às condições locais do sítio.
Palavras-chave: Anéis de Crescimento; Candeia; Dendroclimatologia.

Dendrochronology applied to the study of the growth of Eremanthus erythropappus (DC.) MacLeish in Liberdade, Minas Gerais

Abstract: With the increasing exploitation of native forests, candeia (*Eremanthus erythropappus* (DC.) MacLeish) stands out as a species of high economic and ecological value in southern Minas Gerais, Brazil, associated with essential oil production (alpha-bisabolol) and sustainable forest management. This study aimed to characterize the radial growth of candeia at the Liberdade site (MG) using dendrochronological techniques, evaluating the diameter growth rate, chronology quality and its relationship with climatic variables. Wood disks from 20 trees (39 radii) were collected, processed and dated using conventional dendrochronological methods, with statistical validation in COFECHA and standardization in ARSTAN. Sampled trees showed a mean DBH of 11.83 cm and mean age of 37.7 years, with a growth rate of 0.321 cm/year and an estimated 28.6 years to reach the minimum cutting diameter. The Liberdade chronology (1970-2017) showed a mean interseries correlation of 0.444, mean sensitivity of 0.291 and EPS of 0.854, above the recommended reliability threshold. Pearson correlation identified February precipitation (r = 0.32) as the main variable positively associated with radial growth, with a negative correlation in April (r = -0.30). Spatial correlation analysis, performed in the KNMI Climate Explorer, linked this signal to the South Atlantic Convergence Zone activity over the region. These results highlight the climate sensitivity of candeia at Liberdade

and reinforce the potential of dendrochronology to support sustainable forest management strategies adapted to local site conditions.
Keywords: Growth Rings; Candeia; Dendroclimatology.

1. Introdução

As florestas nativas são essenciais para a manutenção dos ecossistemas terrestres, contribuindo para a produção de recursos socioeconômicos, conservação do solo e preservação da biodiversidade. Diante da crescente diminuição da vegetação nativa, a espécie *Eremanthus erythropappus* (DC.) MacLeish, conhecida popularmente como candeia, surge como alternativa promissora para programas de restauração ecológica, com ocorrência predominante no centro-sul de Minas Gerais (Carvalho et al., 2019).

Reconhecida por sua importância ecológica e por seu alto valor econômico, a candeia se destaca pela qualidade de sua madeira, amplamente utilizada na fabricação de mourões, esteios, caibros, postes, tacos e vigas (Mori et al., 2010), além da extração de seu óleo essencial rico em alfa-bisabolol, de aplicação farmacêutica e cosmética (Teixeira et al., 1996). Atualmente, é a única árvore nativa cuja exploração comercial é legalmente autorizada em Minas Gerais, onde ocorre com maior abundância, mediante Planos de Manejo Florestal Sustentável (Scolforo, Oliveira e Davide, 2012).

Apesar dos avanços no manejo sustentável, ainda existem lacunas no conhecimento sobre as características ambientais que influenciam o crescimento da candeia, como a idade mínima de corte e a taxa de crescimento em diferentes sítios. A dendrocronologia se destaca como ferramenta eficiente para suprir essas lacunas, permitindo determinar a idade das árvores, monitorar a taxa de crescimento ao longo do tempo e compreender a influência do clima local sobre seu desenvolvimento (Chagas et al., 2007).

Estudos dendrocronológicos com espécies tropicais nativas voltados ao manejo florestal são relativamente recentes (Brienen e Zuidema, 2006; Schöngart, 2008) e reforçam a relevância dessa abordagem para a proposição de estratégias de manejo mais eficientes. A espécie Eremanthus erythropappus apresenta anéis de crescimento bem definidos (Chagas et al., 2007), característica essencial para a aplicação da dendrocronologia, favorecida pela ocorrência da espécie em áreas de clima estacional, com períodos de seca e chuva bem definidos.

Este trabalho apresenta um recorte dos resultados obtidos para o sítio de Liberdade (MG), integrante de um estudo dendrocronológico mais amplo sobre a candeia no sul de Minas Gerais. O objetivo foi caracterizar o crescimento radial de *Eremanthus erythropappus* nesse sítio, construir e avaliar a qualidade estatística de sua cronologia padronizada e investigar a

relação entre o crescimento radial e variáveis climáticas (precipitação e temperatura), gerando subsídios técnicos para o aprimoramento de práticas de manejo sustentável adaptadas às condições locais.

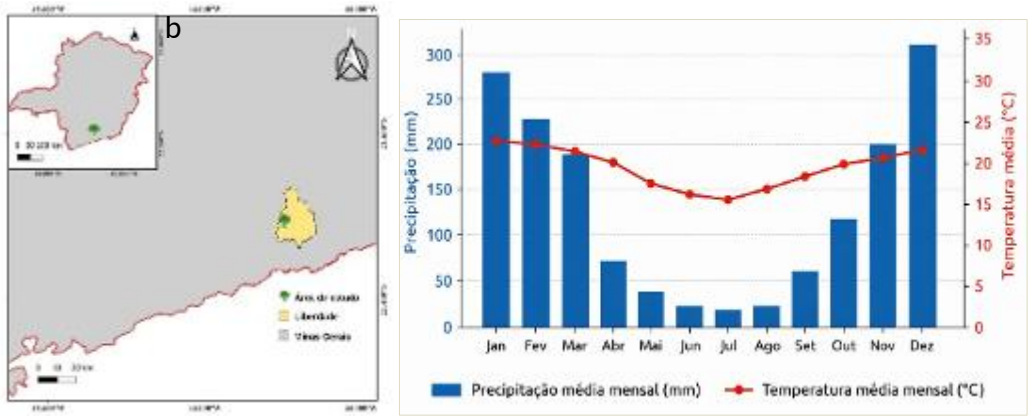
2. Material e métodos

2.1. Área de estudos

O estudo foi conduzido no município de Liberdade, submetido ao manejo florestal sustentável de *Eremanthus erythropappus* (DC.) MacLeish, localizado no sul do estado de Minas Gerais, na Bacia Hidrográfica do Rio Grande, região da Serra da Mantiqueira, em altitude aproximada de 1.249 m. A área pertencia a propriedade privada, na qual a exploração da espécie foi realizada mediante Plano de Manejo Florestal Sustentável autorizado pelo Instituto Estadual de Florestas de Minas Gerais (IEF), com a finalidade de fornecer matéria-prima para a produção de alfa-bisabolol natural.

Figura 1 – Mapas de localização e médias climatológicas do município de Liberdade .

a



Segundo a classificação climática de Köppen-Geiger (Alvares et al., 2013), o clima do sítio foi classificado como Cwb (subtropical de altitude), caracterizado por verões amenos e chuvosos e invernos frios e secos (Figura 1). Em Liberdade, a temperatura média anual foi de 17,8 °C e a precipitação média anual atingiu 1.586 mm, com o mês mais seco (julho) apresentando 21 mm e o mais chuvoso (dezembro) 308 mm de precipitação média.

2.2. Coleta de amostras

Foram instaladas parcelas retangulares de 1.000 m² (25 × 40 m) no sítio, nas quais todos os indivíduos arbóreos com DAP ≥ 5 cm foram identificados e mensurados quanto ao diâmetro e à altura total. Em conformidade com a legislação vigente para o manejo sustentável da

candeia, aproximadamente 50% dos indivíduos com DAP ≥ 5 cm foram destinados ao corte; após o abate, foi retirada de cada árvore uma seção transversal (disco) à altura de 1,30 m em relação ao solo (DAP), selecionando-se aleatoriamente discos de 20 árvores para as análises dendrocronológicas.

2.3. Preparação de amostras e análise dos anéis de crescimento da candeia

As amostras foram encaminhadas ao Laboratório de Dendrocronologia da UFLA, secas ao ar e uma das superfícies transversais de cada disco foi lixada em duas etapas até elevado grau de polimento, para visualização nítida dos anéis de crescimento. Os anéis foram identificados e demarcados em quatro raios por disco, e a datação cruzada (crossdating) foi realizada por comparação visual das séries de crescimento pelo método do gráfico de esqueleto (Skeleton Plot) (Douglass, 1941).

As larguras dos anéis foram mensuradas no sistema LINTAB-6 (Rinntech, Heidelberg, Alemanha), com precisão de 0,001 mm. A qualidade da datação cruzada foi verificada no programa COFECHA (Holmes, 1983), e as séries de largura dos anéis foram padronizadas no programa ARSTAN (Cook e Holmes, 1986), originando a cronologia padronizada representativa do sítio. A cronologia residual (res), que remove a autocorrelação de curto prazo presente na série padrão, foi utilizada nas análises de correlação clima-crescimento, por isolar a variação de alta frequência do crescimento radial associada às condições climáticas do próprio ano (Cook e Peters, 1981). A qualidade da cronologia foi avaliada pela sensibilidade média, pela correlação média entre séries (Rbar) e pelo sinal populacional expresso (EPS), sendo considerados satisfatórios valores de EPS superiores a 0,85 (Wigley, Briffa e Jones, 1984).

2.4. Dados climáticos e análises de relação crescimento-clima

Os dados climáticos mensais de precipitação, temperatura máxima e temperatura mínima foram obtidos da base TerraClimate (Abatzoglou et al., 2018), a partir do pixel da grade (~4 km) mais próximo do local de coleta das amostras. A relação entre o crescimento radial e as variáveis climáticas foi avaliada por meio de correlações entre os índices padronizados de crescimento e as séries climáticas mensais, para o ano hidrológico compreendido entre setembro do ano anterior à formação do anel (Set-1) e agosto do ano corrente, no ambiente R (R Core Team, 2024), utilizando o pacote treeclim (Zang e Biondi, 2015), com significância estatística avaliada por bootstrap ($p < 0,05$). Complementarmente, a relação entre o crescimento da candeia e a precipitação foi avaliada por análise de correlação espacial, utilizando dados do CRU TS 4.08 na plataforma KNMI Climate Explorer (Trouet e Van Oldenborgh, 2013).

4.5. Relação entre idade e diâmetro à altura do peito (DAP)

A relação entre a idade e o diâmetro à altura do peito (DAP) dos indivíduos de Eremanthus erythropappus foi avaliada por meio da construção de uma curva idade × DAP. A idade de cada árvore foi determinada pela contagem dos anéis de crescimento após a datação cruzada das séries, enquanto os valores de DAP corresponderam às medições realizadas durante o inventário florestal.

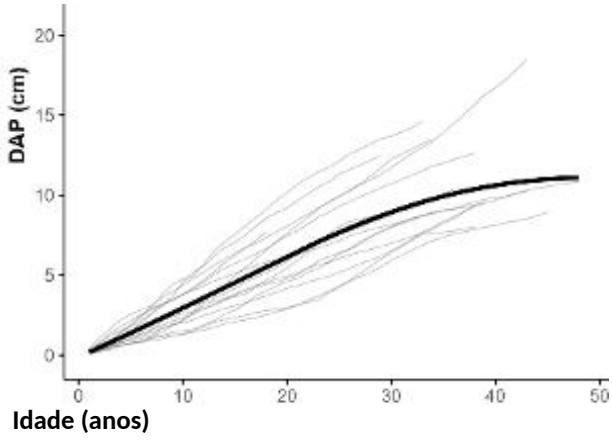
Os dados de idade e DAP foram organizados em planilha eletrônica e posteriormente importados para o ambiente R (R Core Team, 2024), onde foi construída a curva de dispersão entre as variáveis.

3. Resultados e discussão

3.1 Crescimento cumulativo diamétrico

Os indivíduos de candeia apresentaram crescimento cumulativo contínuo ao longo de todo o período avaliado (cerca de 48 anos), com a curva média alcançando aproximadamente 11 cm de DAP e desaceleração perceptível a partir de cerca de 30 anos de idade (Figura 2). Esse padrão de desaceleração é consistente com a trajetória sigmoide de crescimento diamétrico típica de árvores tropicais, na qual o incremento anual tende a se reduzir progressivamente com a idade à medida que a árvore se aproxima de seu potencial de crescimento (Brienen e Zuidema, 2006).

Figura 2 – Crescimento cumulativo em diâmetro (DAP × idade) dos indivíduos de candeia (*Eremanthus erythropappus*) amostrados em Liberdade, MG. Cada linha cinza representa a trajetória de crescimento cumulativo de uma árvore individual; a linha preta representa a curva média suavizada do sítio.

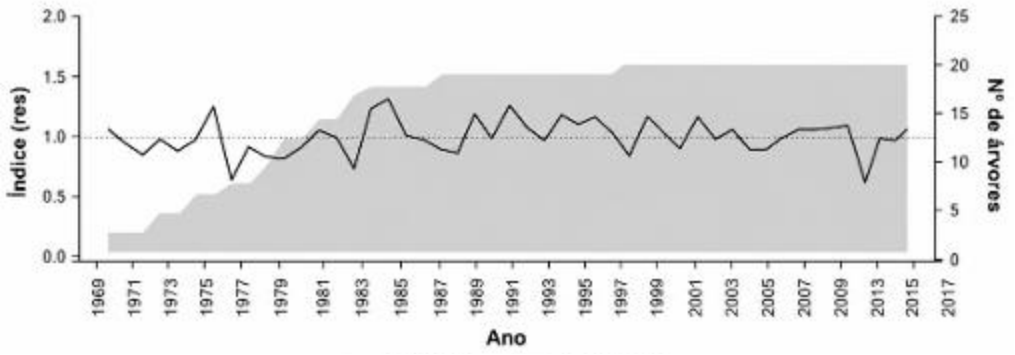


3.2 Cronologia padronizada

Foi construída a cronologia padronizada a partir de 20 árvores (20 séries), cobrindo o período de 1970 a 2017. A intercorrelação entre séries foi de 0,444, indicando sinal comum satisfatório entre as árvores amostradas. O índice de sensibilidade média foi de 0,291, esse valor está dentro do esperado para regiões tropicais, que costumam apresentar sensibilidade menor do que a observada em regiões temperadas (Grissino-Mayer, 2001). Fulgieri (2019) encontrou 0,302 para *Araucaria angustifolia* na Floresta Ombrófila Mista de Santa Catarina, valor muito próximo ao de Liberdade.

O EPS de 0,854 superou o limiar de 0,85 recomendado por Wigley, Briffa e Jones (1984) como indicativo de sinal comum estatisticamente satisfatório, sustentando o uso dessa cronologia para fins de análise dendroclimática, resultado alcançado mesmo com Rbar (0,226) moderado.

Figura 3 – Cronologia padronizada do índice de largura dos anéis de crescimento (res – residual) da candeia (*Eremanthus erythropappus*), no período de 1970 a 2017. A linha preta representa o índice anual da cronologia; a linha pontilhada indica a média de referência (índice = 1,0); a área cinza representa a profundidade amostral (nº de árvores por ano).



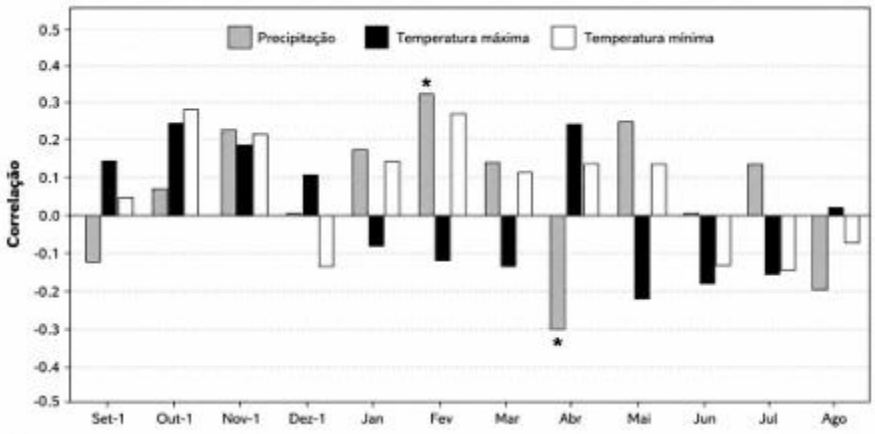
O índice da cronologia oscilou em torno da média de referência (1,0) ao longo de todo o período avaliado, sem tendência sistemática de aumento ou redução do crescimento radial (Figura 3), comportamento esperado em séries corretamente padronizadas, nas quais o efeito da idade sobre o crescimento já foi removido. Mérian, Pierrat e Lebourgeois (2013) reforçam que a robustez do sinal comum de uma cronologia regional depende tanto do esforço amostral quanto da homogeneidade ambiental entre as árvores amostradas.

3.3 Correlação crescimento-clima

A cronologia de Liberdade apresentou dois meses com correlação estatisticamente significativa ($p < 0,05$) entre o índice de crescimento e as variáveis climáticas mensais, para o ano hidrológico de setembro do ano anterior a agosto do ano corrente (Figura 4): fevereiro, com

correlação positiva com a precipitação (r = 0,32), e abril, com correlação negativa com a precipitação (r = -0,30). Nos demais meses, os coeficientes oscilaram entre valores negativos e positivos moderados, sem atingir significância estatística, tanto para precipitação quanto para temperatura máxima e mínima.

Figura 4 – Correlação de Pearson entre a cronologia padronizada de crescimento da candeia (*Eremanthus erythropappus*) em Liberdade e as variáveis climáticas mensais (precipitação, temperatura máxima e temperatura mínima), para o ano hidrológico de setembro do ano anterior a agosto do ano corrente, no período de 1970-2017.

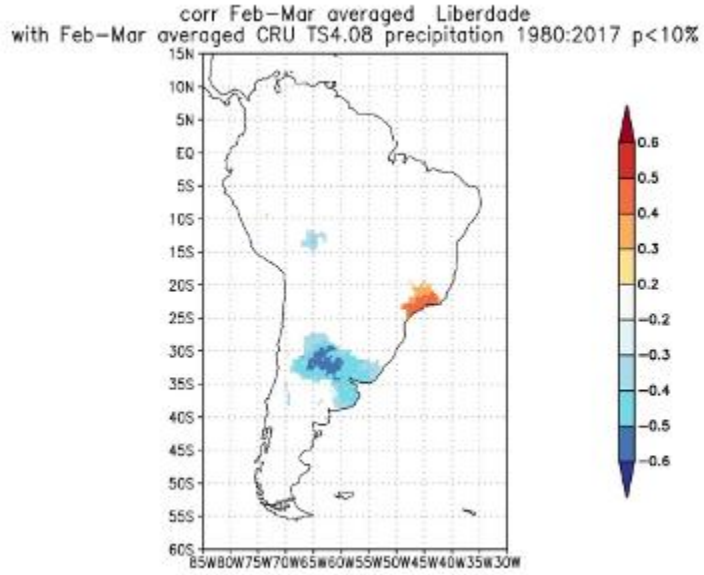


A correlação positiva com a precipitação de fevereiro é consistente com Silva et al. (2021), que também associaram o crescimento de *Araucaria angustifolia* em Campos do Jordão (SP) às chuvas de final de verão, período de maior demanda hídrica para a atividade cambial. Já a correlação negativa em abril pode estar associada à redução de radiação solar em períodos de maior nebulosidade/chuva ou a efeitos de saturação hídrica do solo.

3.4 Correlação espacial entre a cronologia e a precipitação

A relação entre o crescimento da candeia em Liberdade e a precipitação foi também avaliada por análise de correlação espacial (Figura 5). A cronologia de Liberdade apresentou correlação positiva significativa com a precipitação de fevereiro-março, confirmando a influência das chuvas de verão sobre o crescimento radial. O mapa espacial reforça esse resultado, mostrando correlações positivas na faixa de r = 0,3-0,4 na região de 22°S, 45°W, indicando que o sinal climático não é apenas local, mas se estende regionalmente, fortalecendo a robustez da cronologia.

Figura 5 – Correlação espacial entre a cronologia padronizada de crescimento do sítio de Liberdade e a precipitação média de fevereiro-março (CRU TS 4.08, resolução de 0,5°, período 1980-2017), calculada no KNMI Climate Explorer (Trouet e Van Oldenborgh, 2013).



O padrão espacial de dipolo observado, com correlação positiva na faixa de 18-22°S (divisa MG/ES/BA) e correlação negativa mais intensa e extensa ao sul (~27-35°S, cobrindo SP, PR e nordeste da Argentina), é consistente com o fenômeno de "gangorra" de precipitação de verão descrito por Nogués-Paegle e Mo (1997) para a América do Sul subtropical, associado à posição e intensidade da Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS). A coincidência espacial entre a área de correlação positiva do crescimento da candeia e a região habitualmente mais favorecida pela atuação da ZCAS reforça a hipótese de que o crescimento está climatologicamente ligado à atuação desse sistema de grande escala, e não apenas a variações de precipitação estritamente locais.

4. Conclusões

O presente estudo evidencia o potencial dos anéis de crescimento da candeia (Eremanthus erythropappus) para estudos dendrocronológicos, permitindo obter informações inéditas sobre idade, taxas de crescimento e variações nas trajetórias de crescimento entre árvores e entre sítios. A espécie demonstrou sensibilidade climática, possibilitando cronologias estatisticamente confiáveis, o que reforça a candeia como ferramenta promissora para o estudo da dinâmica de crescimento florestal e da relação entre árvores e clima em ambientes de altitude no domínio Mata Atlântica/Cerrado. A precipitação, mais do que a temperatura, mostrou-se a principal variável associada ao crescimento radial da espécie, ampliando o entendimento sobre os fatores que regulam seu crescimento.Como desdobramento, as bases geradas permitem futuras pesquisas sobre a relação entre crescimento, fatores edáficos, estrutura da população e produtividade da candeia. De modo geral, os resultados reforçam o potencial da

dendrocronologia como ferramenta para subsidiar o manejo sustentável da espécie e ampliar o conhecimento sobre sua importância ecológica e econômica no sul de Minas Gerais.

5. Agradecimentos

Os autores agradecem à Universidade Federal de Lavras (UFLA) e ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia da Madeira pela oportunidade de realização deste trabalho, a empresa Vanete Projetos Florestais Sustentáveis, em parceria com a Citroleo, pela disponibilidade das amostras e dos dados fornecidos, e à CAPES e FAPEMIG, pelo financiamento, essencial para a realização desta pesquisa.

6. Referências bibliográficas

Abatzoglou, J. T., Dobrowski, S. Z., Parks, S. A., & Hegewisch, K. C. (2018). TerraClimate, a high-resolution global dataset of monthly climate and climatic water balance from 1958-2015. Scientific Data, 5, Artigo 170191.

Alvares, C. A. (2013). Köppen's climate classification map for Brazil. Meteorologische Zeitschrift, 22(6), 711-728.

Brienen, R. J. W., & Zuidema, P. A. (2006). Lifetime growth patterns and ages of Bolivian rain forest trees obtained by tree ring analysis. Journal of Ecology, 94(2), 481-493.

Carvalho, M. C., Gomide, L. R., Acerbi Júnior, F. W., & Tng, D. (2019). Potential and future geographical distribution of Eremanthus erythropappus (DC.) MacLeish: A tree threatened by climate change. Floresta e Ambiente, 26(3), Artigo e20180455.

Chagas, M. P., Tomazello Filho, M., & Lisi, C. S. (2007). Caracterização macro e microscópica da madeira de candeia (Eremanthus erythropappus, Asteraceae). Revista Brasileira de Biociências, 5(Supl. 1), 156-158.

Cook, E., & Holmes, R. L. (1986). Users manual for ARSTAN. Laboratory of Tree-Ring Research, University of Arizona.

Cook, E., & Peters, K. (1981). The smoothing spline: A new approach to standardizing forest interior tree-ring width series for dendroclimatic studies. Tree-Ring Bulletin, 41, 45-53.

Douglass, A. E. (1941). Datação cruzada em dendrocronologia. Revista Florestal, 39(10), 825-831.

Fulgieri, J. da S. (2019). Dendrocronologia de Araucaria angustifolia (Bert.) O. Kuntze em Curitibanos - SC [Trabalho de conclusão de curso, Universidade Federal de Santa Catarina].

Holmes, R. (1983). Computer-assisted quality control in tree ring dating and measurement. Tree-Ring Bulletin, 43, 69-78.

Mori, C. L. S. O., Mori, F. A., & Mendes, L. M. (2010). Caracterização anatômica, química e física da madeira de candeia (Eremanthus erythropappus (DC.) MacLeish). Cerne, 6(4), 451-456.

Nogués-Paegle, J., & Mo, K. C. (1997). Alternating wet and dry conditions over South America during summer. Monthly Weather Review, 125(2), 279-291.

R Core Team. (2024). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing. https://www.R-project.org/

Scolforo, J. R. S., Oliveira, A. D., & Acerbi-Júnior, F. W. (2008). Inventário florestal de Minas Gerais: Equações de volume, peso de matéria seca e carbono para diferentes fisionomias da flora nativa. Editora UFLA.

Scolforo, J. R. S., Oliveira, A. D., & Davide, A. C. (2012). Manejo sustentável da candeia: O caminhar de uma nova experiência florestal em Minas Gerais. Editora UFLA.

Silva, D. O. da, Prestes, A., Klausner, V., & Souza, T. G. G. de. (2021). Climate influence in dendrochronological series of Araucaria angustifolia from Campos do Jordão, Brazil. Atmosphere, 12(8), Artigo 957.

Teixeira, M. C. B., Nunes, Y. R. F., Maia, K. M. P., & Ribeiro, R. N. (1996). Influência da luz na germinação de sementes de candeia (Vanillosmopsis erythropappa Schult. Bip). Anais do 28º Encontro Regional de Botânica (pp. 35-41). Sociedade Botânica do Brasil; Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais.

Trouet, V., & Van Oldenborgh, G. J. (2013). KNMI Climate Explorer: A web-based research tool for high-resolution paleoclimatology. Tree-Ring Research, 69(1), 3-13.

Wigley, T. M. L., Briffa, K. R., & Jones, P. D. (1984). On the average value of correlated time series, with applications in dendroclimatology and hydrometeorology. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 23(2), 201-213.

Zang, C., & Biondi, F. (2015). treeclim: An R package for the numerical calibration of proxy-climate relationships. Ecography, 38(4), 431-436.

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

985. Dendrocronologia revela ancestralidade centenária de Jequitibás-Rosa (*Cariniana legalis*) na RPPN Macedônia

Ana Carolina Maioli Campos Barbosa[1]; Lucas Guimarães Pereira [1]; Maria Eduarda Santana Ferreira[1]; Kaick Coelho de Sousa[1]; Ingrid Magaly Alberca Marcelo[1]; Paulo Junio Duarte[2]; D'lano Sathler[3]; Jacinto Moreira de Lana[3]

1 Universidade Federal de Lavras (UFLA)

2 Smart Timber

3 Celulose Nipo-Brasileira S.A. (CENIBRA)

Resumo: As florestas tropicais abrigam indivíduos centenários cuja idade permanece pouco compreendida devido à ausência de anéis de crescimento bem definidos em muitas espécies. O jequitibá-rosa (*Cariniana legalis*) apresenta anéis anuais distinguíveis, viabilizando estudos dendrocronológicos. Este trabalho teve como objetivo estimar a idade de indivíduos monumentais de C. legalis identificados por sensoriamento remoto (LiDAR) na RPPN Fazenda Macedônia (CENIBRA, MG) e caracterizar suas trajetórias de crescimento diamétrico. Foram amostradas sete árvores, seis por método não destrutivo (trado motorizado e manual) e uma por meio de discos de um indivíduo caído. Os anéis foram medidos e, quando necessário, complementados por estimativa geométrica no software CooRecorder, com ajuste das curvas de crescimento pelo modelo de Chapman-Richards. Os resultados revelaram idades entre 94 e 264 anos (mediana de 168 anos), com germinação do exemplar mais antigo estimada no século XVIII. A taxa média de crescimento diamétrico foi de 0,84 cm por ano, com variações associadas a diferentes condições de luminosidade e competição. Conclui-se que a população estudada apresenta estrutura etária predominantemente centenária, confirmando o elevado grau de conservação da reserva e fornecendo subsídios científicos para a manutenção da Certificação LIFE, além de reforçar o potencial da espécie para estudos de dendroclimatologia.

Palavras-chave: Anéis de Crescimento; Espécies Longevas; Conservação Florestal.

986.

987.

988.

989.

990.

991.

992. Dendrochronology Reveals Centennial Ancestry of Pink Jequitiba Trees (*Cariniana legalis*) at RPPN Macedônia

993.

Abstract: Tropical forests harbor centennial individuals whose age remains poorly understood due to the absence of well-defined growth rings in many species. The pink jequitiba (*Cariniana legalis*) shows distinguishable annual rings, enabling dendrochronological studies. This work aimed to estimate the age of monumental C. legalis individuals identified through LiDAR remote sensing at RPPN Fazenda Macedônia (CENIBRA, Minas Gerais, Brazil) and to characterize their diameter growth trajectories. Seven trees were sampled, six through non-destructive methods (motorized and manual increment borers) and one through cross-sections from a fallen individual. Rings were measured and, when necessary, complemented by geometric estimation in CooRecorder software, with growth curves fitted using the Chapman-Richards model. Results revealed ages ranging from 94 to 264 years (median of 168 years), with the oldest specimen's germination estimated in the 18th century. The mean diametric growth rate
was 0.84 cm per year, varying with light availability and competition. The studied population shows a predominantly centennial age structure, confirming the reserve's high conservation status and providing scientific support for maintaining LIFE Certification, while reinforcing the species' potential for future dendroclimatological studies.

Keywords: Growth Rings; Long-lived Species; Forest Conservation.

1. Introdução

A conservação de remanescentes de Mata Atlântica exige não apenas a proteção territorial, mas o entendimento profundo da dinâmica biológica de suas espécies-chave. O jequitibá-rosa (*Cariniana legalis*) figura entre as maiores e mais longevas árvores da flora brasileira, atuando como um verdadeiro arquivo vivo das condições ambientais passadas.

Na RPPN Fazenda Macedônia, unidade de conservação mantida pela Celulose Nipo-Brasileira S.A. (CENIBRA), a aplicação de sensoriamento remoto via LiDAR (Light Detection and Ranging) revelou uma estrutura florestal excepcional, evidenciando a ocorrência de indivíduos "gigantes" de jequitibá-rosa — aqui denominados árvores monumentais — com alturas de até 52 metros, destacando-se de forma expressiva acima do dossel médio da floresta.

A dendrocronologia tropical consolidou-se nas últimas décadas como importante ferramenta para investigar a dinâmica de florestas tropicais. Baseada no estudo dos anéis anuais de crescimento, essa ciência permite determinar a idade dos indivíduos, reconstruir suas taxas de crescimento ao longo do tempo e identificar a influência de fatores ambientais. Em espécies com anéis bem definidos, como o jequitibá-rosa, a dendrocronologia amplia o conhecimento sobre a história de vida das árvores, com aplicações em ecologia, conservação, manejo florestal e monitoramento de impactos das mudanças climáticas (Clark & Clark, 1992; Lieberman et al., 1996).

Este trabalho teve como objetivos: (i) estimar a idade mínima de indivíduos selecionados de jequitibá-rosa monumentais; (ii) reconstruir e comparar as trajetórias individuais de crescimento diamétrico dos jequitibás-rosa ao longo da idade; e (iii) avaliar o potencial da espécie para investigações dendrocronológicas com aplicações em reconstrução climática e estudos ecológicos.

2. Material e métodos

O estudo foi realizado na Reserva Particular do Patrimônio Natural (RPPN) Fazenda Macedônia, pertencente à Celulose Nipo-Brasileira S.A. (CENIBRA), localizada na margem direita do rio Doce, nos municípios de Ipaba e Bugre, (leste do estado de Minas Gerais). A Fazenda Macedônia constitui um dos mais importantes remanescentes de Mata Atlântica da região do Vale do Rio Doce, sendo que aproximadamente 50% de sua área é coberta por vegetação nativa, enquanto a porção restante é destinada à produção florestal com espécies do gênero Eucalyptus (Amaral et al., 2009). Parte dessa área, correspondente a 560 ha de floresta nativa, foi reconhecida pelo Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA), por meio da Portaria nº 111, de 14 de outubro de 1994, como Reserva Particular do Patrimônio Natural (RPPN) (Amaral et al., 2009) (Figura 1).

A vegetação local é classificada como Floresta Estacional Semidecidual Submontana (IBGE, 2004; IBGE, 2012), formação característica do domínio da Mata Atlântica, na qual parte significativa das espécies arbóreas perde suas folhas durante a estação seca. Segundo a classificação climática de Köppen, o clima regional é do tipo Aw, caracterizado como tropical com inverno seco e verão chuvoso (Alvares et al., 2013).



Figura 1 - Fazenda Macedônia e localização das árvores de *Cariniana legalis* amostradas. Os números das árvores correspondem à Tabela 1. Fonte: Autoria própria, 2026

A investigação dendrocronológica seguiu padrões internacionais de amostragem e processamento, adaptados às dimensões excepcionais dos indivíduos e às restrições de conservação da RPPN Macedônia. A seleção dos indivíduos foi orientada pelos dados LiDAR da Cenibra, que revelaram outliers correspondentes a indivíduos de grandes dimensões no território da RPPN. A coleta de amostras foi dividida em duas frentes:

1. **Amostragem Não Destrutiva**: Foram selecionadas seis árvores monumentais, com alturas entre 31 e 50 metros (Tabela 1). Para cada indivíduo, foi realizada a extração de uma baqueta longa por meio de trado motorizado (Fig. 2a), com o objetivo de atingir o centro (medula) da árvore. O resultado é uma baqueta de 17 mm de diâmetro, cujo comprimento se estende da casca à região central do tronco (Fig. 2b). De semelhante modo, foram extraídas 3 a 4 amostras radiais (baquetas) menores por meio de trados manuais (tipo Pressler, Fig. 2c). As baquetas extraídas com trado manual tem diâmetro de aproximadamente 5 mm de diâmetro e comprimento de aproximadamente 40 cm. Este procedimento garantiu a representatividade do crescimento sem comprometer a sanidade fitossanitária dos indivíduos amostrados. Para cada árvore amostrada, foi determinado o Diâmetro à Altura do Peito (DAP) utilizando a trena. Após a extração das amostras radiais, procedeu-se ao fechamento das perfurações com cilindro de madeira e cera natural de carnaúba, visando facilitar a cicatrização e evitar a entrada de patógenos (Fig. 2d).



Figura 2 - Retirada de amostras não destrutivas. Equipe em campo (a); retirada de amostras com trado motorizado (b); baqueta extraída de casca ao centro do tronco (c), retirada de amostras com trado manual (d); fechamento da perfuração com peça de madeira cilíndrica e cera de carnaúba (e).

2. **Amostragem Destrutiva:** Em 2025, durante a validação em campo visando à localização das árvores monumentais, a equipe da Cenibra constatou que um indivíduo estava caído. A queda não foi decorrente de desestabilização radicular, mas de uma fratura no tronco a aproximadamente cinco metros de altura (Figura 3a). A partir da análise de imagens de satélite, estima-se que o evento tenha ocorrido entre 2022 e 2023, embora a data exata, mês e ano, não tenha sido determinada. Portanto, visando auxiliar a realização dos estudos dendrocronológicos, realizou-se a coleta de discos ao longo do fuste com o auxílio de uma motosserra (Figuras 3b e 3c). Foi retirado um total de seis discos (seções transversais) em diferentes alturas do tronco (8, 10, 12, 14, 20, 22 metros) , permitindo uma análise da base ao topo. As coletas em alturas mais próximas ao solo (<8 m) e entre 14 e 20 metros foram inviabilizadas devido ao avançado estágio de decomposição do tronco. Os discos foram retirados mantendo-se a espessura padrão de 5 a 6 centímetros. O procedimento de amostragem foi encerrado aos 22 m, antes da primeira bifurcação do fuste.

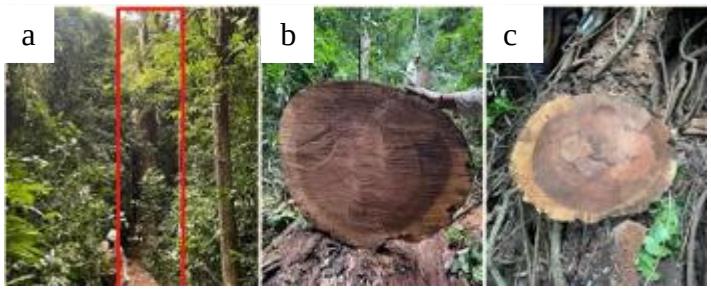


Figura 3 - Imagens da retirada dos discos pela equipe da Cenibra em 12 de maio de 2026. Imagem mostrando o tronco quebrado, com altura de aproximadamente 5 m do solo (a); discos completos retratos a diferentes alturas do fuste caído (b, c).

Tabela 1 – Estimativas de idade das árvores amostradas de *Cariniana legalis* pela contagem dos anéis de crescimento

Árvore Amostrada	Código	Altura (LiDAR) (m)	DAP (cm)	Idade Estimada (anos)	Ano de Germinação (estimado)
Jequitibá 01	FZM01	50 m	151	254	1772
Jequitibá 02	FZM02	32 m	101	168	1877
Jequitibá 03	FZM03	50 m	161	155	1891
Jequitibá 04	FZM04	50 m	90	104	1922
Jequitibá 05	FZM05	40 m	129	200	1826
Jequitibá 06	FZM06	31 m	109	94*	-
Jequitibá 07	FZM07	49	90	264 (1760 - 2023)	~1740

**Idade mínima estimada: a árvore FZM06 apresentava podridão no tronco, o que impediu a extração de amostra completa até a medula, subestimando sua idade real.*

As amostras foram processadas no Laboratório de Dendrocronologia utilizando a metodologia clássica: a) Montagem: as baguetas são coladas e fixadas em suportes de madeira com a orientação correta das fibras, permitindo que a face superior corresponda ao plano transversal da madeira (Fig. 4a e 4b); b) Tratamento da superfície: a parte superior (plano transversal) passa por um processo de lixamento com abrasividade sucessiva (lixas com granulometria de 120 a 600). c) polimento final feito com lixas extra-

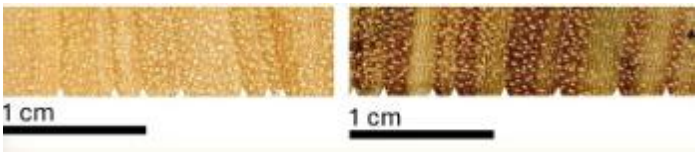
finas é feito manualmente até a visualização das estruturas anatômicas macroscópicas sob a lupa (Fig. 4c).



Figura 4 - Processamento de amostras de madeira de *Cariniana legalis*

A marcação e medição da largura dos anéis foram realizadas para todos os raios e discos. A observação da anatomia macroscópica revela anéis de crescimento demarcados pela alternância de zonas fibrosas e faixas de parênquima (OLIVEIRA, 2015). Na transição do lenho inicial para o tardio, observa-se que faixas de parênquima marginal se aproximam, finalizando o crescimento anual. Uma nova zona fibrosa se destaca visualmente, marcando o início do anel seguinte (Fig. 5).

Figura 5 – Identificação da delimitação dos anéis de crescimento pela observação da anatomia macroscópica da madeira de *Cariniana legalis*



Para entender o ritmo de desenvolvimento e o potencial de crescimento do jequitibá-rosa, foi realizada uma análise dendrocronológica baseada na medição dos anéis de crescimento de seis árvores que apresentaram amostras satisfatórias na Fazenda Macedônia. As árvores que não apresentavam medula foram submetidas a uma análise geométrica de estimação utilizando o programa CooRecorder (LARSSON, 2013), o qual considera a curvatura e a média de largura dos últimos anéis mais próximos à medula para estimar a sua posição e a quantidade de anéis faltantes. Após a estimação, houve a correção das medições observadas dos anéis de crescimento utilizando o DAP medido em campo de cada árvore (BRIENEN & ZUIDEMA, 2005; SCHONGART, 2008). Utilizamos a equação de Chapman-Richards para observar a tendência central de crescimento das árvores.

3. Resultados e discussão

Das sete árvores analisadas, sendo seis vivas e uma morta por queda, seis apresentaram amostras com qualidade suficiente para a contagem dos anéis de crescimento e estimativa da idade. A árvore 06 estava com podridão no tronco, impedindo a retirada de amostras completas (Tabela 1).

A análise revelou que as árvores de jequitibá-rosa na área são centenárias, apresentando uma idade mediana de 168 anos (Tabela 1). A Figura 6 apresenta as cronologias de cada uma das árvores utilizadas no estudo. Note que as árvores FZM07 e FZM01 guardam registros contínuos que remetem ao final do século XVIII (por volta de 1760), enquanto as amostras como a FZM06 e FZM04 são mais novas tendo sua germinação e estabelecimento em meados do século XX. A FZM07 foi a amostra mais antiga identificada, com 264 anos registrados nos anéis; no entanto, estima-se que sua idade real seja de aproximadamente 284 anos, uma vez que o disco analisado foi coletado a uma altura de 8 metros do solo, demandando cerca de duas décadas de crescimento prévio para atingir aquela altura.

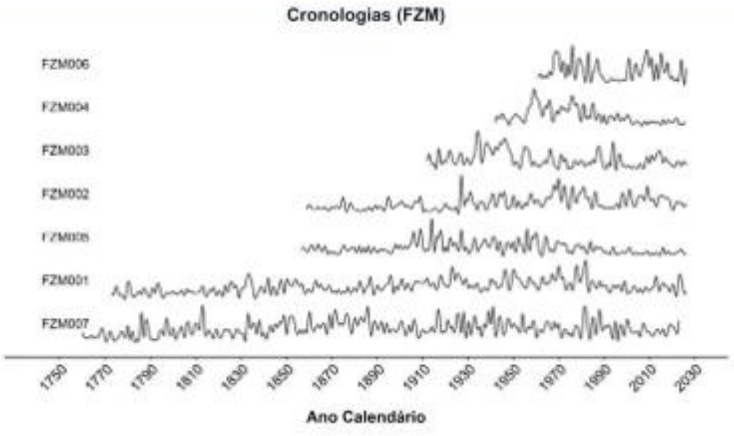


Figura 6 - Cronologias dos individuos amostrados de jequitibá - rosa (*Cariniana legalis*). As séries temporais representam a variação anual da largura dos anéis de crescimento de cada árvore posicionada ao longo da escala do ano-calendário, destacando o período de vida e a sobreposição cronológica das amostras.

A taxa média de crescimento foi de 0,84 cm por ano (Tabela 1). No entanto, a velocidade com que cada indivíduo cresce varia significativamente de acordo com as condições ecológicas locais (Figura 7). As árvores FZM03 e FZM06 apresentaram um crescimento verticalizado e rápido, atingindo grandes diâmetros em cerca de 100 a 140 anos, indicando seu estabelecimento em clareiras com abundância de luz solar. Por outro lado, a árvore FZM007 exibe uma linha muito mais suave e alongada, necessitando de mais de 260 anos para atingir seu diâmetro atual. Esse comportamento é típico de árvores que cresceram sob a sombra de outras árvores maiores.

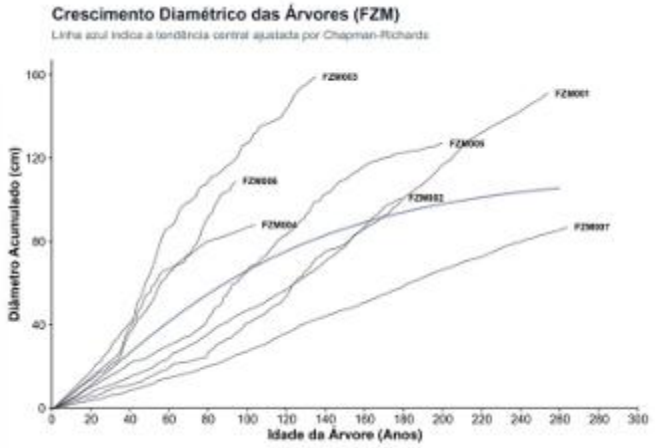


Figura 7 - Curvas de crescimento de diâmetro acumulado de indivíduos de jequitibá-rosa (*Cariniana legalis*) com base em dados de anéis de crescimento. As linhas cinzas representam as trajetórias de crescimento individuais de cada árvore; a linha azul indica a tendência central ajustada pelo modelo de Chapman-Richards.

Em média, as árvores levaram 57 anos para atingir o dossel com um diâmetro igual ou superior a 30 cm, o que demonstra um processo natural e gradual de regeneração e competição por luz ao longo das décadas. O diâmetro mediano das árvores adultas foi de 118 cm, reforçando o porte monumental das espécies preservadas na área.

Para ilustrar a escala de tempo centenária das árvores, destaca-se o indivíduo FZM001, com germinação estimada em 1773: sua vida antecede a Independência do Brasil (1822), a Proclamação da República (1889), a fundação da CENIBRA (1973), a criação da RPPN

Fazenda Macedônia (1994) e a conquista da Certificação LIFE (2024), permanecendo protegido e conservado na área até o presente.

4. Conclusões

A investigação dendrocronológica dos jequitibás-rosa da RPPN Fazenda Macedônia trouxe uma contribuição relevante para a compreensão da história ecológica da reserva. O estudo comprovou que as árvores monumentais detectadas pelo LiDAR não são apenas indivíduos de grande porte, mas sim organismos centenários, com espécimes que se estabeleceram na área ainda na segunda metade do século XVIII. A análise das trajetórias de crescimento revelou como a floresta se comportou ao longo dos séculos, com os anéis de crescimento registrando uma dinâmica natural de sucessão e competição por luz, evidenciada tanto por indivíduos de crescimento rápido quanto por outros de crescimento mais lento. A estrutura etária predominantemente centenária identificada reforça o valor da população estudada como registro vivo das condições ambientais passadas e como referência para estudos futuros de dendroclimatologia. Do ponto de vista da conservação, a presença de indivíduos tão antigos e bem preservados constitui um indicador da integridade ecológica de longo prazo da reserva, reforçando a relevância de estratégias de manejo que priorizem a manutenção desses remanescentes florestais.

5. Agradecimentos

Agradecemos à FAPEMIG, à CAPES, ao CNPq, por meio do Projeto de Produtividade nº 313045/2026-7, à CENIBRA pelo apoio à realização desta pesquisa, e aos colaboradores em geral.

6. Referências bibliográficas

Alvares, C. A., Stape, J. L., Sentelhas, P. C., Gonçalves, J. L. M., & Sparovek, G. (2013). Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift*, *22*(6), 711–728. https://doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507

Amaral, M. C., Silva, E., Souza, A. L., & Meira Neto, J. A. A. (2009). Dinâmica da cobertura vegetal (1980–2004) em um projeto de produção florestal, nos municípios de Bugre e

Ipaba, MG. *Revista Árvore*, *33*(2), 315–325. https://doi.org/10.1590/S0100-67622009000200013

Brienen, R. J. W., & Zuidema, P. A. (2005). Relating tree growth to rainfall in Bolivian rain forest trees: A test for four species. *Oecologia*, *146*(1), 1–12. https://doi.org/10.1007/s00442-005-0160-y

Clark, D. B., & Clark, D. A. (1992). Life history diversity of canopy and emergent trees in a neotropical rain forest. *Ecological Monographs*, *62*(3), 315–344. https://doi.org/10.2307/2937114

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. (2004). *Mapa de vegetação do Brasil*.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. (2012). *Manual técnico da vegetação brasileira* (2.ª ed.).

Larsson, L. (2013). *CooRecorder and CDendro programs of the CooRecorder/CDendro package* (Versión 7.6) [Software de computación]. Cybis Elektronik & Dendrochronology AB. http://www.cybis.se/forfun/dendro

Lieberman, M., Lieberman, D., Peralta, R., & Hartshorn, G. S. (1996). Tropical forest structure and composition on a large-scale altitudinal gradient in Costa Rica. *Journal of Ecology*, *84*(2), 137–152. https://doi.org/10.2307/2261352

Oliveira, I. R. (2015). *Avaliação do crescimento e da qualidade do lenho de árvores de Cariniana legalis (Martius) O. Kuntze submetidas a diferentes espaçamentos* [Tesis de maestría, Universidade de São Paulo]. Repositorio Institucional da USP.

Rufino, M. P. M. X. (2021). *Relação entre a vegetação e fatores ambientais na RPPN Fazenda Macedônia, Minas Gerais* [Tesis de maestría, Universidade Federal de Viçosa].

Schöngart, J. (2008). Growth-oriented logging (GOL): A new concept for sustainable forest management in Amazonian floodplain forests. *Forest Ecology and Management*, *256*(5), 1092–1101. https://doi.org/10.1016/j.foreco.2008.06.015

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Densidade básica da madeira de *Eucalyptus urophylla x Eucalyptus grandis* sob irrigação no semiárido brasileiro

João Vitor Pires de Lucena[1]; Daniela Minini[1]; Tauana de Souza Mangini[2]; Renato Nogueira Antas[1], Pedro Nicó de Medeiros Neto[1]

[1] Universidade Federal de Campina Grande – Patos, Paraíba
[2]Universidade Federal do Paraná – Curitiba, Paraná

Resumo: A irrigação favorece o estabelecimento e o crescimento de povoamentos de *Eucalyptus* em regiões com restrição hídrica, porém seus efeitos sobre a qualidade da madeira ainda não são completamente compreendidos. Dessa forma, o objetivo foi avaliar a densidade básica e sua variação longitudinal em clones de *Eucalyptus urophylla* × *Eucalyptus grandis* submetidas à irrigação durante os primeiros 12 ou 36 meses após o plantio, em Acaraú, Ceará (11 anos). Foram amostradas seis árvores, três por tratamento, das quais foram coletados discos na base e a 20, 40, 60 e 80% da altura comercial. A densidade básica foi determinada pelo método da balança hidrostática. As médias foram de 0,581 e 0,586 g/cm³ para os tratamentos irrigados por 12 e 36 meses, respectivamente, sem diferença significativa. O período de irrigação também não influenciou significativamente a densidade em nenhuma posição longitudinal. Entretanto, foram observadas tendências distintas de variação ao longo do fuste. No tratamento de 12 meses, a densidade variou de 0,518 a 0,645 g/cm³, com tendência de aumento nas posições superiores, enquanto, no tratamento de 36 meses, variou de 0,538 a 0,633 g/cm³, atingindo o maior valor a 40% da altura comercial e diminuindo em direção ao topo. A maior diferença numérica entre os tratamentos ocorreu a 40% da altura comercial (0,081 g/cm³). Os resultados indicaram que o prolongamento da irrigação de 12 para 36 meses não altera a densidade básica nem sua distribuição longitudinal, sugerindo que o período adicional de irrigação não compromete essa propriedade tecnológica da madeira.

Palavras-chave: Qualidade da madeira; Manejo hídrico; Silvicultura.

Basic wood density of *Eucalyptus urophylla* × *Eucalyptus grandis* grown under irrigation in the Brazilian semiarid region

Abstract: Irrigation promotes the establishment and growth of *Eucalyptus* plantations in water-limited regions; however, its effects on wood quality remain poorly understood. Therefore, this study aimed to evaluate the basic wood density and its longitudinal variation in *Eucalyptus urophylla* × *Eucalyptus grandis* clones subjected to irrigation during the first 12 or 36 months after planting in Acaraú, Ceará State, Brazil. Six 11-year-old trees were sampled, three from each irrigation regime. Discs were collected from the stem base and at 20, 40, 60, and 80% of the commercial height. Basic wood density was determined using the hydrostatic balance method. Mean basic density was 0.581 and 0.586 g cm^{-3} for the 12- and 36-month irrigation treatments, respectively, with no significant differences between treatments. Likewise, the irrigation period did not significantly affect wood density at any longitudinal position. However, distinct longitudinal trends were observed along the stem. In the 12-month treatment, basic density ranged from 0.518 to 0.645 g cm^{-3}, showing an increasing trend toward the upper stem. In contrast, the 36-month treatment ranged from 0.538 to 0.633 g cm^{-3}, reaching its

highest value at 40% of the commercial height before decreasing toward the stem top. The greatest numerical difference between treatments occurred at 40% of the commercial height (0.081 g cm^{-3}). These results indicate that extending the irrigation period from 12 to 36 months does not affect basic wood density or its longitudinal distribution, suggesting that prolonged irrigation does not compromise this important technological property of wood.

Keywords: Wood quality; Irrigation management; Silviculture.

1. Introdução

O gênero *Eucalyptus* representa a principal base da silvicultura brasileira, ocupando aproximadamente 8,99 milhões de hectares, o que corresponde a cerca de 76% da área nacional de florestas plantadas (Ibá, 2025). Seu rápido crescimento, elevada produtividade e ampla versatilidade de uso tornam essas espécies a principal fonte de matéria-prima para os setores de celulose e papel, painéis reconstituídos, carvão vegetal, serraria, construção civil e produtos sólidos de maior valor agregado. A elevada demanda por madeira, associada à capacidade de adaptação do gênero a diferentes condições ambientais, tem favorecido a expansão dos plantios para regiões com distintas condições edafoclimáticas, incluindo áreas do Nordeste brasileiro caracterizadas por elevadas temperaturas e restrição hídrica (Rocha et al., 2020; Loiola et al., 2025).

Nessas regiões, a disponibilidade de água constitui um dos principais fatores limitantes ao estabelecimento e ao crescimento dos povoamentos, tornando a irrigação uma prática importante para reduzir os efeitos do déficit hídrico e favorecer o desenvolvimento inicial das árvores. Entretanto, trata-se de uma técnica que eleva os custos de implantação, tornando necessário compreender se períodos mais prolongados de irrigação proporcionam benefícios que justifiquem esse investimento. Embora seja amplamente reconhecido que a disponibilidade hídrica influencia a produtividade dos povoamentos de *Eucalyptus*, seus efeitos sobre a qualidade tecnológica da madeira ainda permanecem pouco compreendidos (Christina et al., 2023; Hakamada et al., 2023; Almeida et al., 2022).

Além de promover maior crescimento, a disponibilidade hídrica pode influenciar diretamente a atividade cambial e o processo de formação do lenho. Alterações na taxa de divisão e expansão celular modificam características anatômicas, como diâmetro e frequência de vasos, espessura da parede das fibras e proporção dos diferentes tecidos, refletindo na composição e nas propriedades tecnológicas da madeira (Rocha et al., 2020; Almeida et al., 2022). Estudos conduzidos com clones de *Eucalyptus* demonstraram que diferentes condições ambientais e de disponibilidade hídrica promovem alterações na anatomia e na composição

química da madeira, o que evidencia que práticas silviculturais capazes de modificar o crescimento das árvores também podem influenciar a formação do lenho e, consequentemente, a densidade básica da madeira (Rocha et al., 2020; Joaquim-Meque et al., 2025).

Entre as propriedades tecnológicas da madeira, a densidade básica destaca-se por sua relação com características físicas, mecânicas, anatômicas e energéticas, sendo reconhecida como um dos principais indicadores da qualidade da matéria-prima florestal (Araujo et al., 2025). Além disso, devido à sua elevada associação com o desempenho industrial e ao seu importante controle genético, a densidade básica é frequentemente empregada em programas de melhoramento florestal como critério para seleção de materiais destinados a diferentes usos tecnológicos (Hung et al., 2014; Fadwati et al., 2023). Sua variação está relacionada à idade, ao material genético, à posição longitudinal no fuste, às condições ambientais e às práticas silviculturais adotadas durante o desenvolvimento dos povoamentos (Almeida et al., 2022; Minini et al., 2022). Além do valor médio, a distribuição longitudinal da densidade ao longo do fuste possui importância tecnológica, uma vez que influencia a uniformidade da matéria-prima e o desempenho dos processos industriais.

Apesar da importância da irrigação para o estabelecimento de plantios em regiões com restrição hídrica, ainda são escassos os estudos que avaliam seus efeitos sobre a variação longitudinal da densidade básica da madeira em árvores de *Eucalyptus*. O entendimento dessa relação pode subsidiar estratégias de manejo que conciliam o uso consciente da água com a produção de madeira de elevada qualidade tecnológica. Diante desse contexto, o presente estudo teve como objetivo avaliar a densidade básica e a variação longitudinal da densidade da madeira de *Eucalyptus urophylla* × *Eucalyptus grandis* submetido a dois períodos de irrigação em povoamentos localizados no estado do Ceará.

2. Material e métodos

A espécie florestal utilizada na presente pesquisa foi um clone *E. urophylla* × *E. grandis* (clone VE41), proveniente de um experimento conduzido pela Embrapa Agroindústria Tropical, no município de Acaraú, Ceará, Brasil. O clima da região é do tipo Aw’ de acordo com a classificação de Köppen, com distinta alternância de estação chuvosa (janeiro a maio) e estação seca (junho a dezembro); precipitação média anual de aproximadamente 900 mm; temperatura média anual estimada em 28,1ºC; insolação de 2.650 h/ano; velocidade média dos ventos de 3,0 m/s; relevo razoavelmente suave, e os solos, em geral, profundos, bem drenados,

de textura média a leve e bastante permeáveis (Departamento Nacional de Obras Contra as Secas, DNOCS, 2012).

O estudo avaliou dois regimes de irrigação: irrigação durante os primeiros 12 meses após o plantio (I12) e irrigação durante os primeiros 36 meses (I36). Nos primeiros 12 meses após o plantio, toda a área experimental foi irrigada por microaspersão, com turno de rega diário e lâmina de irrigação de 2,7 mm/dia. Após esse período, a irrigação foi interrompida no tratamento I12, enquanto no tratamento I36 foi mantida até os 36 meses, com turno de rega de dois dias e lâmina de 5,0 mm/dia.

Aos 11 anos de idade, foram selecionadas aleatoriamente seis árvores, sendo três por regime de irrigação, representativas do diâmetro médio do povoamento (DAP de 35,86 cm e altura total de 33,27 m). De cada árvore foram retirados discos de 5 cm de espessura na base e nas posições correspondentes a 20, 40, 60 e 80% da altura comercial do fuste. A partir de cada disco, foram confeccionadas duas amostras radiais, uma próxima à medula e outra localizada a 3/4 do raio, utilizadas para a determinação da densidade básica da madeira pelo método da balança hidrostática, conforme Vital (1984) e a ABNT NBR 11941 (2003).

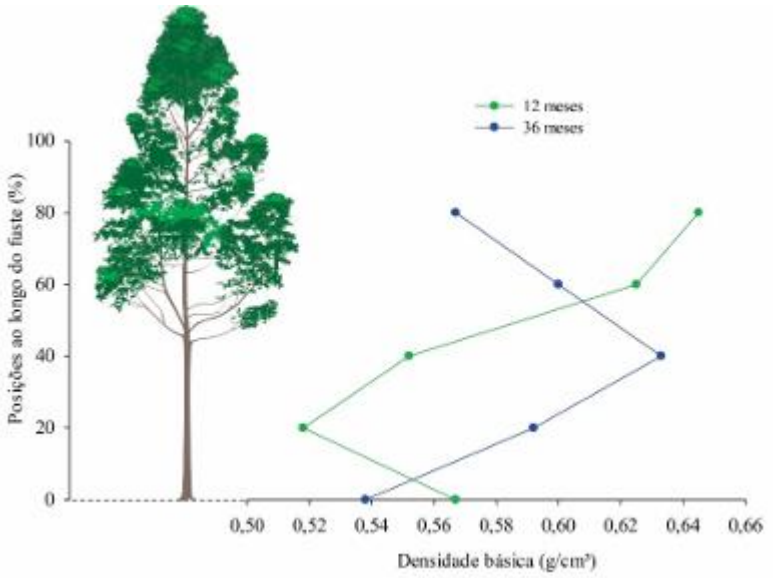
O experimento foi conduzido em delineamento inteiramente casualizado, considerando dois regimes de irrigação e cinco posições longitudinais no fuste. Na análise dos resultados foi empregado o teste T de Student ($p \leq 0,05$). Os resultados foram submetidos à análise estatística pelo programa Assistat 7.0.

3. Resultados e discussão

Considerando a densidade básica média do tronco, os dois regimes de irrigação apresentaram valores próximos, sendo de 0,580 g/cm³ para o tratamento irrigado durante 12 meses e de 0,586 g/cm³ para o tratamento irrigado durante 36 meses (Tabela 1), os quais não apresentaram diferença estatística entre si. A diferença absoluta entre os tratamentos foi de 0,005 g/cm³, o que pode indicar comportamento semelhante para essa propriedade, independentemente do período de irrigação adotado. Pádua et al. (2015) ao estudar o clone de *E. grandis* x *urophylla* aos 7 anos de idade, encontrou densidade básica média de 0,548 g/cm³. Trugilho et al. (2015) para o mesmo clone, aos quatro anos de idade encontrou densidade de 0,491 g/cm³.

Tabela 1 - Variação longitudinal da densidade básica da madeira de *Eucalyptus urophylla* × *Eucalyptus grandis* ao longo do fuste em árvores submetidas à irrigação durante 12 e 36 meses.

Posições (%)	Densidade Básica (g/cm³)			Representação gráfica da densidade básica ao longo do tronco
	12 meses	36 meses	Diferença 12 e 36 m	
0	0,567	0,538	0,029	
20	0,518	0,592	0,074	
40	0,552	0,633	0,081	
60	0,625	0,600	0,025	
80	0,645	0,567	0,078	
Média	**0,581a**	**0,586a**	**0,005**	
DP	0,016	0,032		
CV	2,79	5,4		



DP: desvio padrão; CV: coeficiente de variação.

Não houve efeito significativo do período de irrigação em nenhuma posição amostrada ($p > 0,05$).

De acordo com a classificação proposta por Romero et al. (2024), ambas as médias dos tratamentos de 12 e 36 enquadram-se na classe de madeiras de média densidade (0,41–0,60 g/cm³), característica associada a melhores propriedades mecânicas, maior rendimento energético e maior potencial de utilização em produtos sólidos de maior valor agregado.

Embora não tenham sido observadas diferenças estatísticas entre os períodos de irrigação, o comportamento longitudinal da densidade apresentou tendências numéricas distintas. Essas diferenças podem estar relacionadas à influência da disponibilidade hídrica sobre a atividade cambial e a formação do xilema, uma vez que o regime hídrico pode modificar a expansão celular, a espessura da parede das fibras e, consequentemente, a densidade da madeira (Downes et al., 2006; Drew et al., 2009; Moulin et al., 2017). No tratamento irrigado por 12 meses, a redução da densidade da base até 40% da altura comercial pode refletir a formação da madeira em uma fase de crescimento longitudinal e cambial, na qual a maior disponibilidade de água favoreceu a expansão celular e a formação de elementos anatômicos com maior lúmen e menor proporção relativa de parede celular.

Em contrapartida, a manutenção da irrigação por 36 meses pode ter proporcionado maior estabilidade na atividade cambial ao longo do desenvolvimento das árvores, favorecendo uma distribuição mais uniforme da densidade nas porções inferiores e intermediárias do fuste. A redução observada em direção ao topo nesse tratamento pode estar relacionada à maior

proporção de madeira juvenil nas posições superiores, que normalmente apresenta menor densidade em comparação à madeira formada nas regiões basais do tronco (Cacau et al., 2023; Araujo et al., 2025). Entretanto, como as diferenças entre os tratamentos não foram significativas, essas interpretações devem ser consideradas apenas como possíveis explicações para o comportamento numérico observado, sendo necessários estudos que integrem avaliações anatômicas e da atividade cambial para elucidar os mecanismos envolvidos.

A influência da disponibilidade hídrica sobre a densidade básica da madeira permanece controversa na literatura. Moulin et al. (2017) verificaram densidade básica semelhante entre árvores irrigadas e não irrigadas de *Eucalyptus grandis* × *Eucalyptus urophylla*, enquanto Drew et al. (2009) também não observaram diferenças na densidade de *Eucalyptus globulus* cultivado sob irrigação e sequeiro. Em contrapartida, Downes et al. (2006) relataram menores valores de densidade em árvores irrigadas, e Pereira e Araújo (1990) observaram respostas distintas em função da idade das plantas. Esses resultados mostram que a resposta da densidade básica à disponibilidade hídrica depende da interação entre fatores como material genético, idade, intensidade e duração da irrigação.

A variação longitudinal observada neste estudo é similar com o comportamento descrito para clones de *Eucalyptus grandis* × *Eucalyptus urophylla*, embora a literatura demonstre que não existe um padrão único de distribuição da densidade básica ao longo do fuste. Alzate et al. (2005) observaram um aumento progressivo da densidade da base para o topo do fuste, avaliando cinco posições longitudinais (0%, 25%, 50%, 75% e 100%), onde a densidade básica média da base foi de 0,470 g/cm³ e o topo de 0,520 g/cm³ e média geral do tronco igual a 0,507 g/cm³. Em contrapartida, Cacau et al. (2023) verificaram uma redução contínua da densidade básica ao longo do fuste em árvores com oito anos de idade, amostradas nas posições 0%, DAP, 25%, 50%, 75% e 100% da altura comercial. Os descreveram diferenças significativas nas posições de 75% e 100% da altura comercial, com redução aproximada de 0,13 g/cm³ entre a base e o topo da árvore. Um terceiro padrão foi descrito por Araújo et al. (2025), que avaliaram dois clones de *E. grandis* × *E. urophylla* e encontraram médias de densidade básica de 0,502 e 0,474 g/cm³.

Os autores observaram redução da densidade da base até 12,5% da altura comercial, seguida por aumento até 75% e posterior redução em direção ao topo do fuste. A menor densidade foi registrada na posição de 12,5% (0,449 g/cm³), enquanto o maior valor ocorreu a 75% da altura comercial (0,496 g/cm³). Embora a densidade tenha diminuído na posição correspondente ao topo, os valores permaneceram superiores aos observados na base da árvore.

A distribuição dessa propriedade ao longo do fuste pode apresentar comportamento crescente, decrescente ou intermediário, sendo influenciada por fatores como material genético, idade das árvores, condições edafoclimáticas e práticas silviculturais adotadas durante o desenvolvimento do povoamento.

Nesse contexto, os resultados obtidos sugerem que diferentes períodos de irrigação podem estar associados a variações na distribuição longitudinal da densidade básica, sem grandes diferenças na densidade média do tronco. A maior variação observada na posição correspondente a 40% da altura comercial indica que essa região do fuste merece atenção em estudos futuros voltados à compreensão da formação do lenho sob diferentes condições hídricas.

4. Conclusões

A densidade básica média da madeira de *Eucalyptus urophylla* × *Eucalyptus grandis* não apresentou diferença significativa entre os regimes de irrigação de 12 e 36 meses. Embora tenham sido observadas diferenças numéricas no comportamento longitudinal da densidade, essas variações não foram estatisticamente significativas. Assim, o prolongamento da irrigação não influenciou a densidade básica da madeira nas condições avaliadas, contribuindo para a compreensão dessa propriedade em plantios de eucalipto no semiárido.

Agradecimentos

A Agência de Desenvolvimento do Estado do Ceará (ADECE), ao Banco do Nordeste do Brasil (BNB) e à Embrapa Agroindústria Tropical pela disponibilidade da madeira**.**

5. Referências bibliográficas

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCINAS - ABNT. Normas Técnicas. NBR 11941: densidade básica da madeira. Rio de Janeiro, 2003 6p.

Almeida, M. N. F., Vidaurre, G. B., Louzada, J. L. P. C., Pezzopane, J. E. M., Oliveira, J. C. L., Câmara, A. P., et al. (2022). Differences in wood anatomy and chemistry of a *Eucalyptus urophylla* clone explained by site climate conditions. Canadian Journal of Forest Research, 52(5), 834–844. https://doi.org/10.1139/cjfr-2021-0261

Araujo, S. L., Protázio, L. B., Gimenez, G. G., Barros Junior, U. O., Castor Neto, T. C., Silva, D. F. S. H. S., Rezende, D. A. N., Almeida, M. N. F., Silva, J. G. M., & Vidaurre, G. B. (2025). Sampling strategies along the tree stem to determine the basic density of *Eucalyptus* wood. Cerne, 31, e103500. https://doi.org/10.1590/01047760202531013500

Alzate, S.B.A.; Tomazello Filho, M.; Piedade, S. M. S. Variação longitudinal da densidade básica da madeira de clones de Eucalyptus grandis Hill ex Maiden, E. saligna Sm. e E. grandis x urophylla. *Scientia Forestalis*, Piracicaba, n.68, p.87-95, 2005.

Cacau, F. V. P., Duarte, M. S., Urbano, E., Falcão, K. S., & Silva, R. F. (2023). Variação longitudinal da densidade básica da madeira de clones de eucalipto. Brazilian Journal of Biological Sciences, 10(23), 1–14.

Christina, M., Hakamada, R. E., Binkley, D., & Mattos, E. M. (2023). Light use efficiency declines with water deficit and age in *Eucalyptus* plantations across Brazil. Forest Ecology and Management, 549, 121477. 10.1016/j.foreco.2023.121477

Downes, G., Worledge, D., Schimleck, L., Harwood, C., French, J., & Beadle, C. (2006). The effect of growth rate and irrigation on the basic density and kraft pulp yield of *Eucalyptus globulus* and *Eucalyptus nitens*. New Zealand Journal of Forestry, 51(3), 13–22.
DEPARTAMENTO NACIONAL DE OBRAS CONTRA AS SECAS – DNOCS. Perímetro irrigado Baixo-Acaraú. Fortaleza. 2012. Disponível em: http://www.dnocs.gov.br/~dnocs/doc/canais/perimetros_irrigados/ce/baixo_acarau.html. Acesso em: 05 maio 2026.

Drew, D. M., Downes, G. M., O'Grady, A. P., Read, J., & Worledge, D. (2009). High resolution temporal variation in wood properties in irrigated and non-irrigated *Eucalyptus globulus*. Annals of Forest Science, 66, 406. https://doi.org/10.1051/forest/2009017

Fadwati, A. D., Hidayati, F., & Na'Iem, M. (2023). Evaluation of genetic parameters of growth characteristics and basic density of *Eucalyptus pellita* clones planted at two different sites in East Kalimantan, Indonesia. Journal of the Korean Wood Science and Technology, 51(3), 222–237. https://doi.org/10.5658/WOOD.2023.51.3.222

Hakamada, R., Binkley, D., Cegatta, I., Alvares, C., Campoe, O., & Stape, J. L. (2023). Stocking response of *Eucalyptus* growth depends on site water deficit across a 2100-km gradient in Brazil. Forest Ecology and Management, 546, 121325. 10.1016/j.foreco.2023.121325

Hung, T. D., Brawner, J. T., Meder, R., Lee, D. J., Southerton, S. G., & Dietzgen, R. G. (2015). Estimates of genetic parameters for growth and wood properties in *Eucalyptus pellita* F. Muell. to support tree breeding in Vietnam. Annals of Forest Science, 72(2), 205–217.

Indústria Brasileira de Árvores. (2025). Relatório anual 2025. https://iba.org/wp-content/uploads/2025/10/IBA_relatorio_digital_POR.pdf

Joaquim-Meque, E., Louzada, J., Mady, F. T. M., Souza, V. C. F., Liberato, M. L., & Fonseca, T. F. (2025). Wood anatomy properties and global climate change constraints of forest species

from the natural forest of Mozambique. Forests, 16(6), 1018. https://doi.org/10.3390/f16061018

Loiola, Â. T., Pinheiro, E. S., Souza, A. R. S., Silva, P. H. M., Holanda, A. C., & Araújo, P. C. D. (2025). Influence of environmental factors on the survival and growth of *Eucalyptus tereticornis* provenances in the Brazilian semi-arid. Forest Ecology and Management, 593, 122925. 10.1016/j.foreco.2025.122925

Minini, D., Silva, J. G. M., Paula, R. R., Rocha, S. M. G., Silveira Filho, T. B., Gaui, T. D., Dias, H. M., Nabais, C., & Vidaurre, G. B. (2022). Insights about wood density in Atlantic Forest ecosystems: Spatial variability and alternative measurement. Canadian Journal of Forest Research, 52(8), 1212–1223. https://doi.org/10.1139/cjfr-2022-0061

Moulin, J. C., Arantes, M. D. C., Oliveira, J. G. L., Campinhos, E., Gomes, F., & Vidaurre, G. B. (2017). Efeito do espaçamento, idade e irrigação no volume e densidade básica do eucalipto. Floresta e Ambiente, 24, e00073914. https://doi.org/10.1590/2179-8087.073914

Pádua, F. A., Trugilho, P. F., Thiersch, C. R., Vire, N. M., & Silva, J. M. (2015). Tamanho amostral para a estimativa da densidade básica em um clone híbrido de *Eucalyptus* sp. Revista do Instituto Florestal, 27(1), 41–47. https://doi.org/10.4322/rif.2015.004

Pereira, H., & Araújo, C. (1990). Raw material quality of fast-grown Eucalyptus globulus during the first year. IAWA Bulletin, 11(4), 421–427.

Rocha, S. M. G., Vidaurre, G. B., Pezzopane, J. E. M., Almeida, M. N. F., Carneiro, R. L., Campoe, O. C., Scolforo, H. F., Alvares, C. A., Neves, J. C. L., Xavier, A. C., & Figura, M. A. (2020). Influence of climatic variations on production, biomass and density of wood in *Eucalyptus* clones of different species. Forest Ecology and Management, 473, 118290. 10.1016/j.foreco.2020.118290

Romero, F. M. B., Novais, T. N. O., Jacovine, L. A. G., Bezerra, E. B., Castro Lopes, R. B., Holanda, J. S., & Fearnside, P. M. (2024). Wood Basic Density in Large Trees: Impacts on Biomass Estimates in the Southwestern Brazilian Amazon. Forests, 15(5), 734. https://doi.org/10.3390/f15050734

Trugilho, P. F., Goulart, S. L., & Assis, A. O. (2015). Características de crescimento, composição química, física e estimativa de massa seca de madeira em clones e espécies de *Eucalyptus* jovens. Ciência Rural, 45(4), 661–666. https://doi.org/10.1590/0103-8478cr20130625

VITAL, B. R. **Métodos de determinação da densidade da madeira**. Viçosa, MG: SIF, 1984. 21 p. (Boletim Técnico, 1).

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Densidade da madeira de *Tectona grandis* jovem sob dois períodos de irrigação no Ceará, BR

Luan da Silva Lira[1], Pedro Nicó de Medeiros Neto*[1], Daniela Minini[1], Tauana de Souza Mangini[2], Karla Danieli de Souza Vieira Messias[1], Flávio Cipriano de Assis do Carmo[1], Rafael Rodolfo de Melo[3]

[1]Universidade Federal de Campina Grande, Patos, Departamento de Engenharia Florestal, Avenida Universitária, s/n – Santa Cecília, Patos, Paraíba, Brasil.
[2]Universidade Federal do Paraná, Departamento de Tecnologia Florestal, Av. Prefeito Lothário Meissner, 632 – Jardim Botânico, Curitiba, Paraná, Brasil.
[3] , Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Mossoró, Centro de Ciências Agrárias/ Departamento de Ciências Agronômicas e Florestais, Av. Francisco Mota, 572 - Costa e Silva, CEP, Mossoró – Rio Grande do Norte, Brasil

Resumo: A irrigação durante os estágios iniciais de implantação de povoamentos florestais tem possibilitado o desenvolvimento de árvores de *Tectona grandis* em regiões do Nordeste brasileiro, caracterizadas por limitações hídricas e altas temperaturas. O estudo da madeira proveniente dessas condições é importante para caracterizar sua qualidade sob essas condições. Nesse contexto, o presente estudo teve como objetivo avaliar a densidade da madeira ao longo do fuste de *Tectona grandis* submetida a dois períodos de irrigação. Foram amostradas oito árvores com 11 anos de idade, sendo quatro provenientes de área irrigada por 12 meses e quatro de área irrigada por 36 meses. Discos foram coletados nas posições de 0, 20, 40, 60 e 80% da altura comercial do tronco. As médias gerais da densidade básica da madeira foram de 0,500 g cm^{-3} para 12 meses e 0,499 g cm^{-3} para árvores irrigadas por 36 meses, não sendo observadas diferenças entre os tratamentos. O comportamento longitudinal da densidade foi diferente entre os dois tratamentos. As árvores irrigadas até os 12 meses possuem maior homogeneidade, ao passo que as de 36 meses possuem densidade menor nas posições de 20 a 40% da altura comercial. Portanto, a manutenção da irrigação em até 36 meses não promoveu diferenças na densidade básica da madeira de teca, indicando que, sob o ponto de vista da densidade básica da madeira, a irrigação por apenas 12 meses pode ser suficiente para produzir madeira com características semelhantes e maior homogeneidade de densidade. Entretanto, essa inferência restringe-se a propriedade avaliada, não contemplando aspectos de crescimento, produtividade ou desempenho do povoamento avaliado.

Palavras-chave: Qualidade da madeira; Manejo hídrico; Lenho juvenil.

Wood density of young *Tectona grandis* under two irrigation periods in Ceará

Abstract: The use of irrigation during the initial stages of forest plantation establishment has enabled the successful growth of *Tectona grandis* trees in northeastern Brazil, a region characterized by water limitations and high temperatures. Investigating wood produced under these conditions is important for characterizing its quality and technological potential. In this context, the present study aimed to evaluate the wood density of *Tectona grandis*, a property that is easily measured and highly correlated with several technological attributes, under two irrigation regimes. Eight 11-year-old trees were sampled, with four trees originating from an

area irrigated for 12 months and four from an area irrigated for 36 months. Wood discs were collected at 0, 20, 40, 60, and 80% of the commercial stem height. The overall mean basic density values were 0.500 g cm^{-3} for trees irrigated for 12 months and 0.499 g cm^{-3} for those irrigated for 36 months, with no significant differences observed between treatments. However, the longitudinal variation pattern differed between irrigation regimes. Trees irrigated for 12 months exhibited greater density uniformity along the stem, whereas those irrigated for 36 months showed lower density values between 20 and 40% of the commercial height. Therefore, maintaining irrigation for up to 36 months did not affect the basic wood density of *Tectona grandis*, indicating that, from the perspective of this wood property, irrigation for only 12 months may be sufficient to produce wood with similar characteristics and greater density uniformity. However, this inference is limited to the property evaluated and does not encompass tree growth, stand productivity, or the overall performance of the evaluated plantation.

Keywords: Wood quality; Irrigation; Juvenile wood.

1. Introdução

Tectona grandis L.f., popularmente conhecida como teca, é uma espécie florestal nativa do Paquistão, Índia, Myanmar, Laos e Tailândia, de elevada importância comercial, com plantios distribuídos em cerca de 70 países da Ásia tropical, África, América Latina e Oceania, o que evidencia sua ampla capacidade de adaptação a diferentes condições ambientais (Kollert e Kleine, 2017; Reis et al., 2023). No Brasil, a teca detém a segunda maior área cultivada entre as outras espécies florestais plantadas, excluindo-se Eucalipto e Pinus, com aproximadamente 82,9 mil hectares distribuídos nas regiões Centro-Oeste e Norte, com destaque para os estados de Mato Grosso, Pará, Rondônia e Acre (IBÁ, 2025).

A teca é uma espécie madeireira de alta qualidade no Brasil, o que atrai investimentos do setor privado e consolida-se como atividade relevante para as economias florestais nacionais (Kollert e Kleine, 2017). Portanto, sua expansão para outras áreas, como a região litorânea do Nordeste do Brasil, está sendo uma realidade. Contudo, existem especulações sobre a qualidade da madeira proveniente destes plantios, já que as árvores necessitam de irrigação inicial para o estabelecimento do plantio, devido ao déficit hídrico e às altas temperaturas.

Nesse contexto, a irrigação tem sido frequentemente empregada para garantir o estabelecimento e o desenvolvimento inicial das árvores. Entretanto, trata-se de uma prática que demanda investimentos, tornando necessário compreender se os possíveis ganhos em crescimento e qualidade da madeira justificam os custos associados. Além disso, ainda existem incertezas quanto ao período ideal de irrigação em povoamentos florestais. Não está claramente estabelecido se a irrigação restrita ao primeiro ano, voltada apenas ao arranque inicial das mudas, é suficiente para a teca, ou se períodos mais prolongados de irrigação podem

proporcionar benefícios adicionais ao desenvolvimento das árvores e à qualidade futura da madeira.

A qualidade tecnológica da madeira constitui um dos principais fatores que determinam o potencial de utilização da matéria-prima em diferentes segmentos industriais (Souza et al., 2024). A densidade básica da madeira é um bom preditor, visto que, devido à sua relação com características físicas, mecânicas e energéticas, é amplamente utilizada como indicador da qualidade. Estudos apontam que a densidade da madeira de *Tectona grandis* pode variar em função da idade, das características anatômicas, das condições ambientais e das práticas de manejo adotadas ao longo do desenvolvimento dos povoamentos (Uddin et al., 2025; Chambi-Legoas et al., 2025).

Portanto, o entendimento dessas relações é importante para subsidiar estratégias de manejo que promovam o uso eficiente da água sem comprometer a qualidade da matéria-prima produzida. Diante do exposto, o presente estudo teve como objetivo avaliar a densidade básica da madeira ao longo do fuste de *Tectona grandis* submetida a dois períodos de irrigação em povoamentos localizados no estado do Ceará.

2. Material e métodos

2.1. Área de estudo

As árvores avaliadas de *Tectona grandis* foram provenientes de um experimento conduzido pela Embrapa Agroindústria Tropical, no município de Acaraú, Ceará, no âmbito do projeto “Teste e seleção de espécies arbóreas para a indústria do polo moveleiro de Marco, CE”, desenvolvido com o objetivo de subsidiar estratégias de produção e fornecimento de madeira para a região Nordeste. O clima da região é classificado como Aw’ segundo Köppen, caracterizado por precipitação média anual de aproximadamente 900 mm e temperatura média de 28,1 °C.

O experimento foi implantado em duas parcelas submetidas a diferentes regimes de irrigação: irrigação interrompida aos 12 meses após o plantio e irrigação mantida até 36 meses. Durante o primeiro ano, toda a área recebeu irrigação por microaspersão com turno de rega diário e lâmina de 2,7 mm dia^{-1}. Após esse período, apenas a parcela irrigada por 36 meses permaneceu sob irrigação, com turno de rega de dois dias e lâmina de 5,0 mm dia^{-1}.

2.2 Amostragem da madeira

Foram selecionadas aleatoriamente quatro árvores de *Tectona grandis* com 11 anos de idade para cada condição de irrigação (12 e 36 meses), representativas do diâmetro médio do povoamento (15,96 cm de DAP-Diâmetro à altura do peito- 1,30 m) e em boas condições fitossanitárias. De cada árvore foi retirado um disco com 5,0 cm de espessura, nas posições a 0 (base), 20, 40, 60 e 80% da altura comercial do tronco, considerado um diâmetro mínimo de 6,0 cm (Figura 1).

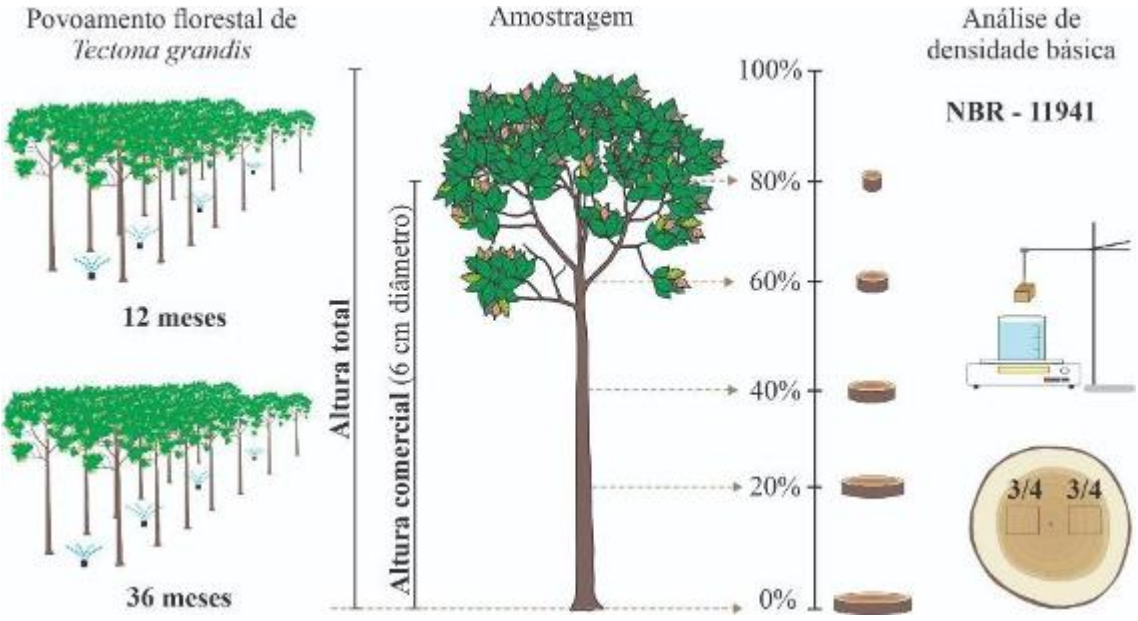


Figura 1 – Amostragem da madeira para avaliação da densidade da madeira.

Posteriormente, as amostras coletadas foram transportadas para o Laboratório de Tecnologia de Produtos Florestais (LTPF) da Unidade Acadêmica de Engenharia Florestal (UAEF), do Centro de Saúde e Tecnologia Rural (CSTR), da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), Campus de Patos, Paraíba, onde foram feitas as análises físicas de densidade da madeira.

2.3 Densidade Básica

Para determinação da densidade básica da madeira, na seção diametral de cada disco, foi marcada e seccionada duas amostras de cinco centímetros de largura, diametralmente opostas, uma próxima à medula e outra equidistante a 3/4 do raio do disco (Figura 1). A densidade foi determinada conforme as especificações da Norma Brasileira Regulamentadora - NBR 11941 da Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT (2022).

2.4 Análise de dados

Na avaliação da densidade da madeira foi utilizado um delineamento experimental inteiramente casualizado (DIC), sendo aplicada uma estatística descritiva com a determinação da média, desvio padrão e coeficiente de variação para as duas condições de irrigação (irrigação até um ano e irrigação até três anos). Na análise dos resultados foi empregado o teste T de Studant ($p \leq 0,05$), entre os dois períodos de irrigação e para a comparação da densidade básica da madeira ao longo do fuste, foi aplicado o teste de Tukey ($p \leq 0,05$), ambos para as variáveis que foram significativas pelo teste de F ($p \leq 0,05$). Foram realizados os testes de normalidade dos dados (teste de Lilliefors) e homogeneização das variâncias (teste de Cochran).

3. Resultados e discussão

Para as árvores de *Tectona grandis* de 11 anos não houve diferença na densidade básica da madeira ao irrigar as árvores até 12 meses ou manter a irrigação até 36 meses (Tabela 1). O valor médio de densidade básica da madeira aos 12 meses de irrigação foi de 0,500 g cm^{-3} e para 36 meses foi de 0,499 g cm^{-3}.

Tabela 1 – Variação da densidade básica da madeira de teca ao longo do fuste em duas condições de irrigação.

Posição longitudinal (%)	**Densidade (g cm^{-3}) Tempo de irrigação (meses)**	
	12	**36**
0	0,522	0,561
20	0,489	0,458
40	0,487	0,456
60	0,494	0,521
80	0,509	0,498
Média Geral	**0,500 a**	**0,499 a**
Desvio Padrão	0,015	0,044
Coeficiente de Variação (%)	2,98	8,88

As médias seguidas pela mesma letra na horizontal não diferem estatisticamente entre si pelo teste de pelo teste t de Student, ao nível de 5% de probabilidade.

Curvo et al. (2024) verificaram densidades médias entre 0,500 e 0,600 g cm^{-3} em árvores de diferentes idades provenientes de plantações brasileiras de rápido crescimento localizadas em Mato Grosso. Da mesma forma, Chambi-Legoas et al. (2025), avaliando madeira proveniente de desbastes de teca no Peru, reportaram densidade básica média próxima de 0,490

g cm^{-3}, e Gil et al. (2018) observaram valor médio de 0,400 g cm^{-3}, valores semelhantes ao encontrado no presente estudo. A proximidade entre os valores observados e aqueles relatados em diferentes regiões de plantio reforça que a madeira produzida sob ambas as condições de irrigação apresenta características semelhantes com os padrões tecnológicos normalmente atribuídos à espécie.

Os valores de densidade e seu comportamento ao longo do tronco encontram-se na Figura 2. A variação longitudinal da densidade básica da madeira diferiu entre os períodos de irrigação avaliados. As árvores irrigadas por 12 meses apresentaram valores entre 0,487 g cm^{-3} (40%) a 0,522 g cm^{-3} (0%), sem diferenças significativas entre as posições ao longo do fuste, o que evidencia maior uniformidade da madeira. Em contraste, as árvores irrigadas por 36 meses apresentaram maior amplitude de variação, sendo observados os maiores valores na base do tronco (0,561 g cm^{-3}) e os menores nas posições intermediárias (0,456 g cm^{-3}) do fuste.

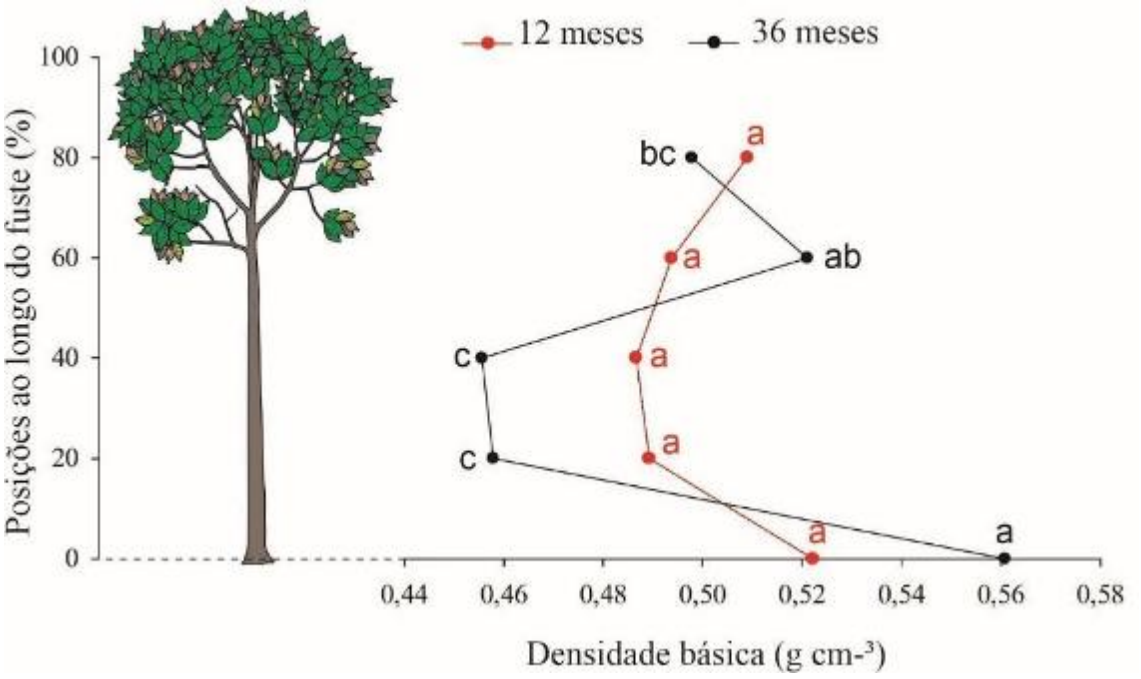


Figura 2 – Variação da densidade básica ao longo do fuste da madeira de teca em dois tempos de irrigação.

Médias seguidas pela mesma letra na mesma linha não possuem diferenças estatísticas significativas pelo teste de Tukey a 95% de confiança.

Na literatura existem diferentes resultados em relação à densidade da madeira ao longo do tronco para a *T. grandis*. Miranda et al. (2011) constataram que a densidade básica aumentou ao longo do tronco de 0,555 g cm^{-3} a 0,674 g cm^{-3} na base e no topo, respectivamente. Rios et al.

(2021) ao estudarem a espécie proveniente de plantios na Amazônia brasileira, encontraram valores de 0,551; 0,526 e 0,501 g cm^{-3} para as posições da base, meio e topo, respectivamente, observando uma redução base topo com diferença significativa da base para as demais posições. Gil et al., (2018) avaliaram a mesma espécie aos sete anos de idade proveniente de Urutaí-GO, e observaram a tendência de maiores valores na base do tronco (0% de altura), redução a 25% da altura, seguido de estabilização/aumento até 75% e decréscimo em direção ao topo da árvore (100%). Portanto, não existe um padrão específico para a variação da densidade básica ao longo do fuste para *T. grandis*, o pode justificar a diferença de comportamento entre os tratamentos estudados frente às diferenças de manejo.

Silva et al. (2015), confirmam que a variação da densidade da madeira ao longo do fuste da *T. grandis* não possui um padrão definido, em que, pode ocorrer uma redução, acréscimo ou diminuição em alguma posição na altura do fuste. Essa variabilidade pode ser atribuída a diferenças nas taxas de crescimento e à presença de madeira juvenil e adulta.

Embora a disponibilidade hídrica seja reconhecida como fator capaz de influenciar a atividade cambial e a formação dos tecidos lenhosos (Taiz e Zeiger, 2017), os resultados obtidos sugerem que o prolongamento da irrigação após o estabelecimento inicial do povoamento não modifica significativamente a madeira. Segundo Moya et al. (2014), características como densidade e qualidade do lenho em plantios de teca são influenciadas por múltiplos fatores, incluindo idade, posição longitudinal no tronco, condições ambientais e práticas silviculturais, cuja interação pode reduzir ou mascarar efeitos isolados do manejo hídrico.

4. Conclusões

Para a madeira de *Tectona grandis,* conclui-se que, a prática de irrigação em até 36 meses não promove ganhos na densidade básica da madeira de teca, indicando que a irrigação por apenas 12 meses pode ser suficiente para a produção de madeira com características semelhantes e restringindo a propriedade avaliada.

Agradecimentos

A Agência de Desenvolvimento do Estado do Ceará (ADECE), ao Banco do Nordeste do Brasil (BNB) e à Embrapa Agroindústria Tropical pela disponibilidade da madeira**.**

5. Referências bibliográficas

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2022). NBR 7190-1: Projeto de estruturas de madeira – Parte 1: Critérios de dimensionamento.

Chambi-Legoas, R., Carpio-Mendoza, N. E., Collazos-Mendoza, B. R., & Portal-Cahuana, L. A. (2025). Technological characterization of teak wood from plantation thinnings in the southeastern Peruvian Amazon. *Journal of the Korean Wood Science and Technology*, *53*(5), 455–470. https://doi.org/10.5658/WOOD.2025.53.5.455

Curvo, K. R., Silva, G. A. O., Castro, V. R., Gava, F. H., Pereira, B. L. C., & Oliveira, A. C. (2024). Heartwood proportion and density of *Tectona grandis* L.f. wood from Brazilian fast-growing plantations at different ages. *European Journal of Wood and Wood Products, 82*, 301–314. https://doi.org/10.1007/s00107-023-02031-5

Gil, J. L. R. A., Barboza, F. S., Coneglian, A., Sette Jr., C. R., Silva, M. F., & Moraes, M. D. A. (2018). Características físicas e anatômicas da madeira de *Tectona grandis* L.f. aos 7 anos de idade. *Revista de Ciências Agrárias, 41*(2), 529–538.

Indústria Brasileira de Árvores- Ibá. Relatório Anual 2025. 104 p. https://iba.org/wp-content/uploads/2025/10/IBA_relatorio_digital_POR.pdf.

Kollert, W., & Kleine, M. (2017). *The Global Teak Study: Analysis, Evaluation and Future Potential of Teak Resources*. Vienna: International Union of Forest Research Organizations (IUFRO). https://www.cifor-icraf.org/knowledge/publication/10550/

Miranda, I., Sousa, V., & Pereira, H. (2011). Wood properties of teak (*Tectona grandis*) from a mature unmanaged stand in East Timor. *Journal of Wood Science, 57*(3), 171–178. https://doi.org/10.1007/s10086-010-1164-8

Moya, R., Bond, B., & Quesada, H. (2014). A review of heartwood properties of *Tectona grandis* trees from fast-growth plantations. *Wood Science and Technology, 48*(2), 411–433. https://doi.org/10.1007/s00226-013-0599-7

Uddin, M. T., Rahman, M. M., Likhon, M. N. A., Akon, A. S. M. J. U., Sultana, M., & Jahan, M. S. (2025). Wood characteristics of 16-year-old teak (*Tectona grandis*) cultivated in Kaptai, Bangladesh. *Wood Material Science & Engineering*, 1–9. https://doi.org/10.1080/17480272.2025.2598870

Reis, C. A. F., Oliveira, E. B., & Santos, A. M. (2023). Teca *(Tectona grandis L. f.)* no Brasil. Colombo: Embrapa Florestas.

Rios, M. F. N., Santos, P. S. B., Rocha, M. R. S., Reis, S. C., & Reis, A. R. S. (2021). Variations in the physical properties of teak (*Tectona grandis* L.f.) planted in the Brazilian Amazon. *BIOFIX Scientific Journal, 6*(1), 1–7. https://doi.org/10.5380/biofix.v6i1.73269

Souza, L. V. C., Oliveira, J. T. S., Rocha, S. M. G., Vidaurre, G. B., Hein, P. R. G., & Arantes, M. D. C. (2024). Wood quality of young *Tectona grandis* L.f. trees and its relationship with genetic material and planting site in Mato Grosso, Brazil. *Forests, 15*(5), 860. https://doi.org/10.3390/f15050860

Taiz, L., Zeiger, E., Moller, I. M., & Murphy, A. (2017). *Fisiologia e desenvolvimento vegetal* (6. ed.). Porto Alegre: Artmed.

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

DESENVOLVIMENTO DE COMUNIDADE ENTOMOLÓGICA EM MADEIRAS DE TRÊS ESPÉCIES AMAZÔNICAS EXPOSTAS EM DOIS TIPOS DE AMBIENTES

Ítalo Sousa De Carvalho[1]; Clívia Suelem Feitosa de Araújo[1]; Carlos Vinícius Guimarães Alves[1]; Gabriel Costa Silva[1]; Ana Beatriz Nunes[1]; Ximena Mendes de Oliveira[2]; Selma Lopes Goulart[1]

[1] Universidade Federal Rural da Amazonia, Campus Parauapebas
[2] Universidade Federal de São Carlos, Campus Sorocaba, Departamento de Ciências Ambientais

Resumo: A deterioração biológica da madeira compromete sua durabilidade e utilização. Este estudo objetivou avaliar o desenvolvimento da comunidade entomológica e o grau de deterioração de madeiras de *Simarouba amara*, *Euxylophora paraensis* e *Astronium lecointei* expostas em plantio de eucalipto e floresta nativa amazônica. A deterioração foi avaliada pela metodologia IUFRO adaptada por Lepage, com atribuição de notas conforme o estado físico dos corpos de prova. *Astronium lecointei* apresentou os maiores índices de deterioração, enquanto *Simarouba amara* apresentou os menores. Os cupins foram os principais insetos xilófagos, e, no plantio de eucalipto, também foi registrada a utilização da madeira de *S. amara* por mamangavas como abrigo e local de reprodução. A floresta nativa apresentou maior incidência de ataque aos corpos de prova. Conclui-se que o ambiente de exposição e a espécie influenciam a deterioração biológica da madeira, e que a metodologia utilizada foi eficiente para avaliar esse processo.

Palavras-chave: Madeira, Espécies amazônicas, Deterioração, Xilófagos.

Development of the Entomological Community Associated with Wood from Three Amazonian Species Exposed to Two Different Environments

Abstract: Wood deterioration is a major challenge affecting its durability and use. This study evaluated the entomological community and the deterioration of wood from *Simarouba amara*, *Euxylophora paraensis*, and *Astronium lecointei* exposed in eucalyptus plantations and native Amazon forest. Deterioration was assessed using the IUFRO methodology adapted by Lepage through visual and tactile inspection of the specimens. *Astronium lecointei* showed the highest deterioration indexes, whereas *Simarouba amara* presented the lowest. Termites were the main xylophagous insects observed, while bumblebees used *S. amara* specimens for shelter and reproduction in the eucalyptus plantation. The native forest exhibited the highest incidence of insect attack. The results demonstrate that wood species and exposure environment significantly influence biological deterioration and confirm the effectiveness of the adopted methodology for evaluating wood degradation under field conditions.

Keywords: Wood, Amazonian species, Deterioration, Xylophages.

1. Introdução

A madeira é um material biológico amplamente utilizado em diversos setores, como construção civil, produção de energia, fabricação de móveis e obtenção de celulose. Entretanto, sua durabilidade pode ser comprometida pela ação de agentes bióticos e abióticos, especialmente em regiões tropicais, onde as elevadas temperaturas e a alta umidade favorecem o desenvolvimento de organismos deterioradores. Na Amazônia, além dessas condições climáticas, as grandes distâncias entre as áreas de exploração florestal e os locais de processamento aumentam o tempo de exposição das toras, intensificando os processos de deterioração.

Entre os principais agentes biológicos responsáveis pela degradação da madeira destacam-se os organismos xilófagos, cuja ação reduz a resistência mecânica e a vida útil do material, ocasionando prejuízos econômicos e comprometendo a segurança de estruturas como postes, moirões, dormentes e componentes da construção civil. Nesse contexto, a avaliação da durabilidade natural das madeiras torna-se essencial para subsidiar sua utilização, armazenamento e adoção de tratamentos preservativos mais adequados.

A redução da disponibilidade de espécies madeireiras tradicionalmente exploradas reforça a necessidade de identificar alternativas com resistência natural equivalente, contribuindo para diversificar o uso de espécies amazônicas e promover o manejo florestal sustentável. Além dos benefícios econômicos, essa estratégia reduz a pressão sobre espécies de maior exploração comercial, favorecendo a conservação dos recursos florestais.

Diante desse cenário, o presente estudo teve como objetivo avaliar o desenvolvimento da comunidade entomológica e o grau de deterioração de madeiras de *Simarouba amara*, *Euxylophora paraensis* e *Astronium lecointei*, expostas em dois ambientes distintos, floresta nativa amazônica e plantio de eucalipto, visando ampliar o conhecimento sobre a resistência natural dessas espécies e fornecer subsídios para seu armazenamento e utilização.

2. Material e métodos

Área de estudo

O estudo foi conduzido no município de Parauapebas, Pará, em áreas pertencentes ao Campus da Universidade Federal Rural da Amazônia (UFRA), localizadas nas coordenadas 06°00'10" S e 49°57'43" W. Foram avaliados dois ambientes experimentais: um plantio de eucalipto, composto pelos clones *Eucalyptus urophylla* × *E. grandis*, *E. urophylla* × *E. pellita*,

E. platyphylla e *E. platyphylla*, e um fragmento de floresta nativa secundária. O clima da região é do tipo Am, segundo a classificação de Köppen, com temperatura média anual de 26,35 °C, umidade relativa média de 78% e precipitação anual entre 1.500 e 2.000 mm.

Confecção dos corpos de prova

Foram utilizadas madeiras de três espécies amazônicas: Marupá (*Simarouba amara* Aubl.), amarelão (*Euxylophora paraensis* Huber) e Muiracatiara (*Astronium lecointei* Ducke), representando madeiras de baixa, média e alta densidade, respectivamente. As amostras foram confeccionadas a partir de resíduos do polo moveleiro de Parauapebas, seguindo a norma COPANT 30:1-004 (1971), com dimensões de 20 × 3 × 3 cm. Foram produzidos 216 corpos de prova, sendo 72 por espécie e 36 destinados a cada ambiente experimental.

Instalação do experimento

Em cada ambiente experimental, os corpos de prova foram distribuídos em três condições de exposição: suspensos, sobre a serapilheira e enterrados no solo. A instalação ocorreu em novembro de 2019, sendo realizada no dia 23 no plantio de eucalipto e no dia 27 na floresta nativa.

Avaliações

As avaliações foram realizadas após 4, 9, 10 e 12 meses de exposição. Em cada campanha, os corpos de prova foram coletados, acondicionados individualmente e encaminhados ao laboratório, onde foram retirados e identificados os insetos associados às amostras. Posteriormente, realizou-se a avaliação visual do estado de conservação da madeira por meio da metodologia da *International Union of Forest Research Organizations* (IUFRO), adaptada por Lepage (1970), atribuindo-se notas conforme o grau de deterioração observado e calculando-se o Índice de Deterioração (ID).

Análise dos dados

Os dados obtidos foram organizados no Microsoft Excel® (2019), sendo calculadas as médias dos corpos de prova e dos tratamentos para comparação entre espécies, ambientes e condições de exposição.

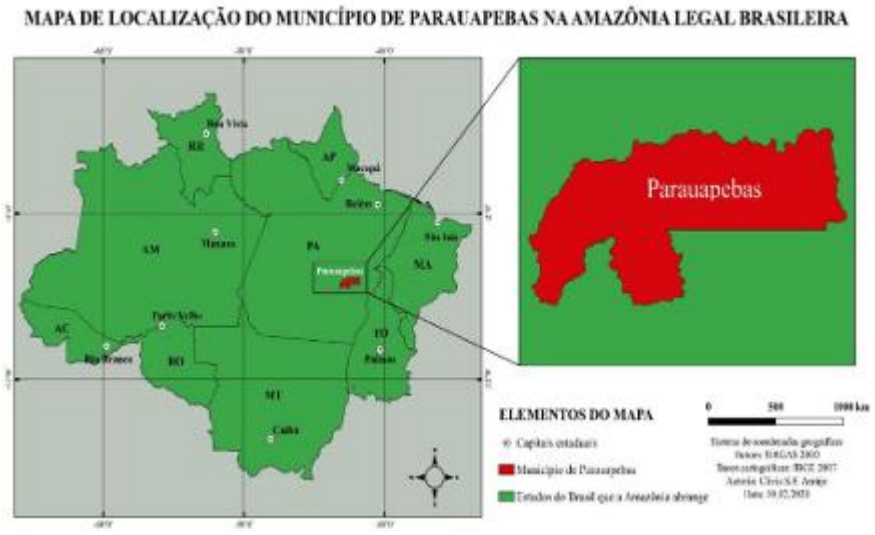


Figura 1 – Localização da área de estudo.

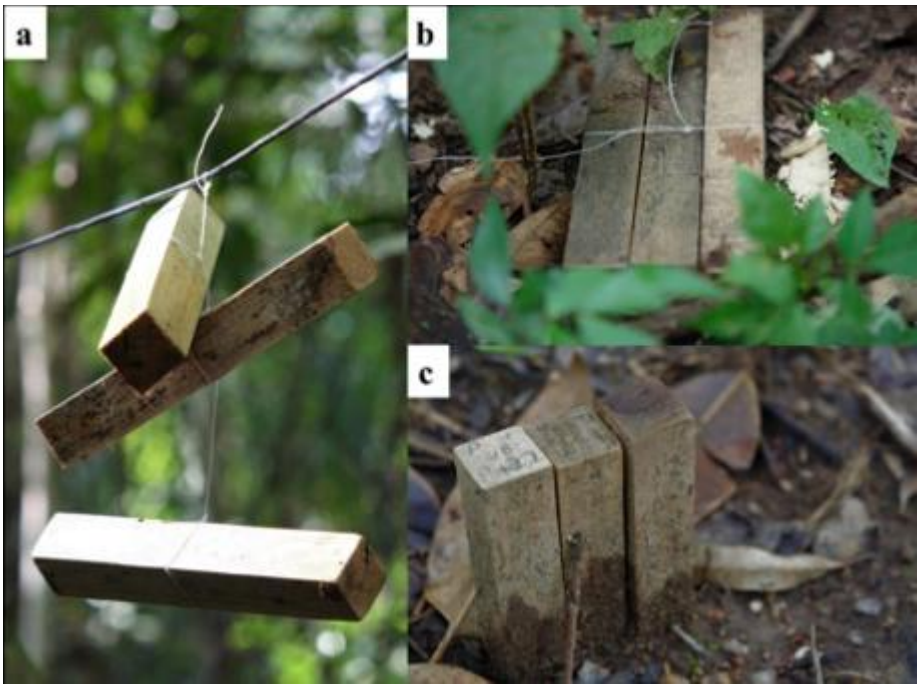


Figura 2 - Fixação dos corpos de prova nos blocos suspensos (a), de serapilheira (b) e subsolo (c).

Tabela 1 - Classificação do nível de deterioração das madeiras em contato com o solo

ESTADO DE SANIDADE	NOTA	ID
Sadio, nenhum dano visível	0	100
Ataque leve ou superficial de fungos, térmitas ou coleobrocas	1	90
Ataque evidente, mas moderado de fungos, térmitas ou coleobrocas	2	70
Apodrecimento intenso ou ataque interno de térmitas	3	40
Deterioração intensa, com desfibramento evidente	4	0

Fonte: Lepage (1970)

3. Resultados e discussão

Os Índices de Deterioração (ID) diminuíram progressivamente ao longo das avaliações em ambos os ambientes, evidenciando o avanço do processo de degradação da madeira durante o período experimental. Entre as espécies avaliadas, *Astronium lecointei* apresentou os maiores valores de ID, indicando maior resistência natural à deterioração, enquanto *Simarouba amara* apresentou os menores índices, caracterizando maior suscetibilidade ao ataque de organismos deterioradores. *Euxylophora paraensis* apresentou comportamento intermediário.

Esses resultados corroboram a classificação proposta por Lepage (1970), segundo a qual menores valores de ID correspondem a maiores níveis de deterioração. Nos dois ambientes avaliados, os corpos de prova dispostos sobre a serapilheira apresentaram os menores valores de ID, indicando maior intensidade de deterioração quando comparados a os tratamentos enterrados. Esse comportamento pode estar relacionado às condições favoráveis de umidade e ao acúmulo de matéria orgânica, fatores que estimulam a atividade de fungos e insetos xilófagos, intensificando a degradação da madeira.

A floresta nativa apresentou maior frequência de corpos de prova atacados por insetos xilófagos, enquanto no plantio de eucalipto observou-se maior intensidade de deterioração em cada corpo de prova. Em ambos os ambientes, os cupins do gênero *Coptotermes* foram os principais organismos associados à degradação da madeira. Também foram registradas larvas de coleópteros, formigas e indivíduos do gênero *Bombus* (mamangavas), que utilizaram corpos de prova de *Simarouba amara* suspensos como abrigo e local de reprodução.

A espécie *Simarouba amara* apresentou a maior incidência de ataque por insetos xilófagos durante todo o período experimental, coincidindo com os menores Índices de deterioração observados. Essa maior vulnerabilidade pode estar relacionada às características anatômicas e físico-químicas da madeira, especialmente à menor densidade, que favorece a colonização por organismos deterioradores, conforme descrito por Eaton e Hale (1993).

Em contraste, *Astronium lecointei*, de maior densidade, apresentou maior resistência à deterioração, demonstrando potencial para aplicações que demandam elevada durabilidade natural. Os resultados evidenciam que tanto as características intrínsecas das espécies, quanto as condições ambientais influenciam diretamente a deterioração biológica da madeira.

A metodologia da IUFRO, adaptada por Lepage (1970), mostrou-se eficiente para discriminar os diferentes níveis de deterioração entre as espécies e ambientes avaliados, constituindo uma ferramenta adequada para estudos de durabilidade natural em condições de campo.

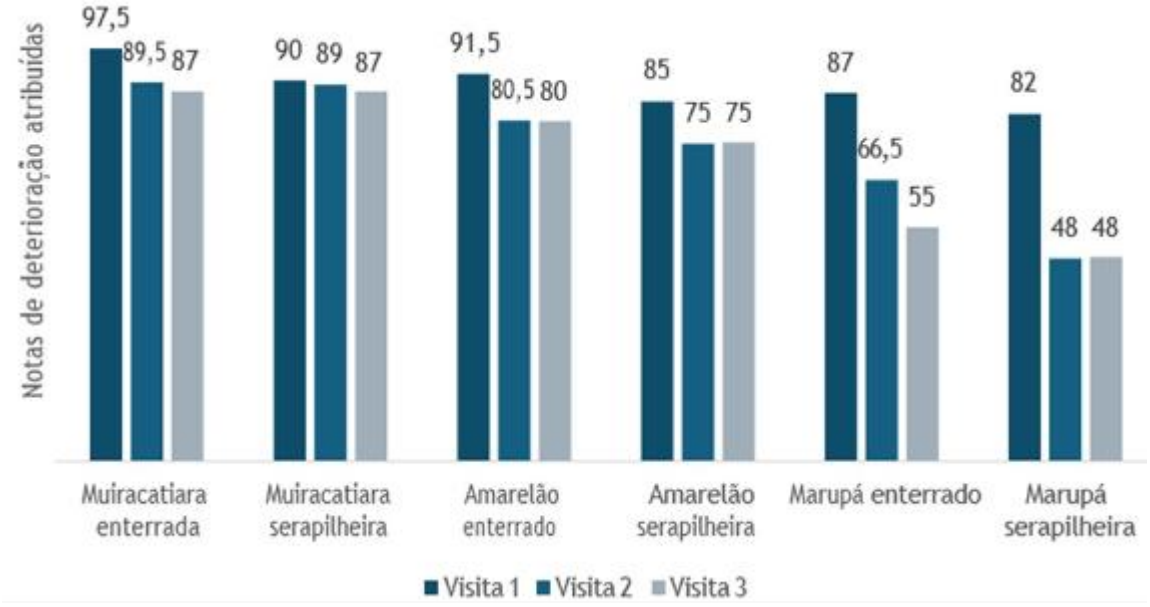


Figura 3 – Representação gráfica dos Índices de Deterioração por espécie

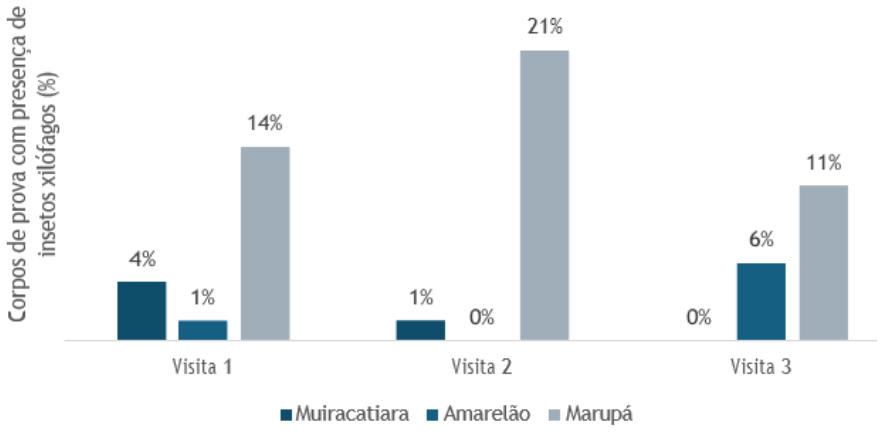


Figura 4 - Representação gráfica dos percentuais de corpos de prova, por espécie, onde foi observada a presença de insetos xilófagos

Figura 5 - Deterioração intensa, com desfibramento evidente, espécie *S. amara* (corpos de prova à esquerda da imagem).

4. Conclusões

O desenvolvimento da comunidade entomológica e a deterioração da madeira variaram em função da espécie e do ambiente de exposição.

Astronium lecointei apresentou maior resistência natural à deterioração, enquanto *Simarouba amara* foi a espécie mais suscetível.

Os cupins foram os principais agentes xilófagos associados à degradação dos corpos de prova, sendo a floresta nativa o ambiente com maior incidência de ataque.

O plantio de eucalipto proporcionou maior intensidade de deterioração.

A serapilheira apresentou os menores índices de deterioração para todas as espécies.

A metodologia da IUFRO, adaptada por Lepage, mostrou-se eficiente para avaliar o grau de deterioração da madeira e a dinâmica da comunidade entomológica, contribuindo para o conhecimento da resistência natural de espécies amazônicas e fornecendo subsídios para seu armazenamento, manejo e utilização.

5. Agradecimentos

Os autores agradecem à Universidade Federal Rural da Amazônia (UFRA), Campus Parauapebas, pela infraestrutura e apoio ao desenvolvimento da pesquisa, bem como aos docentes, técnicos e colaboradores que contribuíram para a execução das atividades de campo e laboratoriais. Em especial ao Grupo de Pesquisa GMABIO, sob a coordenação da Profa. Selma Lopes Goulart, pelo apoio, dedicação e contribuição científica que enriqueceram de forma significativa este trabalho.

6. Referências bibliográficas

Araújo, H. J. B., Magalhães, W. L. E., & Oliveira, L. C. (2012). Durabilidade de madeira de Corymbia citriodora tratada com CCA em ambiente amazônico. Acta Amazonica, 42(1), 49–58. https://doi.org/10.1590/S0044-59672012000100006

Comisión Panamericana de Normas Técnicas. (1971). COPANT 30:1-004: Maderas: Determinación del peso específico aparente.

Jesus, M. A., Morais, J. W., Abreu, R. L. S., & Cardias, M. E. C. (1998). Durabilidade natural de 46 espécies de madeiras amazônicas em contato com o solo em ambiente florestal. Scientia Forestalis, (54), 81–91.

Lepage, E. S. (1970). Método padrão sugerido pela IUFRO para ensaios de campo com amostras de madeira. Preservação de Madeiras, 1, 205–216.

Microsoft. (2019). Microsoft Excel.

Oliveira, L. C., & Santos, R. S. (2015). Durabilidade natural de madeiras amazônicas ocorrentes no Acre (Resultados preliminares).

Pacheco, J. J., et al. (2011). Estatística Municipal: Parauapebas.

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Determinação da densidade aparente de espécies comerciais de *Pinus* do sudoeste paulista

Maria Eduarda de Oliveira[1]; Nathalia Maria da Silva[1]; Júlia Lôbo Ribeiro Anciotti Gil[2]; Mariana Pires Franco[1];

[1] Instituto de Ciências e Engenharia - UNESP campus de Itapeva
[2] Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz – ESALQ/USP

Resumo: A densidade aparente da madeira é uma propriedade tecnológica fundamental, relacionada às características anatômicas e mecânicas do lenho. Este estudo teve como objetivo analisar comparativamente a densidade aparente radial média de *Pinus elliottii*, *Pinus caribaea* e de seu híbrido (*P. elliottii* var. *elliottii* × *P. caribaea* var. *hondurensis*), por meio de densitometria de raios X. Foram avaliadas 15 árvores de 20 anos (cinco por grupo genético), provenientes de talhões adjacentes sob as mesmas condições edafoclimáticas, em Ribeirão Branco/SP. Os resultados evidenciaram que a densidade aparente média se manteve homogênea entre os grupos (0,55 a 0,56 g/cm³), sem diferença estatística significativa (ANOVA, p = 0,957; Tukey, 5%). Os valores extremos (0,10 a 1,44 g/cm³) e os desvios-padrão evidenciaram maior heterogeneidade interna nos grupos avaliados. Conclui-se que, sob as mesmas condições ambientais, o material genético não influenciou a densidade aparente média do lenho aos 20 anos.

Palavras-chave: densitometria de raios X; variação radial da densidade; usos finais

Determination of basic density of commercial Pinus species from southwestern São Paulo state

Abstract: Wood apparent density is a fundamental technological property related to the anatomical and mechanical characteristics of the wood. This study aimed to comparatively analyze the mean radial apparent density of *Pinus elliottii*, *Pinus caribaea*, and their hybrid (*P. elliottii* var. *elliottii* × *P. caribaea* var. *hondurensis*) using X-ray densitometry. Fifteen 20-year-old trees (five per genetic group) from adjacent stands under identical edaphoclimatic conditions in Ribeirão Branco, São Paulo, were evaluated. The results showed that the mean apparent density remained uniform across the groups (0.55 to 0.56 g/cm³), with no statistically significant difference (ANOVA, p = 0.957; Tukey, 5%). Extreme values (0.10 to 1.44 g/cm³) and standard deviations indicated greater internal heterogeneity within the

evaluated groups. It is concluded that, under the same environmental conditions, the genetic material did not influence the mean apparent wood density at 20 years of age.

Keywords: X-ray densitometry; radial density variation; end-uses

1. Introdução

O Brasil é líder mundial em produtividade silvicultural, exibindo alta capacidade para o cultivo de florestas comerciais. Nesse contexto o gênero *Pinus* spp., se destaca na Região Sul do país em função das condições edafoclimáticas locais, atuando como importante fornecedor de matéria-prima para as indústrias de papel e celulose, madeira serrada e painéis (IBÁ, 2025). Com o intuito de expandir a base florestal desse gênero, têm sido desenvolvidos estudos com novas espécies e programas de melhoramento genético. Como exemplo desses esforços, destacam-se os híbridos entre espécies de *Pinus elliottii* var. *elliottii* × *Pinus caribaea* var. *hondurensis*, que apresentam elevado potencial para a produção de madeira (ALMEIDA et al., 2012).

A densidade aparente da madeira é definida pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT, 2022) como a razão entre a massa e o volume de uma amostra, ambos considerados no mesmo teor de umidade. Essa propriedade destaca-se como uma das mais importantes na caracterização tecnológica da madeira por apresentar forte relação com suas características anatômicas, químicas e mecânicas (SURDI et al., 2014). Por essa razão, sua avaliação é fundamental para determinar a qualidade do material e sua adequação a diferentes usos.

Entre os métodos utilizados para mensuração dessa propriedade, a densitometria de raios X destaca-se como uma técnica eficiente e não destrutiva. Segundo Amaral (1994), o método consiste na obtenção de radiografias de seções transversais finas da madeira, permitindo visualizar variações internas do lenho. O avanço e o aperfeiçoamento dessa técnica possibilitaram análises mais precisas da densidade aparente ao longo do lenho e de sua heterogeneidade radial (CASTRO, 2011).

No entanto, apesar da importância da densidade aparente e da ampla utilização da densitometria de raios X, ainda existem lacunas na literatura quanto à comparação da variação radial dessa propriedade entre *Pinus elliottii*, *Pinus caribaea* e seus híbridos. Dessa forma, compreender essas diferenças é essencial para ampliar o conhecimento sobre o comportamento tecnológico da madeira e fornecer subsídios para programas de melhoramento genético, manejo florestal e definição de usos mais adequados.

Nesse contexto, o presente trabalho tem como objetivo analisar comparativamente a densidade aparente radial média de *Pinus elliottii*, *Pinus caribaea* e de seu híbrido, por meio da técnica de densitometria de raios X, buscando identificar o comportamento da densidade ao longo do raio e as possíveis diferenças estruturais entre as espécies.

2. Material e métodos

O material híbrido *Pinus elliottii* var. *elliottii* × *Pinus caribaea* var. *hondurensis* foi coletado no talhão 10 da Fazenda Comum do Rio Preto, localizada no município de Ribeirão Branco, SP (24°15'35,17" S; 49°12'7,08" W), a 1.120 m de altitude, em parceria com a empresa Pinara Reflorestamento e Administração S.A., responsável pela cessão das amostras. Para minimizar a influência do sítio e isolar o efeito do material genético, os exemplares das espécies puras foram obtidos em talhões adjacentes, estabelecidos sob as mesmas condições edafoclimáticas.

Para o desenvolvimento deste estudo, foram utilizadas 15 árvores com 20 anos de idade, distribuídas em três grupos de cinco indivíduos cada: *Pinus elliottii*, *Pinus caribaea* e o híbrido (*Pinus elliottii* var. *elliottii* × *Pinus caribaea* var. *hondurensis*). Essa distribuição entre os grupos permitiu a comparação direta da densidade da madeira entre as espécies puras e o material híbrido, sob as mesmas condições ambientais de plantio.

As amostras foram encaminhadas ao Laboratório de Anatomia e Identificação de Madeiras da Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" (ESALQ/USP), onde, após inspeção visual dos discos para identificação de possíveis defeitos, foi retirada a porção central contendo a medula e os anéis de crescimento (Figura 1A). Cada seção foi colada em suporte de madeira (Figura 1B) e cortada na direção transversal contendo 1,5 mm de espessura, em equipamento de dupla serra circular paralela (Figura 1C), assim obtendo corpos de prova padronizados para a leitura densitométrica. Em seguida, as seções transversais do lenho foram

condicionadas em câmara de climatização (20°C, 60% UR) até atingirem umidade estável de 12% (Figura 1D) (AMARAL; TOMAZELLO FILHO, 1998).



Figura 1 - (A) amostra medula-casca obtida a partir do disco transversal do tronco da árvore; (B) amostras radiais identificadas e coladas no suporte de madeira; (C) corte das amostras no equipamento dupla serra circular paralela; (D) amostras acondicionadas em câmara para estabilização.

Para a obtenção das imagens digitais dos perfis radiais do lenho, utilizou-se o equipamento de raios X digital Faxitron LX 60 (Faxitron X-Ray, Illinois, EUA). A irradiação operou com parâmetros ajustados para 18 segundos de tempo de exposição e 30 kV.

As imagens radiográficas foram processadas no software WinDendro, que converteu a variação dos tons de cinza decorrente da absorção diferencial dos raios X em dados quantitativos de densidade aparente. A partir dessa leitura radial, o programa gerou os perfis densitométricos, permitindo a extração dos dados e a consequente elaboração das tabelas e gráficos de variação da densidade.

3. Resultados e discussão

A análise densitométrica por raios X permitiu avaliar de forma detalhada e não destrutiva o comportamento do lenho ao longo do desenvolvimento radial do tronco nos três grupos genéticos estudados. A partir do processamento das radiografias foram determinados os

valores médios por árvore e os extremos de densidade aparente (mínima e máxima) registrados ao longo de todo o perfil radial de cada grupo (Tabela 1).

Tabela 1 - Densidade aparente média, desvio-padrão e valores extremos (mínimo e máximo) por grupo genético.

Grupo Genético	n (árvores)	Densidade aparente (g/cm³)		
		Média	Mínima	Máxima
P.elliotti	5	0,5567 a (± 0,021)	0,1522	1,1422
P.caribaea	5	0,5609 a (± 0,039)	0,1035	1,4361
Híbrido	5	0,5548 a (±0,034)	0,2135	1,2968

[1] Médias seguidas da mesma letra não diferem estatisticamente entre si, pelo teste de Tukey, a 5% de significância ($p > 0,05$). [2] Valores entre parênteses correspondem ao desvio-padrão (g/cm³).

Diante dos dados apresentados, é possível verificar que a densidade aparente média obtida neste estudo está dentro da amplitude de valores citados pela literatura. A densidade aparente média de todos as árvores se manteve em uma faixa homogênea (entre 0,55 e 0,56 g/cm³), o que está perfeitamente alinhado com a média observada por Castro et al. (2014) (0,54 g/cm³) para *Pinus caribaea* var. *hondurensis* aos 17 anos. Os valores mínimos e máximos observados (0,10 a 1,44 g/cm³) refletem a amplitude natural entre lenho inicial e lenho tardio ao longo do raio, característica típica do padrão de crescimento periódico das coníferas.

A variação interna do perfil radial, no entanto, não apresentou diferença estatística entre os grupos genéticos quando comparada a densidade média por árvore ($F(2,12) = 0,045$; $p = 0,957$). Os pressupostos de normalidade dos resíduos (Shapiro-Wilk, $p = 0,825$) e de homogeneidade de variâncias (Bartlett, $p = 0,572$) foram atendidos, validando o uso da ANOVA paramétrica. O teste de Tukey confirmou esse resultado, agrupando *P. elliottii*, *P. caribaea* e o híbrido em uma única categoria estatística (Tabela 1).

Os resultados indicam que, sob as mesmas condições edafoclimáticas controladas no delineamento experimental pela amostragem em talhões adjacentes, o material genético não influenciou a densidade aparente média do lenho aos 20 anos de idade.

Apesar da semelhança estatística, entre as médias das espécies, é possível observar através dos valores de máximo e mínimo de todos os grupos, a elevada variação radial interna (do centro para a casca), reforçando a importância da proporção

de lenho adulto presente na madeira. À medida que a árvore se desenvolve, há um aumento da densidade nas regiões mais externas do tronco, resultando em um material com melhor desempenho físico-mecânico em relação ao lenho juvenil.

Vivian et al. (2022) descreve que ciclos de produção mais longos resultam em madeiras com maior aptidão estrutural. Dessa forma, os resultados obtidos neste estudo, reforçam que madeiras em estágios mais avançados de maturidade tendo por característica maior proporção de lenho adulto, apresentam um potencial elevado para aplicações estruturais, bem como no âmbito da construção civil.

4. Conclusões

A densidade aparente média não apresentou diferença estatística entre *P. elliottii*, *P. caribaea* e seu híbrido aos 20 anos de idade. A elevada variação radial comprovou que a transição entre lenho juvenil e adulto influencia a densidade mais fortemente do que a própria genética da árvore. Conclui-se que maximizar a proporção de lenho adulto é a estratégia fundamental para garantir o desempenho físico-mecânico exigido em usos estruturais na construção civil.

5. Agradecimentos

Agradecemos ao Laboratório de Anatomia e Identificação de Madeiras – LAIM da Esalq/USP e ao docente responsável Prof. Dr. Mario Tommasiello por possibilitar o uso do equipamento de densitometria de raios x, bem como a troca de experiências e aprendizados.

6. Referências bibliográficas

1. Artigos de Periódicos

Almeida, N. F. de, Bortoletto Júnior, G., Mendes, R. F., & Surdi, P. G. (2012). Avaliação da madeira de Pinus elliottii var. elliottii x Pinus caribaea var. hondurensis para produção de compensados. *Scientia Forestalis*, *40*(96), 435-443. Recuperado de http://www.ipef.br/publicacoes/scientia/nr96/cap01.pdf .

Surdi, P. G.; Bortoletto Júnior, G.; Mendes, R . F.; Ameida, N. F. (2014). Use of hybrid Pinus elliottii var. elliottii x Pinus caribaea var. hondurensis and Pinus taeda L. in the production of OSB panels. Scientia Forestalis, v. 43, n. 108, p. 763-772. https://www.ipef.br/publicacoes/scientia/nr108/cap02.pdf.

Castro, V.R, Tomazello Filho, M., Surdi, P.G. (2013). Avaliação do perfil radial do lenho de árvores de Pinus (*Pinus caribaea* var. *hondurensis* Barr. et Golf.) por densitometria de raios X. Ciência Florestal**,** v. 42, n. 103, p. 353-360. https://www.ipef.br/publicacoes/scientia/nr103/cap05.pdf.

Vivian, M. A., Dobner Júnior, M., Modes, K. S., Belini, U. L., & Vaz, D. R.. (2022). Ciclos de produção de *Pinus taeda* L. com mais de 30 anos: uma alternativa para obtenção de madeira para usos sólidos e estruturais. Ciência Florestal, 32(2), 573–596. https://doi.org/10.5902/1980509842430.

2. Normas e Leis:

Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2022). NBR 7190-1: Projeto de estruturas de madeira: Critérios de dimensionamento. ABNT.

3. Bases de Dados:

Indústria Brasileira de Árvores - IBÁ. (2025). Relatório anual 2025. https://iba.org/wp-content/uploads/2025/10/IBA_relatorio_digital_POR.pdf

4. Dissertações e Teses:

Amaral, A.C.B.(1994). Implantação da metodologia de densitometria de raios X em madeira. (Dissertação mestrado). Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo.

Castro, V.R.(2011). Aplicação de métodos não destrutivos das propriedades físicas do lenho de árvores de *Pinus caribaea* var. *hondurensis* Barr.et Golf. e *Tectona grandis* (L.f.). (Dissertação mestrado). Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo.

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Determinação das propriedades físicas de *Cedrela odorata (L.)* e avaliação de porosidade por métodos de vácuo intermitente e contínuo

Jessica Tavares Chaves Faria [1]; Bruno Maia Barroso Burns; Carlos Augusto Cardoso Fernandes; Gabriel Iuri Candido Leandro; Carlos Fernando Ferreira da Silva; Thuane Sofia Gomes dos Santos; Alexandre Miguel do Nascimento; Alexandre Monteiro de Carvalho[2]

[1] Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro 01
[2] Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro 02

Resumo: A caracterização física e a determinação da porosidade da madeira são essenciais para otimizar tratamentos industriais e prever seu comportamento higroscópico. Este estudo avaliou as propriedades físicas da madeira de cedro rosa e comparou a eficiência dos métodos de impregnação por vácuo intermitente e contínuo, associados ou não à vaporização. A espécie apresentou densidade básica média de 0,45 g/cm³ e fator de anisotropia de 1,59, indicando boa estabilidade dimensional e baixo risco de empenamentos. A combinação de vácuo intermitente com vaporização provocou a degradação e extração de compostos celulares, reduzindo a densidade para 0,4303 g/cm³ e a porosidade para 29,29%, com elevado teor de umidade (68,30%). Por outro lado, o vácuo contínuo manteve a porosidade estabilizada (48% a 49%) e os parâmetros físicos preservados. Além disso, o método contínuo garantiu uma economia de 46% no tempo de processamento em relação ao intermitente, consolidando-se como o protocolo mais eficiente e rápido para caracterização tecnológica da madeira.

Palavras-chave: Cedro rosa, Densidade básica, Porosidade da madeira.

Determination of the physical properties of *Cedrela odorata (L.)* and evaluation of porosity by intermittent and continuous vacuum methods

Abstract: Physical characterization and determination of wood porosity are essential for optimizing industrial treatments and predicting hygroscope behavior. This study evaluated the physical properties of *Cedrela odorata* (L.) wood and compared the efficiency of impregnation methods using intermittent and continuous vacuum, combined or not with steaming. The species showed a mean basic density of 0.45 g/cm³ and an anisotropy factor of 1.59, indicating good dimensional stability and low risk of warping. The combination of intermittent vacuum with steaming caused degradation and extraction of cellular compounds, reducing density to 0.4303 g/cm³ and porosity to 29.29%, while resulting in high moisture content (68.30%). On the other hand, continuous vacuum maintained stabilized porosity (48% to 49%) and preserved physical parameters. Furthermore, the continuous method provided a 46% savings in processing time compared to the intermittent process, establishing itself as the most efficient and rapid protocol for wood technological characterization.

Keywords: Pink Cedar, Basic density, Wood porosity.

1. Introdução

A Região Amazônica abriga uma das maiores biodiversidades florestais do planeta, disponibilizando uma expressiva variedade de espécies lenhosas com elevado potencial tecnológico e comercial (FERNANDES et al., 2018; SILVA, 2017). Contudo, o maior entrave para o aproveitamento racional dessas espécies ainda reside no desconhecimento detalhado de suas características tecnológicas, fisiológicas e morfológicas (FERREIRA et al., 2004 *apud* FERNANDES et al., 2018). O processamento da madeira e a ausência de caracterização física prévia resultam em desperdícios substanciais na cadeia produtiva e reduzido rendimento industrial. Nesse contexto, a caracterização tecnológica detalhada surge como requisito indispensável para otimizar os processos de secagem, preservação e utilização do material lenhoso (ABNT, 1997; SIAU, 1984).

Dentre as Meliaceae nativas de maior expressão econômica na América Tropical, destaca-se o cedro-rosa (*Cedrela odorata* L.). Por trata-se de uma espécie nobre, muito empregada no setor moveleiro e na construção civil em virtude de sua excelente trabalhabilidade, acabamento estético e durabilidade natural (GONÇALEZ et al., 2006 *apud* SILVA, 2017; FERNANDES et al., 2018). Por apresentar densidade básica tipicamente leve a moderada, em torno de 0,40 a 0,55 g/cm³ e reduzido coeficiente de anisotropia dimensional, a madeira exibe alta estabilidade. Sendo, o conhecimento desse parâmetro é essencial para indicar a melhor aplicação do material e mitigar variações dimensionais indesejadas (OLIVEIRA et al., 2010 *apud* FERNANDES et al., 2018; MENDOZA et al., 2015). As propriedades físicas da madeira fornecem informações vitais quanto ao comportamento higroscópico frente às oscilações ambientais, permitindo classificar o material em relação ao risco de deformações, empenamentos e rachaduras (BURGER & RICHTER, 1991 *apud* MENDOZA et al., 2015). Além disso, o teor de umidade afeta diretamente a trabalhabilidade, a resistência mecânica e a estabilidade dimensional do tecido lenhoso (SILVA & OLIVEIRA, 2003 *apud* FERNANDES et al., 2018).

Fisicamente, a madeira é definida como um material heterogêneo, celular, poroso e anisotrópico, cuja permeabilidade e transporte de fluidos são regidos pela geometria dos lumens e abertura das pontuações (SIAU, 1984; STAMM, 1964 *apud* SIAU, 1984). A determinação precisa da porosidade total e do volume de vazios (Vv) é indispensável para prever a absorção de líquidos e a penetrabilidade de soluções preservantes (MACLEAN, 1952 *apud* SIAU, 1984). Contudo, o tempo necessário para atingir a saturação completa da madeira em ensaios de imersão estática convencional pode estender-se por semanas devido à elevada resistência capilar dos vasos (SCANAVACA JÚNIOR & GARCIA, 2004 *apud* MENDOZA

et al., 2015). Para superar essa limitação, a aplicação de vácuo atua evacuando o ar ocluso nos poros, eliminando a contrapressão capilar e aumentando a taxa de intrusão do líquido (SIAU, 1984). Apesar disso, persistem lacunas sobre como as modalidades de vácuo contínuo e intermitente combinadas ou não à vaporização, que altera e extrai resinas do material, afetam a eficiência da saturação e a integridade do cedro-rosa (MAINIERI & CHIMELO, 1989 *apud* SILVA, 2017). Diante do exposto, o presente trabalho teve como objetivos: Determinar as principais propriedades físicas da madeira *de Cedrela odorata* (L.), incluindo o teor de umidade, a densidade básica, as contrações/inchamentos lineares (radial, tangencial e longitudinal) e o fator de anisotropia dimensional. Avaliar e quantificar a porosidade da madeira por meio das metodologias de saturação por vácuo intermitente e vácuo contínuo; Comparar a eficiência e a rapidez de saturação entre os dois métodos impregnantes, identificando o protocolo ideal para ensaios físico-anatômicos e tecnológicos da espécie.

2. Material e métodos

2.1. Obtenção, Amostragem e Confecção dos Corpos de Prova

O material de cedro-rosa (*Cedrela odorata* L.) utilizado neste estudo foi obtido no laboratório de Estruturas da Madeira- UFRRJ. A amostragem e a confecção dos corpos de prova foram realizadas no LPM, seguindo as diretrizes gerais estabelecidas pelas normas técnicas NBR 7190 (ABNT, 1997). Foram confeccionados corpos de prova isentos de defeitos anatômicos aparentes (como nós, rachaduras, esmoado ou ataque de organismos xilófagos), com dimensões nominais de 2,0 × 3,0 × 5,0 cm.

2.2. Determinação das Propriedades Físicas e Estabilidade Dimensional

Para a caracterização física da madeira, os corpos de prova foram submetidos aos ensaios de determinação da densidade básica, teor de umidade e retratibilidade linear e volumétrica. Os corpos de provas foram pesados com auxílio de uma balança digital e medimos as dimensões de 5 corpos de provas com auxílio de micrometro digital.



Figuras 1 Micrometro digital a esquerda. Fontes: Autoria própria (2026).

Para o ensaio de densidade, foram realizadas as seguintes etapas:

1 – Seca ao ar

2 – Imerso em água (H2O)

3 – Seca ao ar + uso de sílica

4 – Seca em estufa a aproximadamente 103°C

- **Saturação e Mapeamento Dimensional:** Inicialmente, os corpos de prova foram pesados e medidos nas dimensões tangencial, radial e longitudinal no estado Seco ao ar livre, e posteriormente levado a saturação, onde foram mantidos submersos em água destilada até atingirem a condição de saturação completa (PSF). Em seguida, mediram-se as dimensões e pesou novamente, mas agora no estado saturado.

- **Secagem ao ar e em Estufa- Massa Seca:** Após a mensuração no estado saturado, os corpos de prova foram conduzidos ao dessecador e consecutivamente à estufa de circulação forçada do ar, mantida à temperatura de (+-103ºc) até atingirem massa seca constante, todas as pesagens foram aferidas em balança analítica com precisão.
- **Cálculo das Propriedades Físicas:** Posteriormente, foi calculado sua densidade básica (Db), densidade saturada (Dsat) e densidade anidra (Da) em cada fase e foi determinado o ponto de saturação das fibras (PSF), coeficiente de retração, coeficiente de inchamento e coeficiente de anisotropia. Equações utilizadas:

$$Db = \frac{Mseca}{Vsat} \qquad Dsat = \frac{Msat}{Vsat} \qquad Da = \frac{Mseca}{Vseca}$$

$$Cr = \frac{\beta v}{PSF} x\,100 \qquad Ci = \frac{\alpha v}{PSF} x\,100 \qquad Ca = \frac{\beta t}{\beta r}$$

2.3. Ensaios de Impregnação por Vácuo Intermitente e Vácuo Contínuo

Neste experimento, foram utilizados 20 corpos de provas, estes foram pesados e medidos e metade ainda foi vaporizada. Este processo foi separado da seguinte forma para comparar a eficiência e a cinética de saturação dos poros, as amostras foram divididas aleatoriamente em quatro grupos experimentais homogêneos e submetidas aos procedimentos de empregabilidade assistida por vácuo em dessecação acoplado a bomba de vácuo mecânica, processo de pressão de 1 bar e secagem em estufa de circulação forçada do ar, mantida à temperatura de (+-103ºc) até atingirem massa seca constante.



Figuras 2 e 3 Amostras saturando dentro do dessecador a vácuo e após saturação.
Fontes: Autoria própria (2026).

Tratamento 1 e 3- Vácuo Intermitente: As amostras foram imersas em água destilada e submetidas a ciclos de vácuo seguidos de restauração da pressão atmosférica. Cada ciclo consistiu em 10 minutos sob vácuo e 10/15 minutos em pressão atmosférica para pesagem por

quatro vezes, totalizando 40 minutos, e após passaram por processos de pressão de 1 bar durante 30 minutos.

Tratamento 2 e 4- Vácuo Contínuo: As amostras foram submersas e mantidas sob vácuo ininterrupto de 40 minutos A aferição da massa foi realizada ao fim do vácuo, e após passaram por processos de pressão de 1 bar durante 30 minutos.

Vaporização	Vácuo	Tempo de vácuo (min)			
Sim	Contínuo	-	-	-	40
	Intermitente	10	20	30	40
Não	Contínuo	-	-	-	40
	Intermitente	10	20	30	40

Tabela1. Tratamentos para saturação com intervalos para medição dos corpos de provas.

Ao finalizar as etapas, foram feitos os cálculos para determinação de porosidade através da equação de McClea, onde: *Vv* - volume de vazios; *Db* - densidade básica; *Tu* - teor de umidade.

$$Vv = 1 - Db(0{,}667 + 0{,}01\,Tu)$$

3. Resultados e discussão

3.1. Caracterização Física e Estabilidade Dimensional da Madeira

Os valores médios de densidade básica, retratibilidade e anisotropia para *Cedrela odorata* estão apresentados na Tabela 2. A densidade básica média obtida (0,45 g/cm³) classifica a espécie como de baixa a média densidade, apresentando baixo coeficiente de variação (CV = 4,80%), o que reflete elevada homogeneidade tecnológica do material. Esse valor é condizente com a faixa descrita na literatura para o cedro-rosa (0,40 a 0,55 g/cm³) por Gonçalez et al. (2006) e Fernandes et al. (2018).

O fator de anisotropia dimensional de 1,59 reafirma a elevada estabilidade dimensional da espécie, estando dentro do limite ideal (< 2,0) sugerido por Durlo e Marchiori (1992) e Burger e Richter (1991) para minimizar riscos de empenamentos e rachaduras durante a secagem. A contração tangencial média (7,76%) superou a radial (4,90%), resultando em uma contração volumétrica de 13,56%. Essa maior retração no sentido tangencial é padrão em angiospermas arbóreas e decorre da restrição mecânica imposta pelos raios parenquimáticos no

plano radial, associada ao arranjo fibrilar das paredes celulares (Siau, 1984; Oliveira et al., 2010).

Tabela 2. Valores médios da densidade básica, retratibilidade e anisotropia dimensional de *Cedrela odorata*.

Propriedade Física	Média	Desvio-Padrão	CV (%)
Densidade Básica (g/cm3)	0.45	0.02	4.80%
Contração Tangencial (%)	7.76	0.19	2.50%
Contração Radial (%)	4.90	0.32	6.43%
Contração Volumétrica (%)	13.56	0.50	3.70%
Fator de Anisotropia (A)	1.59	0.06	4.09

3.2. Porosidade Experimental

A porosidade total foi calculada pela equação de McClea. Os ensaios de saturação por vácuo demonstraram variações na porosidade em função do pré-tratamento de vaporização, do modo de aplicação do vácuo e pressão. (Tabela 3).

Tabela 3. Porosidade experimental (%) obtida em função dos tratamentos após pressão.

Modo de Vácuo	Vaporização	Tempo Total (min)	Porosidade Exp. (%)
Intermitente	Sim	130	29.29%
	Não	130	49.19%
Contínuo	Sim	70	49.76%
	Não	70	48.36%

A combinação de vácuo intermitente com vaporização resultou na menor porosidade experimental (29,29%). Ciclos alternados de vácuo e pressão associados ao gradiente térmico da vaporização induzem tensões capilares severas que podem causar o colapso de vasos e traqueídeos (Scanavaca Júnior & Garcia, 2004; Mendoza et al., 2015), além de mobilizar extrativos resinossos que reobstruem os lúmens após o resfriamento (Mainieri & Chimelo, 1989).

Nas demais condições (vácuo intermitente sem vaporização e vácuo contínuo com ou sem vaporização), a porosidade manteve-se estável entre 48,36% e 49,76%. O tratamento contínuo alcançou a saturação estável em apenas 70 minutos, contra 130 minutos do método intermitente. A aplicação do vácuo contínuo remove o ar ocluso nos poros sem gerar oscilações drásticas de contrapressão capilar, otimizando o transporte de massa sem comprometer a estrutura anatômica (Siau, 1984). Esse resultado representa uma economia de 46% no tempo operacional sem alterar a estrutura porosa do material.

3.3. Relação entre Densidade Básica, Teor de Umidade e Porosidade

A análise conjunta dos parâmetros físicos da madeira de cedro revela como as alterações microestruturais provocadas pelo pré-tratamento térmico influenciam diretamente a densidade básica (Db) e o teor de umidade (Tu).

Tabela 4. Valores médios de densidade básica (Db), teor de umidade (Tu) e porosidade média sob diferentes combinações de tratamento.

Vácuo	Vaporização	Tu(%)	Db (g/cm3)	Porosidade Média (%)
Intermitente	Sim	68,30%	0,430	43,07%
	Não	31,93%	0,479	52,73%
Contínuo	Sim	35,81%	0,482	50,79%
	Não	35,63%	0,486	50,23%

A relação entre a densidade básica (Db), o teor de umidade (Tu) e a porosidade reflete o arranjo anatômico da madeira e a acessibilidade do seu sistema capilar. Fisicamente, a porosidade máxima teórica da madeira é inversamente proporcional à sua densidade básica, visto que madeiras de menor Db possuem maior proporção de lúmens celulares em relação ao volume de parede celular (Stamm, 1964; Siau, 1984).

O tratamento por vácuo intermitente associado à vaporização provocou a menor densidade básica (0,430 g/cm³) e o maior teor de umidade (68,30%). Segundo Siau (1984) e Stamm (1964), a vaporização intensa sob ciclos de pressão favorece a lixiviação e extração dos componentes químicos não estruturais (extrativos e hemiceluloses). A perda de massa de matéria seca reduz a densidade calculada e desobstrui vias capilares primárias, aumentando o espaço útil para retenção de água livre nos lúmens celulares (Silva & Oliveira, 2003). Por outro lado, o vácuo contínuo manteve os parâmetros físicos preservados, com Db entre 0,482 g/cm³ e

0,486 g/cm³ e Tu em torno de 35%. Isso confirma que o fluxo contínuo evacua gradualmente os poros sem submeter a parede celular a choques mecânico-hidráulicos, preservando a integridade da madeira.

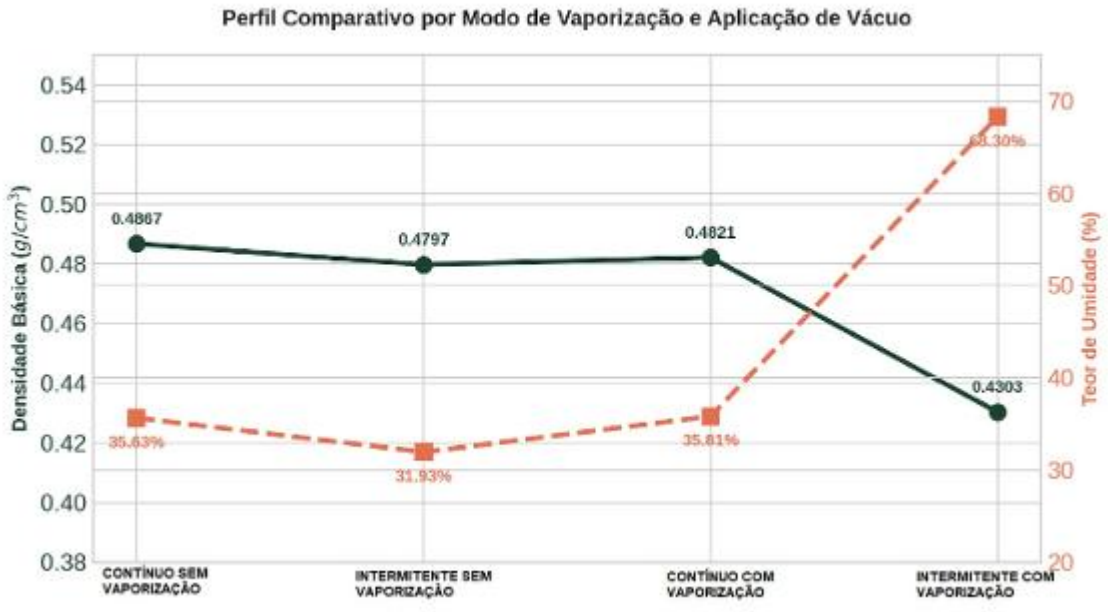


Gráfico 1: Gráfico Comparativo Db e Tu.

4. Conclusões

A madeira de *Cedrela odorata* (L.) apresenta densidade básica média de 0,45 g/cm³ (madeira leve) e fator de anisotropia dimensional de 1,59, conferindo ao material alta estabilidade dimensional e baixo risco de defeitos durante o processo de secagem.

O método de vácuo contínuo mostrou-se a alternativa mais eficiente para os ensaios de saturação e determinação da porosidade da madeira, pois alcançou a estabilização dos poros com um tempo total de processamento 46% menor (70 minutos) do que o método de vácuo intermitente (130 minutos). A combinação de vaporização com vácuo intermitente provocou alterações microestruturais severas na madeira, reduzindo a densidade básica para 0,4303 g/cm³ e a porosidade para 29,29%, além de aumentar expressivamente a retenção de umidade para 68,30% devido à extração excessiva de compostos e desarranjamento das paredes celulares.

O vácuo contínuo, associado ou não à vaporização, mantém os parâmetros físicos da madeira estáveis (porosidade em torno de 48,36% a 49,76%), sendo o protocolo ideal para a caracterização tecnológica e determinação da porosidade em laboratório.

5. Agradecimentos

Agradeço ao CNPq, ao Programa de Pós Graduação em Ciências Florestais (PPGCAF) da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (UFRRJ), ao meu orientador Alexandre Monteiro de Carvalho pela oportunidade de crescimento e ao professor Alexandre Miguel do Nascimento por todo o conhecimento adquirido neste trabalho.

6. Referências bibliográficas

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 7190**: Projeto de estruturas de madeira. Rio de Janeiro: ABNT, 1997.

BURGER, L. M.; RICHTER, H. G. *Anatomia da madeira*. São Paulo: Nobel, 1991.

DURLO, F. P.; MARCHIORI, J. N. C. **Tecnologia da madeira: retratilidade**. Santa Maria: CEPEF/FATE C, 1992. 33 p. (Série Técnica, 10).

FERNANDES, N. C. L.; VALLE, M. L. A.; CALDERON, C. M. A. Características Físicas e Anatômicas de *Cedrela odorata* L. e *Cedrelinga cateniformis* Ducke. **Floresta e Ambiente**, v. 25, n. 1, e00100814, 2018.

FERREIRA, G. C.; HOPPE, J. M.; RIGATTO, P. A. Rendimento em madeira serrada de *Cedrela odorata* L. proveniente de florestas plantadas. *Ciência Florestal*, v. 14, n. 2, p. 101-109, 2004.

GONÇALEZ, J. C.; BREDA, C. C.; BARROS, F. A.; MACEDO, D. G.; LORENZO, L. E. Relação entre a densidade básica e a variação dimensional da madeira de *Cedrela odorata* L. *Cerne*, v. 12, n. 1, p. 58-65, 2006.

MACLEAN, J. D. *Preservation of wood by pressure methods*. Agriculture Handbook n. 40. Washington: United States Department of Agriculture, Forest Service, 1952.

MAINIERI, C.; CHIMELO, J. P. *Fichas de características das madeiras brasileiras*. 2. ed. São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT), 1989.

MENDOZA, Z. M. S. H.; BORGES, P. H. M.; SILVA, E. P. P. Propriedades físicas da madeira de cedro — *Cedrela fissilis* Vell. **Multitemas**, n. 48, p. 165-178, 2015.

OLIVEIRA, J. T. S.; HELLMEISTER, J. C.; TOMAZELLO FILHO, M. Variação da retratividade da madeira de *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden em função do sentido estrutural. *Revista Árvore*, v. 34, n. 4, p. 721-728, 2010.

SCANAVACA JÚNIOR, L.; GARCIA, J. N. Rendimento em madeira serrada de *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake. *Scientia Forestalis*, n. 66, p. 148-156, 2004.

SIAU, J. F. **Transport processes in wood**. Berlin: Springer-Verlag, 1984. 245 p.

SILVA, L. N. **Correlações entre propriedades tecnológicas da madeira de cedro (*Cedrela odorata* L.) determinadas por metodologias destrutivas e não destrutivas**. 2017. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Florestal) – Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2017.

SILVA, J. A.; OLIVEIRA, J. T. S. A influência da umidade nas propriedades mecânicas da madeira de *Eucalyptus grandis*. *Revista Árvore*, v. 27, n. 4, p. 561-568, 2003.

STAMM, A. J. *Wood and cellulose science*. New York: Ronald Press Company, 1964.

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Determinação das propriedades físicas e porosidade da madeira de *Picea abies* (L.) Karst por método de vácuo intermitente e contínuo.

Bruno Maia Barroso Burns[1]; Jessica Tavares Chaves Faria[1]; Gabriel Iuri Candido Leandro[1]; Carlos Augusto Cardoso Fernandes[1]; Larissa Brandão Pereira[1]; Thuane Sofia Gomes dos Santos[1]; Alexandre Miguel do Nascimento[1]; Alexandre Monteiro de Carvalho[1]

[1] Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro 01

Resumo: A madeira de *Picea abies* (L.) Karst., também conhecida como abeto da noruega se destaca pela importância econômica e ecológica na Europa, sendo usada na construção civil, celulose e luthieria. Entender as suas propriedades físicas é essencial para definir seu uso adequado. Este trabalho teve como objetivo determinar densidade, coeficientes de retração, inchamento e anisotropia, além da sua porosidade por vácuo intermitente e contínuo, com amostras vaporizadas e não vaporizadas. Utilizaram-se corpos de prova conforme a NBR 7190:1997, em quatro fases de umidade, além de ensaios de saturação sob vácuo. A densidade básica foi de 0,32 g/cm³, o PSF de 29% e o coeficiente de anisotropia de 2,43, valores típicos de coníferas leves. As amostras não vaporizadas apresentaram menor fração de vazios que as vaporizadas. Concluiu-se que o abeto possui boa absorção de água e estabilidade dimensional intermediária, com potencial para estudos futuros sobre melhoramento de sua resistência e durabilidade.

Palavras-chave: Densidade; Porosidade; Coníferas.

Determination of physical properties and porosity of *Picea abies (L.) Karst* wood by intermittent and continuous vacuum method.

Abstract: *Picea abies* (L.) Karst. wood is economically and ecologically important in Europe, used in construction, pulp production, and lutherie. This study aimed to determine density, shrinkage, swelling and anisotropy coefficients, and porosity via intermittent and continuous vacuum methods, using vaporized and non-vaporized samples. Specimens followed NBR 7190:1997, tested across four moisture stages, plus saturation tests under vacuum. Basic density was 0.32 g/cm³, FSP was 29%, and the anisotropy coefficient was 2.43, typical of lightweight conifers. Non-vaporized samples showed lower void fraction than vaporized ones. Norway spruce shows good water absorption and intermediate dimensional stability, with potential for future studies to improve its strength and durability.

Keywords: Density, Porosity; Conifers.

1. Introdução

O abeto é o nome popular dado às espécies pertencentes do gênero Abies, que fazem parte da família Pinaceae, é uma espécie comum do centro da Europa, com sua maioria localizada na Polonia central. Trata-se de uma conífera de folhagem perene, que, quando adulta, atinge entre 40 e 50 metros de altura, com cones de até 20 cm de comprimentos (Butnaru et al.,

2022; Wajs, et al., 2010). De acordo com Earle (2024), *Picea abies* é uma árvore de grande porte, atingindo DAP de 100-150 cm, com copa cônica e casca que evolui de marrom alaranjada a fina acinzentada e escamosa, com a idade.

A *Picea abies* (L.) Karst., conhecida como abeto da noruega, trata-se de umas das árvores mais importantes, em aspectos econômicos e ecológicos, localiza-se na maior parte no norte da Europa, nas áreas subalpinas nos alpes e Cárpatos, dominando as florestas boreais (Caudullo e Tinner, 2016). Os seus principais usos são a madeira sólida, para construção, móveis, celulose e papel e luthieria (Caudullo e Tinner, 2016).

Em coníferas, de forma geral, os traqueídeos são unidades estruturais responsáveis pela condução hídrica e pela sustentação mecânica (Pitterman et al., 2006). A alternância entre lenho tardio e lenho inicial refletem um processo contínuo de ajuste dessas funções ao longo do anel de crescimento. Além disso, estudos em nível celular demonstram que essa espécie de abeto regula principalmente o tamanho do lúmem e a espessura da parede celular e não o ângulo microfibrilar da celulose para equilibrar a capacidade de condução de água e a resistência mecânica durante o crescimento (Eder, Jungnikl e Burgert, 2018).

As propriedades dos traqueídeos, exercem grande influência sobre a qualidade dos produtos da madeira, tanto de madeira sólida, quanto de produtos à base de fibras. Isso se deve ao fato de que a morfologia dos traqueídeos e a estrutura da parede celular determinam a flexibilidade da madeira e das fibras, dentre as quais, as interações entre as fibras e propriedades mecânicas, físicas e ópticas dos produtos finais (Baison et al., 2020).

Em um estudo com difração de raios X e microscopia óptica em amostras de trocos de *Picea abies* viu-se que a anatomia da madeira deste abeto apresenta uma variação estrutural significativa entre a medula e a casca, refletindo o processo de maturação do câmbio. O ângulo microfibrilar e o diâmetro do traqueídeo variam intensamente nos primeiros anéis de crescimento, estabilizando-se a partir do 10° anel (Sarém et al., 2001). Além disso, o formato da seção transversal do lúmen celular muda ao longo do crescimento radial, passando de um formato próximo ao circular, junto à medula, para um formato retangular nas regiões mais externas do lenho, tratando-se de uma transição que está diretamente relacionada à porosidade e a organização estrutural do tecido (Sarém et al., 2001).

O estudo das propriedades físicas da madeira, dentre eles, densidade, retração, inchamento e porosidade auxiliam na determinação do seu uso e comportamento, frente a determinadas condições ambientais ou estruturais. Estas propriedades podem ser afetadas por

diversos fatores, como idade, cerne e alburno e características de níveis microscópicos, como disposição de elementos anatômicos, volumes dos vasos e espessuras da parede celular.

Define-se permeabilidade como a facilidade com que gases e líquidos atravessam a estrutura porosa da madeira, diante de um gradiente de pressão. É uma propriedade física diretamente relacionada à porosidade e a anatomia celular, sendo relevante para tratamentos com preservantes, produção de celulose e secagem (Hansmann et al., 2002). Falando sobre coníferas, essa propriedade está ligada as estruturas dos traqueídeos e as pontuações areoladas presentes em suas paredes, tais quais, o grau de abertura determina a maior ou menor resistência a passagem de fluidos entre células. Ademais, o lenho tardio tende a apresentar maior permeabilidade que o lenho inicial no estado seco, por ser mais resistente a aspiração das pontuações (Hansmann et al., 2002), assim, mostrando a relação entre o comportamento físico da madeira e a sua anatomia a nível celular.

Diante disso, o presente trabalho teve como objetivo, determinar as propriedades físicas da madeira de *Picea abies* (L.) Karst., também conhecida como abeto norueguês e dentre essas propriedades temos: densidade básica, aparente, anidra, coeficiente de retratibilidade, inchamento e de anisotropia e também determinar a porosidade por método de vácuo intermitente e contínuo, com amostras vaporizadas e não vaporizadas, averiguando se há diferença nos procedimentos.

2. Material e métodos

2.1. Densidades e coeficientes

Para a realização do experimento foram utilizados corpos de provas com dimensionamento de acordo com a norma ABNT 7190:1997 – Anexo B, sendo assim, os corpos de provas possuem as dimensões 20x30x50mm, representando respectivamente os sentidos, tangencial (t), radial (r) e longitudinal (l). Segue exemplo na Figura 1.



Figura 1 – Corpo de prova para ensaio de propriedades físicas. Fonte: Autoria própria (2026).

Os corpos de provas foram pesados com auxílio de uma balança digital e medimos as dimensões de 25 corpos de provas com auxílio de micrometro digital (Figura 2A).





Figura 2A e 2B – Micrômetro digital a esquerda (Figura 2A) e amostras saturando dentro do dessecador a direita (Figura 2B). Fontes: Autoria própria (2026).

Para o ensaio de densidade, foram utilizados 5 corpos de prova, os quais foram numerados de 1 a 5 e coletou-se os dados de massa e dimensões em 4 fases. As seguintes fases foram:

1 – Seca ao ar

2 – Imerso em água (H_2O)

3 – Seca ao ar com uso de sílica

4 – Seca em estufa a 103°C (+ou- 2°C)

Na fase 1, os corpos de prova estavam secos em temperatura ambiente, na fase 2 colocou-se os corpos de provas para saturar em água, com auxílio de um dessecador (Figura 2B) e uma bomba de vácuo para acelerar o procedimento de saturação.

Na fase 3 retirou-se a água do dessecador e inseriu a sílica para iniciar o processo de secagem. Por fim, na fase 4, foram postos os corpos de provas na estufa a 103°C (+-2) para finalizar a secagem. Após a finalização de cada fase, realizou-se o procedimento de pesagem e medição das dimensões t, r e l.

Posteriormente, foram calculados suas densidades básica (Db), saturada (Dsat) e anidra (Da) em cada fase e foi determinado o ponto de saturação das fibras (PSF), coeficiente de retração, coeficiente de inchamento e coeficiente de anisotropia.

Equações utilizadas:

$$Db = \frac{Mseca}{Vsat} \qquad Dsat = \frac{Msat}{Vsat} \qquad \frac{Da = Mseca}{Vseca}$$

$$Cr = \frac{\beta v}{PSF} x\,100 \qquad Ci = \frac{\alpha v}{PSF} x\,100 \qquad Ca = \frac{\beta t}{\beta r}$$

onde:

Db - densidade básica; Dsat - densidade saturada; Da - densidade anidra;

Msat e Mseca - massa dos corpos saturado e massa dos corpos secos, respectivamente;

Vsat e Vseca - volume dos corpos saturados e volume dos corpos secos, respectivamente;

Cr, Ci e Ca- coeficiente de retratibilidade, inchamento e anisotropia, respectivamente.

2.2. Porosidade

Neste experimento, foram utilizados outros 20 corpos de provas, estes foram pesados e medidos e colocados para saturar em água. Este processo foi separado da seguinte forma:

Tabela1. Tratamentos para saturação com intervalos para medição dos corpos de provas:

Vaporização	**Vácuo**	**Tempo de vácuo (min)**			
Sim	Contínuo	0	0	0	40
	Intermitente	10	20	30	40
Não	Contínuo	0	0	0	40
	Intermitente	10	20	30	40

Foram utilizados 5 corpos de provas da madeira de abeto para cada um dos 4 experimentos, totalizando 20 corpos de provas.

O experimento com vácuo intermitente é o de tempo intervalado a cada 10 minutos, realizando a pesagem das massas dos corpos a cada interrupção. No experimento por vácuo contínuo realizou-se a pesagem das amostras antes de serem imersas em água e após os 40 minutos. As amostras que passaram pelo processo de vaporização, foram pesadas anterior e posteriormente a este processo, para depois serem imersos para saturar. O processo de vaporização foi feito inserindo as amostras em uma autoclave com temperatura média de 120°C e pressão de aproximadamente 1 bar e duração 3 horas de tratamento.

Após adquirir os pesos das amostras após o tempo de 40 minutos, passaram por processos de pressão de 1 bar durante 30 minutos.

Finalizada a etapa de pressão, foi realizada a pesagem e a medição das amostras, repetiu-se com essas amostras o processo do primeiro experimento (densidade e coeficientes) que foi

feito para as 5 primeiras amostras, porém, agora utilizando as 20 amostras do processo de porosidade. Não foi realizada a fase 3, a qual foi a secagem ao ar com uso de sílica. Por fim, depois de finalizar as etapas, foram feitos os cálculos para determinação de porosidade através da equação:

$$Va = 1 - Db(0{,}667 + 0{,}01\,Tu)$$

onde:

Va - vazio celular; *Db* - densidade básica; *Tu* - teor de umidade.

3. Resultados e discussão

3.1. Densidade, Retração e inchamento

Tabela 2. Valores das dimensões, volume, massa, densidade, teor de umidade e retração volumétrica parcial, após cada fase:

Fases	t	r	l	V(cm³)	M(g)	D (g/cm³)	Tu (%)	RVp
1	20,41	30,54	53,05	33,07	13	0,393	11,95	8,11
2	21,72	31,22	53,06	33,95	37,68	1,05	224,6	-
3	19,88	30,18	53,06	31,75	11,99	0,377	3,9	11,56
4	19,56	29,92	52,96	31,01	11,61	0,374	-	13,83

T = dimensão tangencial média; r = dimensão radial média; l = dimensão longitudinal média; V = Volume médio; M = massa média; D = densidade; Tu (%) = Teor de umidade; RVp = Retração Volumétrica parcial.

Através dos valores encontrados, foi possível determinar o ponto de saturação das fibras (PSF) como apresenta a Figura 3, abaixo:

Figura 3. Gráfico de determinação do Ponto de saturação das fibras (PSF).

Analisando o gráfico, foi possível notar que o ponto de saturação das fibras da madeira de *Picea abies (L.) Karst.* aos 29% de umidade. Apresentando ser dentro da faixa de determinação do PSF das madeiras no geral, que seria em torno de 26 a 32%. Soskic et al., (2007), por exemplo, encontrou um PSF aos 32% para a mesma espécie.

Com a determinação do ponto de saturação das fibras, pôde-se encontrar o Cr e Ci. Também se determinou as retrações tangenciais e radiais obter o Ca da espécie, utilizando a razão entre os dois valores (Tabela 3).

Tabela 3. Valores das retrações e coeficientes:

Rt	Rr	Rv	Cr	Ci	Ca
9,94	4,14	13,83	0,477	0,554	2,43

Rt = retração tangencial; Rr = retração radial; Rv = retração volumétrica; Cr = coeficiente de retratibilidade; Ci = coeficiente de inchamento; Ca = coeficiente de anisotropia.

3.2. Porosidade

Tabela 4. Teor de umidade após cada processo e porosidade:

Vácuo	Vaporização	Tu(%)	P	Vvaz
Intermitente	Sim	140,52	0,68	0,322
	Não	183,43	0,82	0,182
Contínuo	Sim	95,63	0,53	0,469
	Não	173,36	0,79	0,215

P = fração parede celular = 1-Vvaz; Vvaz = fração porosidade; Tu(%) = teor de umidade.

Tabela 5. Fração de porosidade e parede celular em diferentes teores de umidade.

Tu(%)	P	Vvaz
0	0,218	0,782
12	0,257	0,743
29	0,313	0,687

Tu(%) = Teor de umidade; P = fração parede celular; Vvaz = fração porosidade.

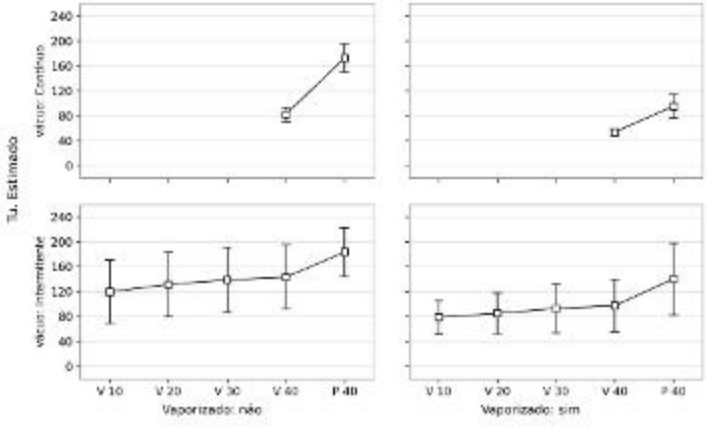


Figura 4: Gráfico do teor de umidade estimado para cada experimento de vácuo contínuo e intermitente, com e sem vaporização, para *Picea abies* (L.) Karst. por intervalo de tempo.

Nos resultados apresentados nas Tabelas 4 e 5 percebeu-se que quanto maior o teor de umidade, menor foi a porosidade e permeabilidade da madeira, algo esperado, visto que o inchamento da parede celular tende a ocupar parte do espaço poroso, o qual antes era ocupado

por ar. Soskic et al. (2007), encontrou uma porosidade volumétrica de 72%, para a mesma espécie, um resultado relativamente similar ao do presente trabalho.

Foi percebido que as amostras que passaram pela vaporização apresentaram um teor de umidade menor, um comportamento diferente do esperado. Uma possível explicação pode ser a realocação dos extrativos da madeira, ou a mesma pode exigir mais tempo para absorção, sugerindo que 40 minutos de saturação a vácuo não foi o suficiente.

Comparando o efeito da vaporização do vácuo contínuo ao intermitente, notou-se na Tabela 4 um teor de umidade maior no processo intermitente, ou seja, maior absorção e consequentemente, menor fração de espaços vazio.

Tabela 6. Valores das dimensões, volume, massa, densidade e teor de umidade após cada fase:

Condição	t	r	l	V(cm³)	M(g)	D (g/cm³)	Tu(%)
Saturada	21,72	31,35	53,48	36,41	32,03	0,88	168,8
Seca em estufa	19,84	30,25	53,35	32,02	11,91	0,372	-

T = dimensão tangencial média; r = dimensão radial média; l = dimensão longitudinal média; V = Volume médio; M = massa média; D = densidade; Tu (%) = Teor de umidade.

Tabela 7. Valores das retrações e coeficientes:

Rt	Rr	Rv	Cr	Ci	Ca
8,63	3,52	12,06	0,416	0,473	2,49

Rt = retração tangencial; Rr = retração radial; Rv = retração volumétrica; Cr = coeficiente de retratibilidade; Ci = coeficiente de inchamento; Ca = coeficiente de anisotropia.

Neste trabalho, o abeto da noruega apresentou densidade básica por volta de 0,32 g/cm³, abaixo que encontrado por Sandak et al., (2015), que encontrou densidades entre 0,39 e 0,51, em matérias primas de diferentes ambientes, o que provavelmente afetou algumas variações. Contudo, a densidade encontrada confirma o caráter de conífera leve.

Com relação às retrações, foram encontrados valores na mesma faixa encontrada por Salem et al. (2013) com Rt variando entre 8,45 a 11,08; Rr entre 4,39 a 6,49; Rv entre 12,81 a 16,78. Soskic et al., (2007) determinou valores próximos encontrados com Rt = 8,10%, Rr = 3,90 e encontrou-se o Ca = 2,16, além disso, realizando a razão entre as médias de valores das retrações determinadas por Salem et al., (2015), foi possível encontrar um Ca por volta de 1,8; valor um pouco abaixo do encontrado neste trabalho. Os resultados sugeriram variações dimensionais marcadas nos sentidos tangenciais e radiais, aonde a diferença de comportamentos pode estar marcada pela anatomia celular

4. Conclusões

A partir do presente trabalho, concluiu-se que os resultados de densidade, PSF, retração e anisotropia da madeira de *Picea abies (L.) Karst.*, estudada, demonstrou concordância com outros valores relatados na literatura. Assim, confirmando, o comportamento típico de uma madeira de conífera leve, com um coeficiente anisotrópico e estabilidade dimensional intermediária.

No processo de não vaporização, a madeira apresentou maior teor de umidade em relação as amostras vaporizadas. Consequentemente mostrou uma menor fração de vazios após o processo, contudo, apresentou uma boa absorção.

Devido a sua considerável absorção, a *Picea abies (L.) Karst.* possui potencial de crescimento em pesquisa e enriquecimento de sua madeira, para possíveis melhorias de sua resistência e durabilidade.

5. Agradecimentos

Ao CNPq, ao Programa de Pós Graduação em Ciências Florestais (PPGCAF) e a Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (UFRRJ).

6. Referências bibliográficas

Associação Brasileira de Normas Técnicas. (1997). NBR 7190: Projeto de estruturas de madeira. https://www.academia.edu/34645241/NBR_7190_Projetos_De_Estrutura_De_Madeira.

Baison, J., Zhou, L., Forsberg, N., Mörling, T., Grahn, T., Olsson, L., Karlsson, B., Wu, H. X., Mellerowicz, E. J., Lundqvist, S.-O., & García-Gil, M. R. (2020). Genetic control of tracheid properties in Norway spruce wood. Scientific Reports, 10, Article 18089. https://doi.org/10.1038/s41598-020-72586-3.

Butnaru, E., Pamfil, D., Stoleru, E., & Brebu, M. (2022). Characterization of bark, needles and cones from silver fir (Abies alba Mill.) towards valorization of biomass forestry residues. Biomass and Bioenergy, 159, 106413. https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2022.106413.

Caudullo, G., & Tinner, W. (2016). Picea abies in Europe: Distribution, habitat, usage and threats. In J. San-Miguel-Ayanz et al. (Eds.), European Atlas of Forest Tree Species (p. e012300+). Publications Office of the European Union.

Earle, C. J. (2024). Picea abies (Norway spruce) description. The Gymnosperm Database. https://www.conifers.org/pi/Picea_abies.php.

Eder, M., Jungnikl, K., & Burgert, I. (2009). A close-up view of wood structure and properties across a growth ring of Norway spruce (Picea abies [L.] Karst.). Trees, 23, 79-84. https://doi.org/10.1007/s00468-008-0256-1.

Hansmann, C., Gindl, W., Wimmer, R., & Teischinger, A. (2002). Permeability of wood: A review. Wood Research, 47(4), 1-16.

Pittermann, J., Sperry, J. S., Hacke, U. G., Wheeler, J. K., & Sikkema, E. H. (2006). Size and function in conifer tracheids and angiosperm vessels. American Journal of Botany, 93(10), 1490-1500. https://doi.org/10.3732/ajb.93.10.1490.

Salem, M. Z. M., Zeidler, A., Böhm, M., & Srba, J. (2013). Norway spruce (Picea abies [L.] Karst.) as a bioresource: Evaluation of solid wood, particleboard, and MDF technological properties and formaldehyde emission. BioResources, 8(1), 1199-1221.

Sandak, J., Sandak, A., Cantini, C., & Autino, A. (2015). Differences in wood properties of Picea abies L. Karst. in relation to site of provenance and population genetics. Holzforschung, 69(4), 385-397. https://doi.org/10.1515/hf-2014-0061.

Sarén, M.-P., Serimaa, R., Andersson, S., Paakkari, T., Saranpää, P., & Pesonen, E. (2001). Structural variation of tracheids in Norway spruce (Picea abies [L.] Karst.). Journal of Structural Biology, 136(2), 101-109. https://doi.org/10.1006/jsbi.2001.4434.

Šoškić, B., Govedar, Z., Todorović, N., & Petrović, D. (2007). Basic physical properties of spruce wood (Picea abies Karst) from plantations. Glasnik Šumarskog Fakulteta, 96, 97-110. https://doi.org/10.2298/GSF0796097S.

Wajs, A., Urbańska, J., Zaleśkiewicz, E., & Bonikowski, R. (2010). Composition of essential oil from seeds and cones of Abies alba. Natural Product Communications, 5(8), 1934578X1000500830. https://doi.org/10.1177/.

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Dimensionamento de programa de secagem para a madeira de paraju (*Calophyllum* sp.)

Fábio Henrique Della Justina do Carmo[1]; Diego Batista de Souza[1]; Amanda dos Santos Ferreira[1]; Márcia Cristiane Alves[1]; Erleide Paula Santos Verissímo[1]; Josiane Fernandes Keffer[1]; Thiago Cardoso Silva[1]; Adriano Reis Prazeres Mascarenhas[1]

[1] Universidade Federal de Rondônia, *Campus* Rolim de Moura

Resumo: A elaboração de programa de secagem busca garantir maior estabilidade dimensional das peças serradas, além de contribuir com a logística. Objetivou-se avaliar o comportamento da madeira de paraju (*Calophyllum* sp.) durante o ensaio de secagem drástica, visando gerar informações que subsidiem a elaboração e a recomendação de um programa de secagem convencional para a espécie. O material foi coletado no município de Cacoal-RO. Foram confeccionados 15 corpos de prova. Por meio dos parâmetros Temperatura inicial (Ti), Temperatura final (Tf) e Potencial de secagem (PS) foi possível elaborar o programa de secagem da espécie. Nas etapas iniciais do ensaio, a espécie apresentou maiores velocidades de perda de umidade, seguida de redução gradual da velocidade até condição anidra (aproximadamente 33 horas). As Ti, Tf e PS foram de 50,6 ºC, 72,33 ºC e 2,68, respectivamente. Assim, os parâmetros obtidos por meio do ensaio drástica, permitiram a elaboração do programa de secagem para a espécie paraju. A madeira apresentou rápida perda de umidade durante a realização do ensaio de secagem drástica, com redução gradual da velocidade de secagem até a condição anidra.

Palavras-chave: Curva de secagem; Potencial de secagem; Madeiras tropicais

Design of drying schedule for paraju wood (*Calophyllum* sp.)

Abstract: The development of a drying schedule aims to ensure greater dimensional stability of sawn pieces, as well as to contribute to logistics. The objective was to evaluate the behavior of paraju wood (*Calophyllum* sp.) during the drastic drying trial, in order to generate information that supports the elaboration and recommendation of a conventional drying program for the species. The material was collected in the municipality of Cacoal, RO. Fifteen test specimens were prepared. Using the parameters Initial Temperature (Ti), Final Temperature (Tf), and Drying Potential (DP), it was possible to establish the drying schedule for the species. In the initial stages of the test, the species showed higher moisture loss rates, followed by a gradual reduction in speed until reaching an anhydrous condition (approximately 33 hours). The Ti, Tf, and DP values were 50.6 °C, 72.33 °C, and 2.68, respectively. Thus, the parameters obtained through the drastic assay allowed the elaboration of the drying program for the paraju species. The wood showed rapid moisture loss during the drastic drying test, with gradual reduction of the drying speed until the anhydrous condition.

Keywords: Drying curve; Drying potential; Tropical woods

1. Introdução

A secagem é uma das etapas mais importantes do processamento da madeira, pois afeta sua estabilidade dimensional, resistência mecânica, durabilidade, usinabilidade e qualidade superficial. A redução do teor de umidade para níveis compatíveis com as condições de uso minimiza defeitos como empenamentos, rachaduras, colapso e tensões internas, além de aumentar a vida útil do produto e melhorar seu desempenho em processos industriais, como colagem, acabamento e preservação (Majka; Sydor, 2023; Gorgün; Ünsal, 2023).

O transporte de água durante a secagem é um fenômeno complexo de transferência simultânea de calor e massa, sendo controlado tanto pelas propriedades intrínsecas da madeira quanto pelas condições do ambiente de secagem. Entre os principais fatores relacionados ao material, destacam-se a estrutura anatômica, a permeabilidade, a orientação dos elementos celulares, a proporção entre cerne e alburno, a densidade básica, o teor de umidade inicial e as dimensões das peças (Ghosh et al., 2022; Monteiro et al., 2022).

A taxa de secagem da madeira permite caracterizar a cinética de remoção da umidade e estimar o tempo necessário para que a madeira passe do estado verde até determinado teor de umidade final, definido em função das condições de temperatura e umidade relativa do ambiente de secagem (Hermawan et al., 2024). A área superficial considerada nos cálculos também pode influenciar a determinação da taxa e, consequentemente, a elaboração dos programas de secagem (Maria et al., 2022).

A definição de programas de secagem representa um dos principais desafios tecnológicos da indústria madeireira, pois exige conciliar alta produtividade com a manutenção da qualidade final da madeira. Programas excessivamente severos podem acelerar a remoção de água, porém aumentam a ocorrência de defeitos, enquanto condições mais brandas aumentam o tempo de processamento e os custos operacionais. Dessa forma, a determinação de condições adequadas de secagem deve considerar as particularidades de cada espécie, como elevada densidade e baixa permeabilidade, características comuns em diversas madeiras tropicais (Majka; Sydor, 2023).

Nesse contexto se encontra o conjunto de espécies do gênero *Calophyllum* da Amazônia, com algumas conhecidas como paraju, as quais costumam apresentar madeiras de densidade média a alta, com propriedades de superfície que permite alta qualidade e boa colagem e que geralmente demanda secagem lenta com tendência ao aparecimento de defeitos (Lima et al., 2025). Assim, espera-se que o ensaio de secagem drástica seja capaz de caracterizar adequadamente a cinética de secagem da madeira de paraju, fornecendo parâmetros representativos para a definição de um programa de secagem convencional que minimize a

ocorrência de defeitos e otimize o tempo de processamento. Diante disso, o presente trabalho teve como objetivo avaliar o comportamento da madeira de paraju durante o ensaio de secagem drástica, visando gerar informações que subsidiem a elaboração e a recomendação de um programa de secagem convencional para a espécie.

2. Material e métodos

O material utilizado neste estudo foi coletado em uma serraria localizada no município de Cacoal - RO. A espécie utilizada foi a paraju (*Calophyllum* sp.), proveniente de Plano de Manejo Florestal Sustentável (PMFS). Durante o desdobro das toras da espécie, foram amostradas três tábuas radiais de onde foram retirados cinco corpos de provas cada, rigorosamente orientados, nos eixos longitudinal, tangencial e radial, nas dimensões aproximadas de 10,0 cm x 4,0 cm x 2,0 cm, respectivamente, totalizando 15 corpos de provas que foram posteriormente utilizados para elaboração do programa de secagem. Para isso, foram selecionados corpos de prova livres de defeitos. Após confecção, os corpos de prova foram mantidos submersos em água até o início do experimento para evitar a perda de umidade antes do início do experimento.

Adicionalmente, foram amostrados outros 15 corpos de prova utilizados para determinação da densidade básica da madeira de paraju, conforme norma NBR 11941 (ABNT, 2003). Todas as análises foram conduzidas no laboratório de Microscopia da Universidade Federal de Rondônia, *campus* Rolim de Moura.

Para elaboração do programa de secagem, utilizou-se o método de secagem drástica proposto por Brandão (1989) e adaptado por Jankowsky (2009), o qual firma-se no princípio de que pequenas amostras de madeira, quando submetidas à secagem em estufa a 103±5 °C, apresentam comportamento semelhante ao observado durante o processo de secagem convencional. Dessa forma, a técnica permite avaliar, em menor tempo, o comportamento da madeira frente à perda de umidade, possibilitando a estimativa de parâmetros importantes para a elaboração de do programa de secagem.

Nas primeiras nove horas da secagem, realizou-se a pesagem das amostras em balança semianalítica a cada uma hora. Em seguida, a pesagem foi feita em intervalos variados de no mínimo 7 horas até a constatação de massa constante.

Com os dados obtidos, foi possível elaborar a curva de secagem em função do tempo, utilizando-se para isso, um modelo de regressão exponencial. A partir dos dados também

determinou-se a velocidade de secagem (Vs) até a umidade de 12%, conforme equação 1, sendo este um valor de referência para diversas aplicações da madeira (Jankowsky, 1990).

$$Vs\ (g/m^2 \cdot h) = (mi - mf/As \times t) \quad (1)$$

Em que: mi é a massa inicial da amostra (g); mf é massa da amostra em umidade de 12% (g); As é a área superficial da amostra (m²); t é o tempo de secagem (h).

O método a seguir foi obtido a partir da secagem drástica foram utilizados para estimar a temperatura inicial (Ti), temperatura final (Tf) e o potencial de secagem (PS), conforme baseado nas Equações 2, 3 e 4 recomendações e metodologias apresentadas em Jankowsky (2009).

$$TI\ (°C) = 27{,}9049 + 0{,}7881 \times T2 + 419{,}0254 \times V1 + 1{,}9483 \times R2 \quad (2)$$

$$TF\ (°C) = 49{,}2292 + 1{,}1834 \times T2 + 273{,}8685 \times V2 + 1{,}0754 \times R1 \quad (3)$$

$$PS = 1{,}4586 - 30{,}4418 \times V3 + 42{,}9653 \times V1 + 0{,}1424 \times R3 \quad (4)$$

Em que: V1 é a velocidade de secagem até 5% de umidade (g/m².h); V2 é a velocidade de secagem até 30% de umidade (g/m².h); V3 é a velocidade de secagem de 30% até 5% de umidade (g/m².h); T1 é o tempo de secagem até 5% de umidade (h); T2 é o tempo de secagem até 30% de umidade (h); T3 é o tempo de secagem de 30% até 5% de umidade (h); R1 é o índice de rachaduras até 5% de umidade; R2 é o índice de rachaduras até 30% de umidade; e R3 é o índice de rachaduras de 30% até 5% de umidade.

A partir destes parâmetros, elaborou-se o programa de secagem, conforme Jankowsky & Galina (2013). Desta forma, definiram-se as fases de pré-secagem mantendo a Ti constante até o início da secagem propriamente dita, iniciada quando a umidade da madeira (UM) estiver abaixo ou igual a 30%.

Logo após, utilizando tabelas psicométricas, foram definidos os valores de temperatura de bulbo seco (Tbs), temperatura de bulbo úmido (Tbu), depressão psicrométrica (DP), umidade relativa do ar (UR), umidade de equilíbrio da madeira (UE) e potencial de secagem (PS) adequados às características da madeira em estudo. A fase de secagem foi estruturada com incrementos constantes de temperatura até atingir a Tf, estimada a partir da secagem drástica. Por fim, para as etapas de uniformização e condicionamento, os valores de Tbs, Tbu, UR e UE foram definidos com base na observação dos parâmetros obtidos na etapa final de secagem.

Os resultados obtidos foram analisados por meio de estatística descritiva, indicando-se as medidas de tendência central e distribuição das variáveis analisadas no programa Microsoft Office Excel.

3. Resultados e discussão

A densidade básica da madeira de paraju foi de 616,30 ± 6,8 kg/m³. Silva et al. (2023) e Koeche et al. (2024) avaliaram a madeira de *Calophyllum brasiliense* e encontraram valores de densidade básica de 577 kg/m³ e 580 kg/m³, respectivamente, valores estes próximos ao apresentado neste estudo.

Por meio da condução do ensaio de secagem da madeira de paraju, foi possível elaborar a curva de secagem (Figura 1). Nas primeiras horas de secagem, observou-se uma redução acentuada da umidade da madeira, caracterizada principalmente pela perda de água livre (da madeira úmida até o Ponto de Saturação das Fibras - PSF de aproximadamente 30%). Após essa fase, há uma redução gradual na perda de umidade da madeira. Essa redução se deve à maior dificuldade de remoção de água de impregnação (abaixo do PSF) contida principalmente na parede celular. À medida que o teor de umidade da madeira diminui, a energia requerida para remoção da água contida nas células aumenta, devido ao aumento da resistência à difusão da água (Shmulsky & Jones, 2011).

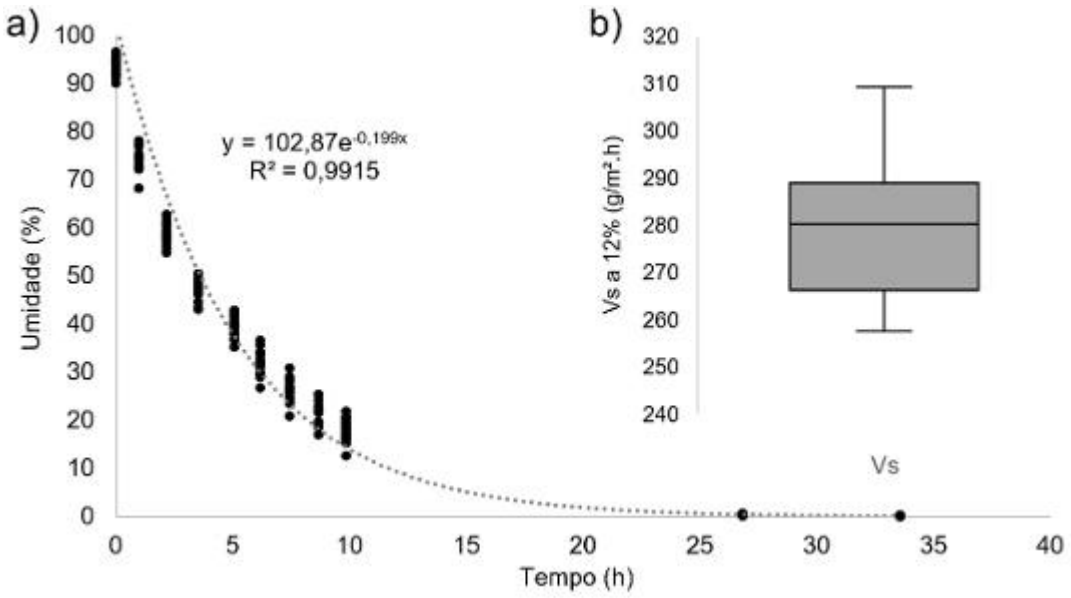


Figura 1 – a) Curva de secagem e b) boxplot da velocidade de secagem até a umidade de 12% (Vs) para a madeira de paraju (*Calophyllum* sp.), explorada em Rondônia.

O boxplot da velocidade de secagem da madeira úmida até a umidade de 12% (Figura 1b) demonstra a baixa variação entre os corpos de prova utilizados no ensaio de secagem. A velocidade de secagem média foi de aproximadamente 281 g/m².h, valor aproximado ao

observado por Alves et al. (2026) para a madeira de canuto (*Heliocarpus* sp.), que apresenta densidade básica de aproximadamente 665,4 kg/m³. O tempo necessário para as amostras do ensaio de secagem drástica atingirem a condição anidra foi de 33 horas.

A partir dos dados obtidos, foi possível determinar os parâmetros de secagem apresentados na Tabela 1. Observa-se que as velocidades de secagem (V1, V2 e V3) corroboram os resultados apresentados na Figura 1, com a maior velocidade de secagem da madeira verde até 30% de umidade (V2), representado principalmente pela retirada da água livre da madeira. A menor velocidade de secagem observada foi para a V3, correspondendo de 30% até 5%, representando pela remoção de água de impregnação (Jankowsky & Galina, 2013). As médias de taxa de secagem foram comparadas aos apresentados por Eleotério et al. (2015) que realizaram ensaio de secagem drástica de madeiras de *Eucalyptus* e *Corymbia* e observaram V1 entre 199 e 344 g/m².h, V2 entre 371 e 733 g/m².h e V3 entre 92 e 150 g/m².h.

Tabela 1 – Variáveis obtidas para elaboração do programa de secagem, a partir do método de secagem drástica aplicado à madeira de paraju (*Calophyllum* sp.), explorada em Rondônia, Brasil (n = 15).

Variáveis	Média	Desvio-Padrão
V1 (g/m².h)	339.91	39.67
V2 (g/m².h)	578.56	44.48
V3 (g/m².h)	166.25	24.03
T1 (h)	14.61	1.09
T2 (h)	6.13	0.34
T3 (h)	8.48	0.86
R1	0.00	0.00
R2	1.87	1.02
R3	1.87	1.02
Ti (°C)	50.62	2.86
Tf (°C)	72.33	1.25
PS	2.68	0.19

Os parâmetros calculados de Temperatura inicial (Ti), Temperatura final (Tf) e do Potencial de secagem (PS), estão de acordo com outros trabalhos de literatura. Eleotério et al. (2015) encontraram Ti variando entre 40,0 e 47,3 ºC, valores abaixo do observado no presente estudo, Tf variando entre 66,5 e 73,6 ºC e PS variando entre 2,16 e 2,66 para madeiras dos gêneros *Eucalyptus* e *Corymbia*. Já Batista et al. (2012), avaliando a madeira de Guajará (*Micropholis venulosa*) encontraram valores de Ti, Tf e PS de 49,0 ºC, 74 ºC e 1,7, respectivamente. A partir dos parâmetros apresentados foi possível realizar a elaboração do

programa de secagem da espécie paraju (Tabela 2). A umidade de equilíbrio considerada para as fases de uniformização e condicionamento foram 8% e 14%, respectivamente.

Tabela 2 – Programa de secagem elaborado a partir do método de secagem drástica para a madeira de paraju (*Calophyllum* sp.), explorada em Rondônia.

Fase	UM (%)	Tbs (°C)	Tbu (°C)	UR (%)	UE (%)	PS
Aquecimento	> 50	50.0	49.0	95.0	21.5	-
Pré-Secagem	> 50	50.0	46.6	81.0	15.0	> 3.3
Pré-Secagem	50	50.0	46.6	81.0	15.0	3.3
Pré-Secagem	45	50.0	46.0	79.0	14.0	3.2
Pré-Secagem	40	50.0	45.5	76.0	13.0	3.1
Pré-Secagem	35	50.0	44.5	72.0	12.0	2.9
Secagem	30	50.0	43.5	67.0	11.0	2.7
Secagem	25	56.0	47.2	59.0	9.0	2.7
Secagem	20	61.0	48.3	49.0	7.0	2.7
Secagem	15	67.0	50.4	42.0	6.0	2.7
Secagem	10	72.0	47.5	29.0	4.0	2.7
Secagem	5	72.0	33.0	15.0	2.0	2.7
Uniformização	-	72.0	61.0	60.0	8.0	2.7
Condicionamento	-	72.0	68.5	83.0	14.0	-

Em que: UM - Umidade da madeira; Tbs - Temperatura de bulbo seco; Tbu - Temperatura de bulbo úmido; UR - Umidade relativa do ar; UE - Umidade de equilíbrio da madeira; e PS - Potencial de secagem da madeira.

O correto dimensionamento de programa de secagem permite acelerar a perda de umidade da madeira, mantendo-se a qualidade do produto. Para utilizações que exigem estabilidade dimensional das peças em serviço, o correto processo de secagem é fundamental para produção de material de qualidade. Ainda, sob o ponto de vista logístico, permite reduzir os custos de transporte, contribuindo assim para o fortalecimento do setor.

4. Conclusões

A madeira de paraju apresentou rápida perda de umidade durante a realização do ensaio de secagem drástica, com redução gradual da velocidade de secagem até a condição anidra. Por meio dos parâmetros Temperatura inicial (Ti), Temperatura final (Tf) e Potencial de secagem (PS) foi possível elaborar o programa de secagem da espécie. Os parâmetros obtidos foram semelhantes aos apresentados para as madeiras dos gêneros *Eucalyptus* e *Corymbia* e de espécies amazônicas. O desenvolvimento de programa de secagem para espécies comerciais da Amazônia, contribui para a agregação de valor para a indústria de base florestal da região, possibilitando a comercialização de madeiras livres de defeitos, bem como para a minimização dos custos de transporte dos produtos.

5. Agradecimentos

Agradecemos à Pró-Reitoria de Pesquisa da Universidade Federal de Rondônia (UNIR) pela concessão de recursos financeiros por meio dos Editais nº 001/2023/DPESQ/PROPESQ/UNIR e nº 003/2023/DPESQ/PROPESQ/UNIR. Agradecemos, ainda, à Fundação Rondônia de Amparo ao Desenvolvimento das Ações Científicas e Tecnológicas e à Pesquisa do Estado de Rondônia (FAPERO) pela concessão de recursos financeiros por meio da Chamada Pública nº 005/2023 – FAPERO/DITT, conforme os Termos de Outorga nº 163/2024 e nº 190/2024.

6. Referências bibliográficas

Alves, M. C., Oliveira, R., Ferreira, A. S., Reis, C. A., Verissimo, E. P. S., Simão, B. A., Silva, T. C., Carmo, F. H. D. J., Mascarenhas, A. R. P., Rocha, K. J., & Guaraná, E. C. (2026). Dessorção de água e dimensionamento de programa de secagem para a madeira de canuto (*Heliocarpus* sp.). Anais do XIII Simpósio Brasileiro de Pós-graduação em Ciências Florestais.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 11941: Madeira - Determinação da densidade Básica. Rio de Janeiro, 2003.

Brandão, A, T. O. (1989). Determinação de metodologia para a indicação de programas de secagem de madeiras (Dissertação de Mestrado). Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo.

Eleotério, J. R., Bagattoli, T. R., Hornburg, K. F., & Silva, C. M. K. (2015) Secagem drástica de madeiras de *Eucalyptus* e *Corymbia* fornecendo informações para a elaboração de programas de secagem. Pesquisa Florestal Brasileira, 35(84), 451-457.

Ghosh, D. K., Islam, M. A., Ghosh, R. K., Mazumdar, S., & Das, A. K. (2022). Investigating the drying characteristics of *Anthocephalus chinensis* (Lam.) A. Rich ex Walp wood. Heliyon, 8(8). https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e10360

Görgün, H. V., & Ünsal, Ö. (2023). Determination of optimum lumber drying schedule of tree of heaven grown in Türkiye. Cerne, 29. https://doi.org/10.1590/01047760202329013254

Hermawan, A., Priadi, T., Murano, T., Sakagami, H., & Fujimoto, N. (2024). High-temperature drying: A review of fundamental research and development in wood drying. Drying Technology, 42(16). https://doi.org/10.1080/07373937.2024.2423021

Jankowsky, I. P. (1990) Fundamentos de secagem de madeiras. Piracicaba: Departamento de Ciências Florestais. ESALQ/USP.

Jankowsky, I. P. (2009). Metodologia Simplificada para Indicação de Programas de Secagem (Tese de Livre docência). Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo.

Jankowsky, I. P., & Galina, I. C. M. (2013) Secagem de Madeiras. São Paulo: Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz / Universidade de São Paulo.

Koech, R., Schmitz, R., Melo, N. D., Rios, P. D. A., Osaki, T. S., & Marinho, J. F. C. (2024). Densidade básica e contração da madeira de *Calophyllum brasiliense* Cambess. sentido radial do fuste. Anais do VI Congresso Brasileiro de Ciência e Tecnologia da Madeira.

Lima, I. L., Ranzini, M., Garcia, J. N., Eufrade Jr., H. J., Assumpção, P. A., & Longui, E. L. (2025). Physicomechanical properties of *Acacia mangium* Willd and *Calophyllum brasiliense* Cambess wood and their potential for industrial use. Ciência Florestal, 35, e89491. https://doi.org/10.5902/1980509889491

Majka, J., & Sydor, M. (2023). Analysis of stress development during kiln drying of beech timber. European Journal of Wood and Wood Products, 81, 1189-1200. https://doi.org/10.1007/s00107-023-01967-y

Maria, D. M. B., Calegario, N., Soares, B. C. D., Brito, D. Y. O., & Lima, J. T. (2022). Changing the calculated surface area of wood samples to define drying schedules for *Eucalyptus* clones. Maderas. Ciencia y Tecnología, 24(52). https://doi.org/10.4067/s0718-221x2022000100452

Monteiro, T. C., Lima, J. T., Hein, P. R. G., Silva, J. R. M., Abreu Neto, R., & Rossi, L. (2022). Drying kinetics in *Eucalyptus urophylla* wood: analysis of anisotropy and region of the stem. Drying Technology, 40(10). https://doi.org/10.1080/07373937.2021.1918145

Shmulsky, R., & Jones, P. D. (2011). Forest products and wood science: An introduction. 6th Edition. Iowa: Karen Willey.

Silva, J. V. M., Jesus, C. C., & Valle, M. L. A. (2023). Anatomia macroscópica e densidade básica da madeira de espécies florestais utilizadas por moradores do trecho Una-olivença, Bahia. Agrotrópica, 35(2,3).

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Discriminação de madeiras Amazônicas por sensor NIR portátil

Dayane Targino de Medeiros[1]; Felipe Gomes Batista[2]; Adriano Reis Prazeres Mascarenhas[3]; Paulo Ricardo Gherardi Hein[2]

[1] Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico
[2] Universidade Federal de Lavras
[3] Universidade Federal de Rondônia

Resumo: A identificação de madeiras amazônicas é essencial para o manejo sustentável e o controle da exploração ilegal. Este estudo avaliou o potencial da espectroscopia no infravermelho próximo (NIR) portátil associada à quimiometria na discriminação de espécies nativas da Amazônia. Foram analisados 102 corpos de prova, cujos espectros foram coletados diretamente na superfície radial das amostras, na região do infravermelho próximo, compreendida entre 6.896 e 4.080 cm^{-1}. Aplicaram-se a análise de componentes principais (PCA) e a análise discriminante por mínimos quadrados parciais (PLS-DA) aos espectros brutos. A PCA mostrou que a primeira componente explicou 99,90% da variância total, evidenciando diferenças espectrais entre as espécies. O modelo PLS-DA apresentou elevada acurácia (92,07% a 100%) e alta especificidade (>96%), indicando forte capacidade de classificação mesmo sem pré-processamento matemático. Apenas a Aroeira apresentou sensibilidade reduzida. Os resultados confirmam o NIR portátil como ferramenta rápida, não destrutiva e promissora para identificação de madeiras amazônicas em condições operacionais.

Palavras-chave: Estatística multivariada, fiscalização florestal, quimiometria.

Discrimination of Amazonian woods by portable NIR sensor

Abstract: The identification of Amazonian woods is essential for sustainable management and the control of illegal logging. This study evaluated the potential of portable near-infrared (NIR) spectroscopy combined with chemometrics for distinguishing native Amazonian species. A total of 102 samples were analyzed; their spectra were collected directly from the radial surface of the samples in the near-infrared region, ranging from 6,896 to 4,080 cm^{-1}. Principal component analysis (PCA) and partial least squares discriminant analysis (PLS-DA) were applied to the raw spectra. PCA showed that the first component explained 99.90% of the total variance, highlighting spectral differences between the species. The PLS-DA model exhibited high accuracy (92.07% to 100%) and high specificity (>96%), indicating strong classification capability even without mathematical preprocessing. Only Aroeira showed reduced sensitivity. The results confirm portable NIR as a fast, non-destructive, and promising tool for identifying Amazonian woods under operational conditions.

Keywords: Multivariate statistics, forest monitoring, chemometrics.

1. Introdução

A Amazônia abriga uma das maiores diversidades florestais do mundo, com centenas de espécies madeireiras de elevado valor econômico e ecológico (Novaes et al. 2023). No entanto, a identificação correta dessas espécies ainda representa um desafio significativo, especialmente em condições de campo, onde características anatômicas podem ser semelhantes entre diferentes táxons (Silva et al. 2024). Essa dificuldade favorece fraudes comerciais, exploração ilegal e limita a eficiência da fiscalização da cadeia produtiva, comprometendo a gestão sustentável dos recursos florestais (Pace et al. 2019).

Nesse contexto, a espectroscopia no infravermelho próximo (NIR) destaca-se como uma técnica promissora para a identificação de madeiras. Baseada na interação da radiação eletromagnética com as ligações químicas dos principais constituintes lignocelulósicos, como celulose, hemiceluloses e lignina, a técnica gera assinaturas espectrais características de cada espécie (Ma et al. 2019). Além de rápida e não destrutiva, requer preparo mínimo das amostras, apresentando vantagens em relação aos métodos tradicionais fundamentados exclusivamente na anatomia da madeira (Medeiros et al. 2023).

Com o avanço tecnológico, espectrômetros NIR portáteis ampliaram o potencial de aplicação da técnica em condições operacionais. Diferentemente dos equipamentos de bancada, esses dispositivos permitem medições diretas na superfície da madeira, em serrarias, pátios de estocagem e pontos de fiscalização, possibilitando análises rápidas e in situ (Gomes et al. 2025). Essa mobilidade reduz a necessidade de envio de amostras a laboratórios, agiliza a tomada de decisão durante ações de fiscalização e fortalece estratégias de rastreabilidade da madeira.

Entretanto, estudos utilizando espectroscopia NIR portátil para identificação de espécies madeireiras amazônicas ainda são escassos. Até o momento, Gomes et al. (2025) constituem o único estudo que investigou essa abordagem, não havendo avaliações comparativas entre diferentes sensores portáteis. Diante dessa lacuna, a hipótese deste estudo é que sensores NIR portáteis, associados a métodos quimiométricos, permitem discriminar com alta confiabilidade espécies madeireiras amazônicas. Assim, o objetivo foi avaliar e comparar o desempenho de diferentes sensores portáteis de espectroscopia NIR na discriminação dessas espécies.

2. Material e métodos

2.1 Obtenção das amostras e determinação da densidade básica

Madeiras de espécies nativas foram obtidas por meio da reutilização de material proveniente da região amazônica, nas proximidades do município de Parauapebas, estado do Pará, Brasil. Foram selecionadas dez espécies de reconhecida importância ecológica e comercial na região amazônica para a confecção de 102 corpos de prova (Tabela 1), com 10 a 11 repetições por espécie, número definido em função da disponibilidade de material. As amostras apresentavam dimensões de 100 mm de comprimento, 30 mm de largura e 25 mm de espessura. Após a confecção em serra circular, foram devidamente identificadas a lápis e acondicionadas em sala climatizada a 25 °C e umidade relativa de aproximadamente 60%. Posteriormente, a densidade básica foi determinada pela razão entre a massa seca e o volume saturado das amostras, conforme a norma ASTM International D2395 (2017).

Tabela 1 – Espécies de madeiras amazônicas investigadas no estudo.

Nome Científico	*Nome popular*	*Densidade (kg/m³)*
Hymenolobium sp.	Angelim	628
Schinus sp.	Aroeira	711
Bertholletia excelsa	Castanheira	574
Dipteryx odorata	Cumaru	863
Apuleia leiocarpa	Garapeira	716
Micropholis venulosa	Guajará	755
Mezilaurus itauba	Itaúba	694
Hymenaea sp.	Jatobá	830
Simarouba amara Aubl.	Marupá	330
Bowdichia nitida	Sucupira	755

2.2 Aquisição dos dados espectrais

Os espectros NIR foram adquiridos com o espectrômetro portátil Trinamix NIR Spectroscopy Solution (Alemanha), operando na faixa de 1400 a 2500 nm (6896–4080 cm^{-1}), com resolução espectral de 2,83 nm e 353 variáveis espectrais por medição. O tempo de integração foi de 2 s. As leituras foram realizadas diretamente na superfície radial das amostras, por apresentar dimensões compatíveis com o feixe de aquisição dos sensores, evitando interferências da luz incidente fora da área da madeira. Para representar a variabilidade natural do material, foram obtidos espectros em dois pontos distintos de cada amostra. As aquisições ocorreram em sala climatizada (25 °C e umidade relativa de aproximadamente 60%) para minimizar interferências ambientais. Antes das medições, o equipamento foi calibrado

conforme as recomendações do fabricante, garantindo a estabilidade instrumental e a confiabilidade dos dados.

2.3 Estatística multivariada

A análise de componentes principais (PCA) e a análise discriminante por mínimos quadrados parciais (PLS-DA) foram realizadas no software Chemoface (Nunes et al., 2012) para explorar a variabilidade dos dados espectrais e discriminar as espécies de madeira. Na PLS-DA, as espécies foram definidas como classes distintas e codificadas por variáveis binárias (1 para a classe de interesse e 0 para as demais) (Pace et al., 2019). A robustez e a capacidade preditiva dos modelos foram avaliadas por validação cruzada, utilizando sensibilidade (SEN), especificidade (SPEC), precisão (PRE) e acurácia (ACCU) como critérios de desempenho. Esses parâmetros variam de 0 a 1 (ou de 0 a 100%), sendo que valores próximos de 1 indicam maior capacidade do modelo em identificar corretamente as amostras da classe (SEN), rejeitar amostras de outras classes (SPEC), minimizar falsos positivos (PRE) e maximizar a proporção de classificações corretas (ACCU).

3. Resultados e discussão

3.1 Assinaturas espectrais

A Figura 1 apresenta os espectros médios e brutos de absorvância no infravermelho próximo (NIR), na faixa de 7.000 a 4.000 cm^{-1}, para diferentes espécies de madeiras amazônicas. De modo geral, todas as espécies exibem perfis espectrais semelhantes, característica típica de materiais lignocelulósicos compostos majoritariamente por celulose, hemiceluloses e lignina (Novaes et al. 2023). Entretanto, embora o padrão químico global seja semelhante, observam-se variações na magnitude da absorvância ao longo da faixa espectral, indicando diferenças estruturais e químicas entre as espécies.

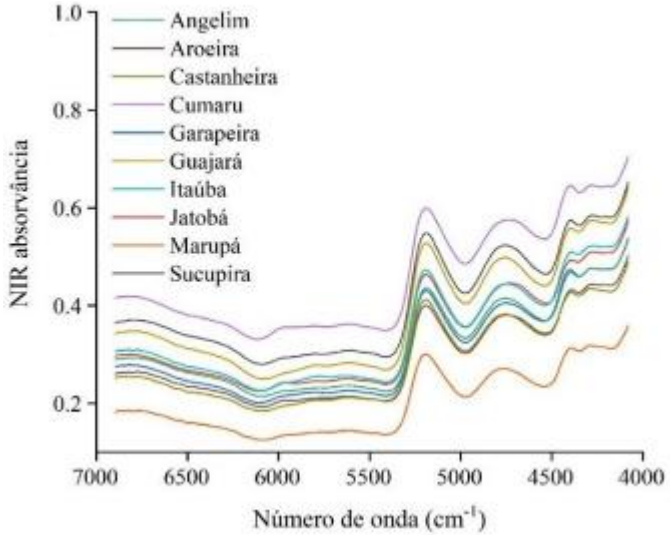


Figura 1 – Assinaturas espectrais médias na região do infravermelho próximo das madeiras nativas da Amazônia, obtidas a partir dos espectros brutos.

Os principais picos de absorvância tornam-se mais evidentes a partir de aproximadamente 5.400 cm^{-1} até 4.000 cm^{-1}, região em que se verifica maior elevação das curvas. Segundo Nisgoski et al. (2016), as regiões com maiores valores de absorvância correspondem às faixas vibracionais mais intensas e, consequentemente, concentram maior conteúdo informativo. Isso indica que o intervalo entre 5.400 e 4.000 cm^{-1} representa a porção mais relevante para a discriminação química e estrutural das espécies.

Em termos de atribuições espectrais, as bandas em torno de 7.000 cm^{-1} e 6.287 cm^{-1} estão associadas às regiões amorfas e cristalinas da celulose, respectivamente, refletindo diferenças no grau de organização das cadeias poliméricas. O intervalo de 6.900–6.850 cm^{-1} é geralmente relacionado a extrativos e aos grupos O–H fenólicos da lignina, associados a sobretons vibracionais. As bandas entre 5.200 e 5.050 cm^{-1} correspondem predominantemente à água presente na madeira, atribuídas às combinações das vibrações de estiramento e deformação dos grupos O–H da molécula de água. Já as bandas compreendidas entre 6.800 e 4.401 cm^{-1} são atribuídas principalmente às hemiceluloses, envolvendo vibrações combinadas e sobretons de grupos O–H e C–H característicos desses polissacarídeos (Pasquini 2018, Schwanninger et al. 2011).

Quanto às diferenças entre espécies, o Cumaru apresenta as maiores intensidades de absorvância em praticamente toda a faixa espectral, destacando-se especialmente nas regiões próximas a 5.200 cm^{-1} e abaixo de 4.500 cm^{-1}. Esse comportamento pode estar relacionado à

sua elevada densidade básica e ao maior teor de extrativos fenólicos e compostos aromáticos, que contribuem para maior absorção nas regiões associadas às ligações C–H e às estruturas aromáticas da lignina (Medeiros et al. 2023). A elevada resposta espectral sugere também maior interação óptica do feixe NIR com a matriz lenhosa.

Sucupira também apresenta valores elevados de absorvância, exibindo padrão semelhante ao do Cumaru, porém com menor intensidade. Jatobá demonstra comportamento intermediário a alto, especialmente na região em torno de 5.200 cm^{-1}, atribuída às combinações vibracionais de O–H, possivelmente relacionadas à umidade e aos constituintes estruturais da parede celular. Itaúba e Garapeira apresentam perfil intermediário, caracterizado por intensidade moderada e definição das bandas espectrais. Em contraste, Marupá exibe os menores valores de absorvância em praticamente todo o espectro, o que pode estar associado à sua menor densidade básica e ao reduzido teor de extrativos, resultando em menor interação da radiação NIR com a parede celular.

De forma geral, as diferenças na magnitude da absorvância permitem observar uma separação consistente entre as espécies. Algumas apresentam valores mais elevados ao longo de toda a faixa espectral, enquanto outras exibem menores intensidades, o que pode estar relacionado à densidade básica, ao teor de extrativos e à organização estrutural da parede celular (Tsuchikawa e Kobori 2015, Gomes et al. 2025). Essas variações indicam que, apesar da similaridade química intrínseca dos materiais lignocelulósicos, existem distinções suficientes para possibilitar a discriminação das espécies por meio de técnicas quimiométricas (Silva et al. 2024).

Medeiros et al. (2023) utilizaram a espectroscopia NIR para a identificação de quatro espécies nativas da Amazônia, *Bowdichia nitida*, *Manilkara huberi*, *Caryocar villosum* e *Piptadenia suaveolens*, empregando, entretanto, um equipamento de bancada em condições laboratoriais. Os autores observaram que as assinaturas espectrais apresentaram os principais picos de absorbância dentro da faixa de número de onda correspondente ao sensor portátil utilizado no presente estudo. Além disso, verificou-se tendência de maior intensidade de picos em madeiras de densidade elevada em comparação às de menor densidade, resultado que corrobora os achados desta pesquisa, reforçando a consistência das respostas espectrais independentemente da configuração instrumental.

3.2 Análise de componentes principais (PCA)

Os escores da PCA, com os espectros sem tratamento matemático, demonstram que a PC1 explica 99,90% da variância total dos dados, enquanto a PC2 contribui com apenas 0,08% (Figura 2). Esse resultado evidencia que praticamente toda a variabilidade espectral entre as espécies está concentrada na primeira componente principal. Assim, a separação das amostras ocorre predominantemente ao longo do eixo horizontal (PC1), indicando que essa componente é a principal responsável pela discriminação espectral observada, enquanto a PC2 exerce influência mínima na distinção entre os grupos. Observa-se uma separação evidente da espécie Marupá ao longo da PC1, apresentando valores menos negativos e formando um agrupamento bem definido, claramente distinto das demais espécies. Esse padrão indica diferenças químicas e/ou estruturais significativas, possivelmente associadas à sua menor densidade básica e a particularidades na composição lignocelulósica, conforme discutido por Ma et al. (2019).

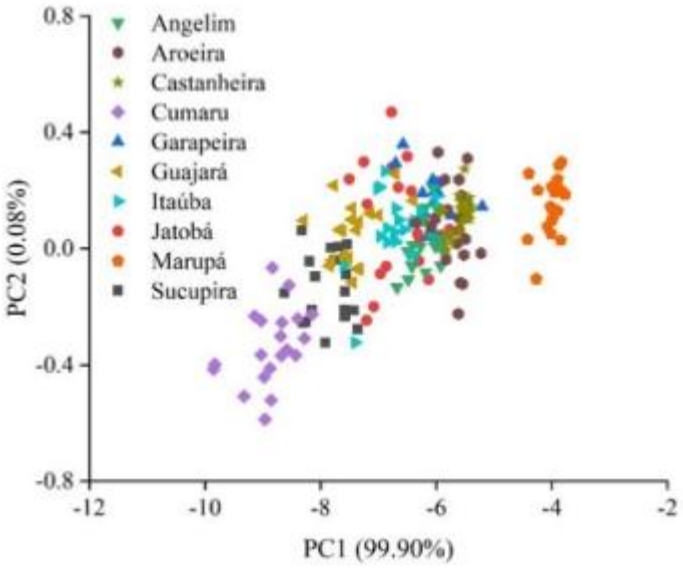


Figura 2 – Gráfico de escores da Análise de Componentes Principais (PCA) obtido a partir dos espectros NIR brutos das madeiras nativas da Amazônia.

Em contraste, espécies como Cumaru e Sucupira exibem valores mais negativos em PC1, organizando-se em agrupamentos relativamente compactos e afastados do grupo central. Esse comportamento pode estar relacionado a maiores teores de extrativos e/ou maior densidade da madeira, fatores que influenciam diretamente a absorção no NIR e, consequentemente, a intensidade e a configuração das bandas espectrais, contribuindo para sua diferenciação no espaço multivariado (Novaes et al. 2023).

As demais espécies, Angelim, Aroeira, Castanheira, Garapeira, Guajará, Itaúba e Jatobá, concentram-se predominantemente na região intermediária da PC1, apresentando considerável sobreposição entre si. Essa proximidade no espaço de escores indica maior similaridade espectral, compatível com a composição química relativamente semelhante entre madeiras tropicais. A sobreposição observada sugere que, embora exista variabilidade intrínseca entre essas espécies, a discriminação apenas com base na PCA pode ser limitada (Pace et al. 2019). Assim, a distinção mais precisa entre esses grupos possivelmente requer a aplicação de métodos supervisionados de classificação, capazes de explorar variações sutis nos padrões espectrais e aumentar o poder discriminativo do modelo.

3.3 Análise discriminante por mínimos quadrados parciais (PLS-DA)

A Tabela 2 apresenta os parâmetros de desempenho do modelo de classificação PLS-DA para as espécies avaliadas, com base nos dados espectrais NIR brutos. De modo geral, observa-se elevada acurácia global (ACU) para todas as espécies, variando de 92,07% a 100%, o que evidencia o desempenho preditivo satisfatório e a robustez do modelo na discriminação das classes. Destacam-se as espécies Cumaru, Castanheira, Garapeira, Itaúba e Jatobá, que apresentaram resultados particularmente expressivos, com sensibilidade (SEL) igual a 100% e acurácia superior a 96%. Esses indicadores demonstram excelente capacidade do modelo em identificar corretamente as amostras pertencentes a essas classes, minimizando erros de classificação e reforçando a eficiência da abordagem PLS-DA aplicada aos espectros NIR brutos.

Tabela 2 – Parâmetros de desempenho do modelo de classificação PLS-DA aplicado aos espectros NIR brutos das dez espécies de madeiras nativas da Amazônia, desenvolvido por validação cruzada e utilizando 10 variáveis latentes.

	Angelim	*Aroeira*	*Castanheira*	*Cumaru*	*Garapeira*	*Guajará*	*Itaúba*	*Jatobá*	*Marupá*	*Sucupira*
n	21	20	20	20	20	20	20	20	21	20
TP	16	4	20	20	20	19	20	20	21	19
TN	180	182	181	182	180	181	176	175	178	180
FP	1	0	1	0	2	1	6	7	3	2
FN	5	16	0	0	0	1	0	0	0	1
SPE	99.44	100	99.45	100	98.90	99.45	96.70	96.15	98.34	98.90
SEL	76.19	20	100	100	100	95	100	100	100	95
ACU	97.02	92.07	99.50	100	99.00	99.00	97.02	96.53	98.51	98.51

*Número de amostras (n), verdadeiros positivos (TP), verdadeiros negativos (TN), falsos positivos (FP), falsos negativos (FN), especificidade (SPE, %), sensibilidade (SEL, %) e acurácia (ACU, %).

A especificidade (SPE) manteve-se elevada para todas as espécies (≥ 96%), refletindo baixa incidência de falsos positivos (FP). Isso demonstra que o modelo raramente classificou incorretamente amostras de outras espécies como pertencentes a uma determinada classe, reforçando sua robustez, mesmo sem pré-processamento espectral. Por outro lado, a espécie Aroeira apresentou sensibilidade reduzida (20%), com 16 falsos negativos (FN), apesar de especificidade de 100%. Isso indica que, embora o modelo não tenha confundido outras espécies com Aroeira, houve dificuldade em reconhecer corretamente suas próprias amostras. Esse comportamento pode estar relacionado à sobreposição espectral com espécies de características químicas semelhantes, situação que poderia ser atenuada com a aplicação de tratamentos matemáticos para realçar diferenças sutis nos espectros (Gomes et al. 2025).

Para Angelim, a sensibilidade foi moderada (76,19%), com cinco falsos negativos, enquanto Guajará e Sucupira apresentaram sensibilidade de 95%. Já Marupá destacou-se com 100% de sensibilidade e acurácia de 98,51%, indicando excelente distinção espectral, coerente com sua separação observada na PCA. Assim, os resultados evidenciam que os espectros NIR apresentam forte capacidade discriminatória, especialmente para espécies com maior contraste físico-químico. No entanto, a aplicação de técnicas de pré-processamento poderia potencialmente melhorar a sensibilidade de espécies com maior sobreposição espectral, como Aroeira e Angelim, aumentando ainda mais a robustez do modelo classificatório.

4. Conclusões

A espectroscopia NIR associada à PLS-DA demonstrou alta eficiência na discriminação de dez espécies de madeiras amazônicas, mesmo utilizando espectros brutos, sem tratamento matemático. A PCA indicou que a maior parte da variabilidade espectral foi explicada pela PC1 (99,90%), evidenciando diferenças químico-estruturais relevantes entre as espécies, com destaque para a clara separação de Marupá.

O modelo de classificação por PLS-DA apresentou elevada acurácia (92,07% a 100%), alta especificidade (>96%) e sensibilidade igual ou superior a 95% para a maioria das espécies, com exceção de Aroeira, que apresentou menor capacidade de reconhecimento. De forma geral,

os resultados confirmam o potencial do NIR portátil como ferramenta rápida, não destrutiva e aplicável em campo para identificação de espécies madeireiras amazônicas.

5. Agradecimentos

Este projeto foi financiado pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – 001, pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq: 409701/2024–6, n. 353177/2025-3), pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG: APQ-00742-23, APQ-03095-26, APQ-05808-26), pela inovação UFLA (Processo 23090.000734/2026-70), pelo Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia e INCT Madeiras da Amazônia.

6. Referências bibliográficas

ASTM (2017). Standard test methods for density and specific gravity (relative density) of wood and wood-based materials (ASTM D2395–17). ASTM, West Conshohocken, PA, USA.

Gomes, J. N. N., Medeiros, D. T., Viana, L. C., Hein, P. R. G. (2025). Influence of moisture on the identification of tropical wood species by NIR spectroscopy. Holzforschung, 79(4). https://doi.org/10.1515/hf-2024-0111.

INDEA (2011). Basic notions of anatomy and macroscopic identification of wood. Núcleo LTM, Cuiabá.

Ma, T., Inagaki, T., Ban, M., Tsuchikawa, S. (2019). Rapid identification of wood species by near-infrared spatially resolved spectroscopy (NIR-SRS) based on hyperspectral imaging (HSI). Holzforschung, 73(4). https://doi.org/10.1515/hf-2018-0128.

Medeiros, D. T. D., Melo, R. R. D., Cademartori, P. H. G. D., Batista, F. G., Mascarenhas, A. R. P., Scatolino, M. V., Hein, P. R. G. (2023). Prediction of the basic density of tropical woods by near-infrared spectroscopy. Cerne, 29, e-103262. https://doi.org/10.1590/01047760202329013262.

Nisgoski, S., Klock, U., Batista, F. R. R., Schardosin, F. Z., Consalter, R., & Motta, A. C. V. (2016). Use of NIR for trees discrimination in different fertilizations based on wood and bark spectra. Ciência da Madeira, 7(2). https://doi.org/10.12953/2177-6830/rcm.v7n2p100-110.

Novaes, T. V., Ramalho, F. M. G., da Silva Araujo, E., Lima, M. D. R., Da Silva, M. G., Ferreira, G. C., Hein, P. R. G. (2023). Discrimination of amazonian forest species by NIR

spectroscopy: wood surface effects. European Journal of Wood and Wood Products, 81(1). https://doi.org/10.1007/s00107-022-01862-y.

Pace, J. H. C., de Figueiredo Latorraca, J. V., Hein, P. R. G., Carvalho, A. M., Castro, J. P., Silva, C. E. S. (2019). Wood species identification from Atlantic forest by near infrared spectroscopy. Forest systems, 28(3). https://doi.org/10.5424/fs/2019283-14558.

Pasquini, C. (2018). Near infrared spectroscopy: A mature analytical technique with new perspectives–A review. Analytica chimica acta, 1026. https://doi.org/10.1016/j.aca.2018.04.004.

Schwanninger, M., Rodrigues, J. C., Fackler, K. (2011). A review of band assignments in near infrared spectra of wood and wood components. Journal of Near Infrared Spectroscopy, 19(5). https://doi.org/10.1255/jnirs.955.

Silva, C., Nascimento, C. S., Freitas, J. A., Araújo, R. D., Higuchi, N. (2024). Alternative identification of wood from natural fallen trees of the Lecythidaceae family in the Central Amazonian using FT-NIR spectroscopy. International Forestry Review, 26(1), 29-44. https://doi.org/10.1505/146554824838457844

Tsuchikawa, S., Kobori, H. (2015). A review of recent application of near infrared spectroscopy to wood science and technology. Journal of Wood Science, 61(3). https://doi.org/10.1007/s10086-015-1467-x.

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Distribuição longitudinal da densidade básica da madeira de *Pinus* spp. em dois espaçamentos de plantio

Rodrigo Schmitz[1]; Natalia Durigon Melo; Thâmara dos Santos Osaki[1]; José Fellip Catique Marinho[1]; Romulo Koeche[1]; José Cícero Pereira Júnior[1]; Alexsandro Bayestorff da Cunha[1]; Polliana D'Angelo Rios[2]

[1] Universidade do Estado de Santa Catarina 01

Resumo: A densidade básica é uma das principais propriedades físicas da madeira e um importante indicador de sua qualidade tecnológica, estando relacionada ao desempenho mecânico, ao rendimento industrial e ao potencial de utilização da matéria-prima. Este estudo teve como objetivo avaliar a distribuição longitudinal da densidade básica da madeira de *Pinus spp.* em dois espaçamentos de plantio (2,5 × 2,5 m e 3,5 × 3,5 m), comparando essa propriedade ao longo do fuste. O estudo foi conduzido em um povoamento experimental localizado em Ponte Serrada, Santa Catarina, composto por árvores com nove anos de idade. Foram selecionadas sete árvores por tratamento por meio de inventário florestal, utilizando a distribuição diamétrica como critério de amostragem. Discos de 5 cm de espessura foram coletados na base, no DAP e nas posições correspondentes a 25%, 50%, 75% e 100% da altura comercial. A densidade básica foi determinada conforme a ABNT NBR 11941:2003, utilizando o volume saturado e a massa seca das amostras. Os dados foram submetidos à análise de variância e comparação de médias. O espaçamento de plantio não exerceu efeito significativo sobre a densidade básica da madeira ($p > 0,05$), enquanto a posição longitudinal apresentou influência significativa ($p < 0,001$), evidenciando redução da densidade da base em direção ao topo do fuste. Os resultados indicam que a variação longitudinal exerce maior influência sobre a densidade básica que o espaçamento avaliado, ressaltando a importância da amostragem em diferentes posições do fuste e o uso da densidade básica média ponderada para estimativas representativas da árvore.

Palavras-chave: Qualidade da madeira; amostragem longitudinal; lenho juvenil.

Longitudinal Distribution of Basic Wood of Pinus spp. Grown Under Two Planting Spacings

Abstract: Basic wood density is one of the most important physical properties of wood and a key indicator of its technological quality, as it is directly related to mechanical performance, industrial yield, and the potential use of the raw material. This study aimed to evaluate the longitudinal variation in the basic density of *Pinus spp.* wood grown under two planting spacings (2.5 × 2.5 m and 3.5 × 3.5 m), comparing the behavior of this property along the stem between treatments. The study was conducted in an experimental plantation located in Ponte Serrada, Santa Catarina State, Brazil, consisting of nine-year-old trees. Seven trees were selected per treatment through a forest inventory, using diameter distribution as the sampling criterion to represent the stand structure. Discs 5 cm thick were collected at the stem base, breast height (DBH), and at 25%, 50%, 75%, and 100% of the commercial stem height. Basic density was determined according to ABNT NBR 11941:2003, based on saturated volume and oven-dry mass. The data were subjected to analysis of variance and mean comparison tests. Planting

spacing had no significant effect on basic wood density ($p > 0.05$), whereas longitudinal position significantly influenced this property ($p < 0.001$), showing a gradual decrease in density from the stem base toward the top. The results indicate that longitudinal variation has a greater influence on basic wood density than planting spacing, highlighting the importance of sampling at different stem positions and suggesting that weighted mean basic density provides a more representative estimate of whole-tree wood density.

Keywords: wood quality; longitudinal sampling; juvenile wood.

1. Introdução

A crescente demanda por produtos florestais de maior valor agregado tem ampliado a necessidade de caracterização tecnológica da madeira produzida em povoamentos comerciais. Nesse contexto, além da produtividade, a qualidade da matéria-prima tornou-se um dos principais critérios para atender às exigências dos diferentes segmentos da indústria florestal, influenciando diretamente o desempenho da madeira destinada à produção de madeira serrada, painéis reconstituídos, celulose e papel, biomateriais e produtos de engenharia da madeira (OLIVEIRA; TOMAZELLO FILHO; FIEDLER, 2010). Assim, o conhecimento das propriedades físicas da madeira constitui uma importante ferramenta para o planejamento do manejo florestal, programas de melhoramento genético e definição dos usos industriais mais adequados (BURGER; RICHTER, 1991; SANTOS; SILVA; MACHADO, 2008).

Entre as espécies florestais cultivadas no Brasil, o gênero *Pinus* ocupa posição de destaque devido à elevada produtividade, ampla adaptação às diferentes condições edafoclimáticas e à versatilidade de utilização da madeira (SHIMIZU, 2008; IBÁ, 2023). A expansão dos plantios comerciais, associada ao desenvolvimento de novos materiais genéticos e à adoção de diferentes estratégias de manejo silvicultural, reforça a necessidade de compreender como esses fatores influenciam a qualidade da madeira produzida (ELEOTÉRIO; BORTOLETTO JÚNIOR, 2000; BALLARIN; PALMA, 2003).

Dentre as propriedades físicas da madeira, a densidade básica é considerada um dos principais indicadores de qualidade tecnológica, por apresentar elevada correlação com características como resistência mecânica, rigidez, estabilidade dimensional, rendimento industrial e produção de celulose (PANSHIN; DE ZEEUW, 1980; FOELKEL, 2007). Além de sua importância tecnológica, trata-se de uma propriedade de determinação relativamente simples, baixo custo operacional e elevada capacidade de sintetizar características anatômicas e mecânicas da madeira. Por essa razão, a densidade básica é amplamente empregada em

programas de melhoramento genético, inventários tecnológicos e estudos voltados à caracterização da matéria-prima destinada aos diferentes processos industriais (ZOBEL; JETT, 1995).

Entretanto, a densidade básica não se distribui uniformemente ao longo do fuste. Diversos estudos demonstram que essa propriedade apresenta variação longitudinal em função do desenvolvimento fisiológico da árvore, das alterações anatômicas e da proporção entre lenho inicial e lenho tardio (KOLLMANN; CÔTÉ, 1968; TOMAZELLO FILHO, 1985). Em espécies do gênero *Pinus*, é comum observar maiores valores de densidade nas regiões basais e redução gradual em direção ao topo da árvore, comportamento relacionado tanto à idade dos tecidos quanto às modificações estruturais ocorridas durante o crescimento do tronco (SANTOS et al., 2013). modificações estruturais ocorridas durante o crescimento do fuste.

Na maioria dos estudos tecnológicos, a determinação da densidade básica é realizada utilizando amostras retiradas em uma única posição do tronco, geralmente na altura correspondente ao diâmetro à altura do peito (DAP), devido à facilidade operacional de coleta. Entretanto, essa metodologia pode não representar adequadamente a densidade média da árvore, uma vez que desconsidera a variabilidade existente ao longo do fuste (TAYLOR, 1977; PEREIRA et al., 1984). Nesse contexto, abordagens que consideram a participação volumétrica das diferentes seções do tronco, como a determinação da densidade básica média ponderada, permitem estimar de forma mais representativa a densidade da árvore, reduzindo possíveis distorções decorrentes da amostragem pontual.

Além da posição de amostragem, fatores silviculturais, como o espaçamento de plantio, alteram a competição entre árvores e a disponibilidade de recursos para o crescimento. Embora diversos estudos tenham demonstrado efeitos do espaçamento sobre características dendrométricas como diâmetro, altura e volume, seus efeitos sobre a densidade básica ainda apresentam resultados divergentes, especialmente em povoamentos jovens de *Pinus* spp. (LIMA et al., 2009; SANQUETTA et al., 2011). Essa divergência evidencia a necessidade de investigações que avaliem simultaneamente a influência do manejo silvicultural e da posição longitudinal de amostragem sobre essa propriedade.

Apesar da ampla utilização da densidade básica como indicador de qualidade, ainda são escassos os estudos que avaliam conjuntamente sua variação longitudinal em povoamentos jovens de *Pinus* spp. submetidos a diferentes espaçamentos de plantio, bem como a representatividade da densidade média considerando a contribuição ponderada do fuste. A compreensão desse comportamento é fundamental para aperfeiçoar metodologias de amostragem, aumentar a precisão da caracterização tecnológica e fornecer subsídios para o melhoramento genético, manejo florestal e utilização industrial da madeira.

Diante desse contexto, o objetivo deste trabalho foi avaliar a distribuição longitudinal da densidade básica da madeira de árvores jovens de *Pinus spp.* em dois espaçamentos de plantio, comparando o comportamento dessa propriedade ao longo do fuste entre os tratamentos avaliados.

2. Material e métodos

O estudo foi conduzido em um povoamento experimental de *Pinus* spp. com nove anos de idade, constituído por um único material genético clonal, pertencente a uma empresa do setor florestal localizada no município de Ponte Serrada, na região oeste do estado de Santa Catarina. O experimento foi implantado em dois espaçamentos de plantio (2,5 × 2,5 m e 3,5 × 3,5 m), os quais constituíram os tratamentos avaliados para investigar a influência do arranjo espacial sobre a densidade básica da madeira. Ambos os povoamentos foram submetidos a dois desbastes sistemáticos/seletivos, realizados aos cinco e sete anos de idade.

Segundo a classificação climática de Köppen, a região apresenta clima do tipo Cfb, caracterizado como temperado úmido, sem estação seca definida e com verão ameno (ALVARES et al., 2013). A precipitação média anual é de aproximadamente 2.200 mm e a temperatura média anual é de 18,9 °C.

Para a seleção das árvores, realizou-se inicialmente um inventário florestal com o objetivo de caracterizar a estrutura diamétrica do povoamento. Com base nos dados obtidos, elaborou-se uma tabela de distribuição de frequência diamétrica (TDF), utilizada como critério para a amostragem (MACHADO; FIGUEIREDO FILHO, 2014). Em cada tratamento, foram selecionadas sete árvores distribuídas proporcionalmente entre as classes diamétricas, totalizando 14 unidades amostrais. A seleção priorizou indivíduos com fuste retilíneo, ausência de defeitos aparentes e bom estado fitossanitário, visando representar a real variabilidade diamétrica de cada espaçamento.

Após o abate das árvores, determinou-se a altura comercial do fuste, adotando-se como limite superior o diâmetro mínimo de 8,0 cm. Para avaliar a variação longitudinal da densidade básica, foram retirados discos de aproximadamente 5,0 cm de espessura nas posições correspondentes à base (0%), ao diâmetro à altura do peito (DAP; 1,30 m) e a 25%, 50%, 75% e 100% da altura comercial.

A densidade básica foi determinada individualmente para cada disco, seguindo as diretrizes da norma ABNT NBR 11941 (ABNT, 2003). As amostras foram mantidas submersas em água até a completa saturação dos poros. O volume saturado foi obtido pelo método de deslocamento de água (princípio de Arquimedes) utilizando balança de precisão (VITAL, 1984; GLASS; ZELINKA, 2010). Em seguida, as amostras foram secas em estufa com circulação forçada de ar a 103 ± 2 °C até atingirem massa constante. A densidade básica foi calculada pela razão entre a massa seca e o volume saturado.

A densidade básica média ponderada da árvore foi calculada considerando a representatividade e a participação volumétrica de cada seção do fuste, conforme a metodologia descrita por Vital (1984).

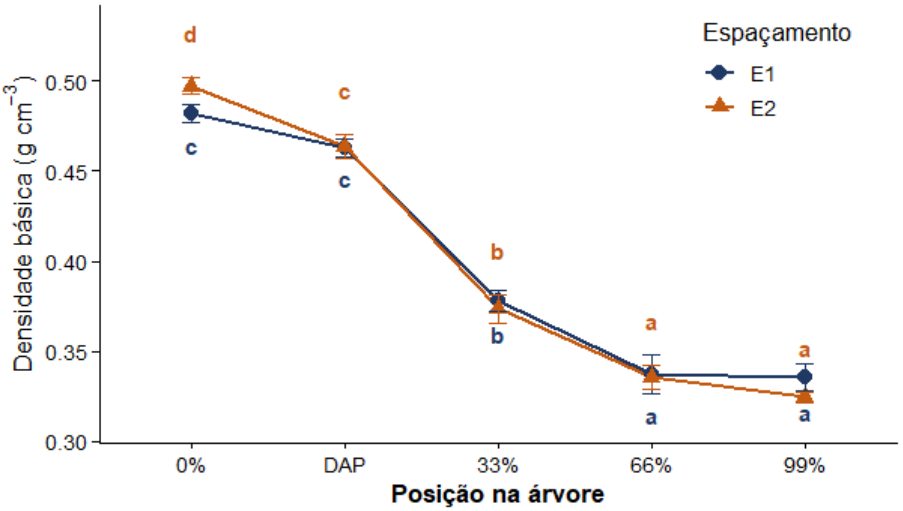
Os dados foram organizados no software Microsoft Excel® e analisados no ambiente estatístico RStudio. Inicialmente, procedeu-se à análise exploratória e à verificação dos pressupostos de normalidade dos resíduos pelo teste de Shapiro-Wilk e de homogeneidade das variâncias pelo teste de Levene. Atendidos os pressupostos, os dados foram submetidos à análise de variância (ANOVA) em arranjo fatorial, avaliando-se os efeitos principais do espaçamento de plantio, da posição longitudinal de amostragem e da interação entre ambos. Nos casos em que se constatou efeito significativo, as médias foram comparadas pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.

3. Resultados e discussão

A densidade básica da madeira apresentou comportamento semelhante nos dois espaçamentos avaliados, não sendo observado efeito significativo do espaçamento de plantio ($p > 0,05$). Em contrapartida, verificou-se efeito significativo da posição longitudinal de amostragem sobre essa propriedade ($p < 0,001$), evidenciando a existência de variação da densidade básica ao longo do fuste. A interação entre espaçamento e posição longitudinal não foi significativa, indicando que o comportamento da densidade ao longo da árvore foi semelhante em ambos os tratamentos.

A Figura 1 ilustra a variação longitudinal da densidade básica para os dois espaçamentos avaliados. Observa-se uma redução gradual dos valores da base em direção ao topo da árvore, independentemente do tratamento. A maior redução ocorreu entre o diâmetro à altura do peito (DAP) e 25% da altura comercial, enquanto nas posições superiores a densidade apresentou menor amplitude de variação, tendendo à estabilização próximo ao topo do fuste. Os dois tratamentos apresentaram comportamento praticamente paralelo ao longo do tronco, corroborando a ausência de interação significativa entre os fatores estudados.

Figura 1. Variação longitudinal da densidade básica da madeira de *Pinus spp.* cultivados nos espaçamentos de E1 2,5 × 2,5 m e E2 3,5 × 3,5 m. As barras representam o erro-padrão da média. Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.



A redução da densidade básica no sentido base-topo está de acordo com o padrão fisiológico normalmente reportado para o gênero *Pinus*. Trianoski et al. (2013), avaliando espécies do mesmo gênero em posições longitudinais semelhantes, também verificaram decréscimo da densidade ao longo da altura comercial, atribuindo o fenômeno às transformações anatômicas da madeira durante o crescimento do fuste. Conforme fundamentado por Panshin e De Zeeuw (1980), Zobel e Van Buijtenen (1989) e Tsoumis (1991), esse gradiente resulta de modificações estruturais nos tecidos celulares, expressas pelo menor diâmetro do lúmen e pela maior espessura da parede celular dos traqueídeos na região basal, associados à maior proporção de lenho tardio nessa zona.

Embora o povoamento avaliado aos nove anos de idade seja constituído predominantemente por lenho juvenil, verifica-se que o gradiente longitudinal da densidade básica já se encontra bem estabelecido. Esse comportamento demonstra que a variação ao longo do fuste é intrínseca ao desenvolvimento ontogenético da árvore e se manifesta desde os primeiros anos de crescimento, independentemente do início da formação do lenho adulto (ZOBEL; JETT, 1995). Assim, mesmo em indivíduos jovens, as diferentes seções do tronco exibem diferenciação anatômica marcante, impactando diretamente os valores de densidade básica.

A densidade básica média obtida neste estudo foi de aproximadamente 0,41g/cm³ valor condizente com a faixa citada na literatura para povoamentos jovens de *Pinus* spp., cujas médias oscilam predominantemente entre 0,38 e 0,46 g/cm³ (BALDIN et al., 2014; BENIN et al., 2017). Essa amplitude de variação é influenciada pela idade do povoamento, material genético, qualidade do sítio e intervenções silviculturais. Dessa forma, os resultados confirmam que a matéria-prima avaliada possui características tecnológicas compatíveis com o esperado para a idade do plantio.

A ausência de efeito significativo do espaçamento demonstra que, para as condições avaliadas, a densidade básica foi pouco responsiva à maior disponibilidade de área útil por árvore. Esse resultado indica que as alterações promovidas pela competição espacial exerceram maior impacto sobre variáveis dendrométricas e de incremento volumétrico do que sobre a estrutura anatômica da madeira. Avaliando povoamentos de *Pinus taeda*, Sanquetta et al. (2011) e Eleotério e Bortoletto Júnior (2000) observaram comportamento análogo, reportando alterações expressivas no diâmetro e volume das árvores, porém sem modificações estatisticamente significativas na densidade básica da madeira.

A predominância de lenho juvenil aos nove anos de idade provavelmente atuou como fator atenuante sobre os efeitos do espaçamento. Nessa fase inicial, as propriedades físicas são fortemente reguladas pelo estágio fisiológico e por um rígido controle genético, o que reduz a plasticidade fenotípica da densidade básica frente ao arranjo espacial (ZOBEL; VAN BUIJTENEN, 1989). Ademais, a aplicação de dois desbastes — realizados aos cinco e sete anos de idade em ambos os tratamentos — contribuiu para a homogeneização da competição entre os indivíduos, minimizando eventuais divergências na densidade ao longo do desenvolvimento do povoamento.

O achado de maior relevância prática deste estudo reside na caracterização da variação longitudinal. A redução consistente da densidade no sentido base-topo evidencia a

heterogeneidade da madeira ao longo do fuste, o que traz implicações diretas para a amostragem tecnológica. A prática comum de utilizar exclusivamente amostras retiradas no DAP (1,30 m) tende a superestimar a densidade média da árvore, visto que essa posição amostral apresenta valores superiores aos observados nas posições superiores do tronco (TOMAZELLO FILHO, 1985; PEREIRA et al., 1984).

Portanto, o emprego da densidade básica média ponderada — que integra a densidade de cada seção à sua respectiva participação volumétrica no fuste (VITAL, 1984) — constitui a abordagem mais precisa para caracterizar a madeira do povoamento. Essa metodologia evita distorções decorrentes da amostragem pontual e fornece estimativas mais fiéis da massa de madeira seca efetivamente disponível para o processamento industrial, oferecendo subsídios consistentes para programas de melhoramento genético, inventários tecnológicos e planejamento do manejo silvicultural.

4. Conclusões

A distribuição longitudinal da densidade básica da madeira de *Pinus spp.* apresentou comportamento semelhante nos dois espaçamentos de plantio avaliados, indicando que o espaçamento não exerceu influência significativa sobre essa propriedade em árvores com nove anos de idade. Em contrapartida, a posição longitudinal ao longo do fuste influenciou significativamente a densidade básica, evidenciando redução gradual da base em direção ao topo da árvore.

Os resultados demonstram que a variação longitudinal constitui um dos principais fatores responsáveis pela distribuição da densidade básica ao longo do fuste, ressaltando a importância de considerar diferentes posições de amostragem na caracterização tecnológica da madeira. Nesse contexto, a utilização da densidade básica média ponderada mostrou-se uma abordagem mais representativa para estimar a densidade da árvore como um todo, reduzindo possíveis distorções decorrentes da utilização de uma única posição de amostragem.

Os resultados obtidos contribuem para ampliar o conhecimento sobre a qualidade da madeira de *Pinus spp.* em povoamentos jovens e fornecem informações que podem subsidiar programas de melhoramento genético, manejo florestal e o uso mais eficiente da madeira em diferentes aplicações industriais.

5. Agradecimentos

Os autores agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) pelo apoio financeiro, por meio da concessão de bolsa.

6. Referências bibliográficas

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 11941: Madeira – Determinação da densidade básica.* Rio de Janeiro: ABNT, 2003. 6 p.

ALVARES, C. A. et al. Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift*, Stuttgart, v. 22, n. 6, p. 711–728, 2013.

BALDIN, T. et al. Variação radial e longitudinal da densidade básica da madeira de *Pinus taeda* L. *Ciência Florestal*, Santa Maria, v. 24, n. 4, p. 1025–1033, 2014.

BALLARIN, A. W.; PALMA, H. A. L. Propriedades da madeira juvenil e adulta de espécies florestais. Botucatu: FCA/UNESP, 2003a.

BALLARIN, A. W.; PALMA, H. A. L. Propriedades físicas e mecânicas da madeira de *Pinus taeda* L. em diferentes idades financeiras de corte. *Maderas. Ciencia y tecnología*, Concepción, v. 5, n. 1, p. 37–46, 2003b.

BENIN, C. C. et al. Propriedades físicas da madeira de *Pinus taeda* submetido a diferentes regimes de desbaste. *Pesquisa Florestal Brasileira*, Colombo, v. 37, n. 92, p. 411–418, 2017.

BURGER, L. M.; RICHTER, H. G. *Anatomia da madeira.* São Paulo: Nobel, 1991. 154 p.

ELEOTÉRIO, J. R.; BORTOLETTO JÚNIOR, G. Efeito do espaçamento de plantio na qualidade da madeira de *Pinus*. *Ciência Florestal*, Santa Maria, v. 10, n. 2, p. 89–98, 2000.

FOELKEL, C. A qualidade da madeira dos eucaliptos para a síntese de celulose. *Eucalyptus Online Book*, 2007.

GLASS, S. V.; ZELINKA, S. L. Moisture relations and physical properties of wood. In: FOREST PRODUCTS LABORATORY. *Wood handbook: wood as an engineering material.* Madison: USDA Forest Service, 2010. cap. 4.

IBÁ – INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES. *Relatório anual 2024.* São Paulo: IBÁ, 2024. 96 p.

KOLLMANN, F. F. P.; CÔTÉ JUNIOR, W. A. *Principles of wood science and technology: I. Solid wood.* Berlin: Springer-Verlag, 1968. 592 p.

LIMA, I. L. de et al. Efeito do espaçamento em propriedades físicas e mecânicas da madeira de *Tectona grandis* L. f. *Revista Árvore*, Viçosa, v. 33, n. 6, p. 1131–1139, 2009.

MACHADO, S. A.; FIGUEIREDO FILHO, A. *Dendrometria.* 2. ed. Guarapuava: UNICENTRO, 2014. 316 p.

OLIVEIRA, J. T. S.; TOMAZELLO FILHO, M.; FIEDLER, N. C. *Tecnologia e utilização da madeira de reflorestamento.* Vitória: UFES, 2010. 502 p.

PANSHIN, A. J.; DE ZEEUW, C. *Textbook of wood technology.* 4. ed. New York: McGraw-Hill, 1980. 722 p.

PEREIRA, A. R. et al. Variação da densidade básica da madeira ao longo do fuste de *Eucalyptus grandis*. *Revista Árvore*, Viçosa, v. 8, n. 1, p. 65–75, 1984.

SANQUETTA, C. R. et al. Efeito do espaçamento de plantio e da idade na biomassa e densidade da madeira de *Pinus taeda*. *Ciência Florestal*, Santa Maria, v. 21, n. 3, p. 527–535, 2011.

SANTOS, A. J. dos; SILVA, I. C. da; MACHADO, C. C. *A cadeia produtiva da madeira: aspectos tecnológicos e de mercado.* Viçosa: Ed. UFV, 2008.

SANTOS, J. A. et al. Variação da densidade básica no sentido radial e longitudinal da madeira de *Pinus*. *Revista Brasileira de Ciências Agrárias*, Recife, v. 8, n. 2, p. 288–293, 2013.

SCOLFORO, J. R. S.; MELLO, J. M. *Inventário florestal.* Lavras: UFLA/FAEPE, 2006.

SHIMIZU, J. Y. *Pinus na silvicultura brasileira.* Colombo: Embrapa Florestas, 2008. 223 p.

TAYLOR, F. W. Variation in specific gravity and fiber length of loblolly pine. *Wood and Fiber Science*, Monona, v. 9, n. 1, p. 32–38, 1977.

TOMAZELLO FILHO, M. Variação radial e longitudinal da densidade básica da madeira de *Pinus taeda*. *IPEF*, Piracicaba, n. 29, p. 39–46, 1985.

TRIANOSKI, R. et al. Variação longitudinal da densidade básica da madeira de espécies de *Pinus*. *Floresta*, Curitiba, v. 43, n. 3, p. 503–512, 2013.

TSOUMIS, G. *Science and technology of wood: structure, properties and utilization.* New York: Van Nostrand Reinhold, 1991. 494 p.

VITAL, B. R. *Métodos de determinação da densidade da madeira.* Viçosa: SIF, 1984. 21 p. (Boletim Técnico, 1).

ZOBEL, B. J.; JETT, J. B. *Genetics of wood production.* Berlin: Springer-Verlag, 1995. 337 p.

ZOBEL, B. J.; VAN BUIJTENEN, J. P. *Wood variation: its causes and control.* Berlin: Springer-Verlag, 1989. 363 p.

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Efeito da densificação termomecânica na molhabilidade da superfície da madeira de *Paulownia fortunei*

Nicolas Costa Pucci[1]; Camila Alves Corrêa[1]; Maickele Aparecida Muniz[1];
Marine Alves Antonello [1]; Tarcisio Francisco de Camargo[1];
Alexsandro Bayestorff da Cunha[1]; Ricardo Ritter de Souza Barnasky[1]

[1] Laboratório de Tecnologia da Madeira, Departamento de Engenharia Florestal, Centro de Ciências Agroveterinárais – CAV, Universidade do Estado de Santa Catarina – UDESC, Lages/SC, Brasil.

Resumo: A madeira de *Paulownia fortunei*, de baixa densidade e rápido crescimento, possui potencial para aplicações nobres, mas apresenta limitações em resistência mecânica e elevada higroscopicidade. Este estudo investigou o efeito de diferentes tratamentos de densificação termomecânica (combinações de 150 °C e 170 °C com taxas de compressão de 20% e 40%) sobre a molhabilidade superficial da espécie. Setenta amostras foram analisadas por meio do ângulo de contato com água, utilizando o software *Image J*. Os resultados demonstraram a formação de dois grupos distintos: os tratamentos a 170 °C (20% e 40%) apresentaram os maiores ângulos de contato (44,12° e 46,05°), indicando redução significativa da molhabilidade e aumento da hidrofobicidade superficial. A densificação a 170 °C mostrou-se eficaz para modificar a superfície, agregando valor tecnológico à madeira de *Paulownia fortunei* e ampliando seu potencial de uso em aplicações que exigem maior estabilidade dimensional.

Palavras-chave: Ângulo de contato; Propriedades de superfície; Compactação da madeira.

Effect of thermomechanical densification on the wettability of the surface of *Paulownia fortunei* wood

Abstract: *Paulownia fortunei* wood, characterized by low density and growth, has potential for high-end applications, yet it presents limitations in mechanical strength and high hygroscopicity. This study investigated the effect of different thermomechanical densification treatments (combinations of 150 °C and 170 °C with compression ratios of 20% and 40%) on the surface wettability of this species. Seventy samples were analyzed via water contact angle measurements using ImageJ software. The results revealed the formation of two distinct groups: treatments at 170 °C (20% and 40%) exhibited the highest contact angles (44.12° and 46.05°), indicating a significant reduction in wettability and an increase in surface hydrophobicity. Densification at 170 °C proved effective in modifying the surface, adding technological value to *Paulownia fortunei* wood and broadening its potential for use in applications that demand greater dimensional stability.

Keywords: Contact angle; Surface properties; Wood compactation.

1. Introdução

A madeira de *Paulownia fortunei* tem despertado crescente interesse no setor florestal e industrial devido ao seu rápido crescimento e às suas propriedades tecnológicas diferenciadas. Nativa da China, esta espécie destaca-se como uma das árvores de crescimento mais acelerado

do mundo, com plantios já expressivos em países asiáticos e em expansão para outras regiões. Sua madeira é caracterizada pela baixa densidade, coloração que varia do amarelo-pálido ao vermelho-pálido, textura fina a moderadamente grossa, grã reta e ausência de odor, atributos que, associados à facilidade de secagem e usinagem, conferem amplo potencial de aplicação, sobretudo em produtos sólidos de maior valor agregado. Contudo, a baixa densidade e a reduzida resistência mecânica limitam sua utilização em aplicações estruturais mais exigentes, o que tem motivado a busca por tratamentos de modificação, como a densificação termomecânica, para ampliar seu espectro de uso (Corrêa et al, 2026).

A molhabilidade da superfície da madeira é um parâmetro fundamental para o desempenho em processos industriais que envolvem adesão, colagem e aplicação de revestimentos (Jaić et al., 2010). Este fenômeno é comumente quantificado por meio da medição do ângulo de contato: quanto menor o ângulo de contato, maior a molhabilidade e, consequentemente, maior a afinidade da superfície por líquidos, como adesivos e tintas. A molhabilidade é influenciada por múltiplos fatores, incluindo a rugosidade superficial, a composição química da madeira e as características anatômicas, como o diâmetro das fibras, dos vasos e dos raios (de Souza Mangini, 2025). Estudos comparativos entre diferentes espécies evidenciam considerável variação na molhabilidade: em investigação com lâminas de bétula (*Betula pendula*), amieiro-preto (*Alnus glutinosa*), amieiro-branco (*Alnus incana*) e álamo tremedor (*Populus tremula*), os ângulos de contato variaram de 0,3° (álamo tremedor) a 43,6° (bétula), demonstrando a heterogeneidade deste parâmetro entre diferentes madeiras (Rohumaa et al., 2021).

A densificação termomecânica constitui uma das principais estratégias para a melhoria das propriedades físicas e mecânicas de madeiras de baixa densidade. Este processo combina a aplicação simultânea de calor e pressão, promovendo a compactação do material e alterações químicas na parede celular, com destaque para a degradação parcial das hemiceluloses. Tais modificações resultam em significativas alterações na superfície da madeira, incluindo a redução da rugosidade e a diminuição da molhabilidade, com a consequente formação de superfícies mais hidrofóbicas (Carvalho et al., 2024). Estudos conduzidos em diferentes espécies e condições operacionais demonstram que a molhabilidade da madeira densificada pode ser controlada por meio dos parâmetros do processo. Em trabalho com lâminas de amieiro (*Alnus glutinosa*), faia (*Fagus sylvatica*), bétula (*Betula verrucosa*) e pinho (*Pinus sylvestris*) submetidas à densificação termomecânica de curta duração, verificou-se que a superfície das lâminas densificadas tornou-se mais hidrofóbica, indicando menor molhabilidade, sendo o

efeito da temperatura mais pronunciado do que o da pressão (Behkta et al., 2016). Resultados semelhantes foram observados em madeira de *Gmelina arborea*, onde a densificação com maior temperatura (180 °C) e menor taxa de compactação (20%) produziu a superfície mais hidrofóbica, com ângulos de contato superiores a 90° (Carvalho et al., 2024).

A molhabilidade da madeira assume relevância não apenas sob o aspecto técnico, mas também sob a perspectiva econômica. Em processos industriais que envolvem a colagem e o acabamento de produtos madeireiros, a molhabilidade da superfície influencia diretamente a quantidade e o tipo de adesivo ou revestimento necessários, bem como a qualidade final da ligação adesiva (Behkta et al., 2016). Superfícies com baixa molhabilidade podem exigir a aplicação de adesivos mais específicos ou tratamentos superficiais adicionais, impactando os custos de produção. Por outro lado, madeiras com molhabilidade adequada permitem colagem mais eficiente, com menor consumo de adesivo e maior resistência da junta, fatores que contribuem para a viabilidade econômica do processo produtivo (Rohumaa et al., 2021). Nesse contexto, a compreensão do comportamento da molhabilidade em madeiras modificadas torna-se essencial para a otimização de processos e para a tomada de decisões quanto à seleção de matérias-primas.

Diante do exposto, o presente trabalho tem como objetivo investigar se diferentes tratamentos de densificação termomecânica influenciam ou alteram a molhabilidade da superfície da madeira de *Paulownia fortunei*. A hipótese central é que as condições de densificação exercem efeitos distintos sobre o ângulo de contato e, por conseguinte, sobre a molhabilidade da superfície, podendo torná-la mais hidrofóbica.

2. Material e métodos

A espécie madeireira empregada no estudo foi a *Paulownia fortunei*, proveniente de povoamento florestal com idade variando entre 7 e 11 anos. Para cada condição experimental, foram confeccionados 7 corpos de prova, com dimensões nominais de 25 mm × 25 mm × 410 mm, em obediência aos preceitos estabelecidos pela norma ASTM D143. O preparo desses corpos de prova foi executado com o auxílio de serra circular convencional.

O delineamento experimental abrangeu 4 tratamentos de densificação termomecânica, as quais consistiram na combinação de dois níveis de temperatura (150 °C e 170 °C) com dois níveis de taxa de compressão (20% e 40%). O ciclo de prensagem foi padronizado para todos os tratamentos, com duração fixa de 30 minutos e pressão mantida em 25 kgf/cm² (Carvalho et al., 2020). Finalizada a etapa de prensagem, as amostras foram à estufa a 103 °C por 1 hora e,

posteriormente, acondicionadas em câmara de climatização regulada a 20 °C e 65% de umidade relativa, com o intuito de promover a estabilização do teor de umidade em 12%. Após atingido o equilíbrio, cada corpo de prova foi seccionado longitudinalmente em duas porções menores, de 25 mm × 25 mm × 80 mm, destinadas à realização dos ensaios de molhabilidade, o que resultou em um total de 70 amostras analisadas.

Foram registradas imagens dos ângulos de contado de forma adaptada, com o uso de câmera fotográfica, após dez segundos de aplicação de uma gota de 1ml de água deionizada, que foi depositada na superfície da face que entrou em contato com o prato da prensa. A medição dos ângulos foi realizada por meio do software Image J, conforme a figura 1 (Soares et al., 2011).

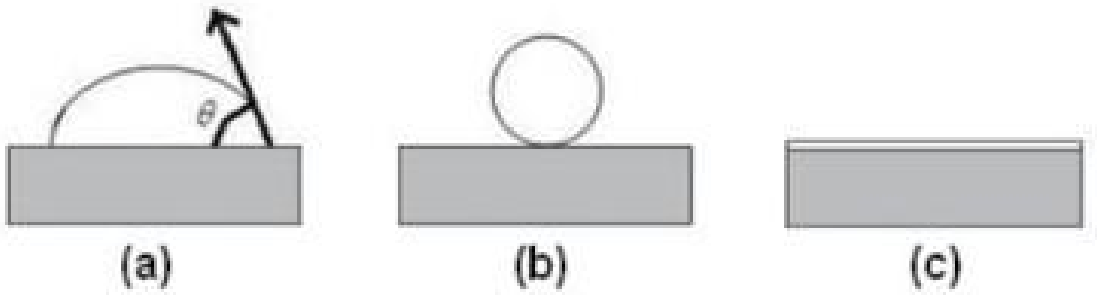


Figura 1 – Espalhamento de gotícula de um líquido sobre superfícies: (a) parcialmente hidrofóbica; (b) totalmente hidrofóbica; e (c) totalmente hidrofílica, sendo θ = ângulo de contato (de Soares et al., 2011).

O experimento foi conduzido sob delineamento inteiramente casualizado (DIC) com 35 repetições. Inicialmente, a normalidade dos resíduos e a homogeneidade das variâncias foram verificadas por meio dos testes de Shapiro-Wilk e Levene, respectivamente. Uma vez atendidos esses pressupostos, procedeu-se à análise de variância (ANOVA) e, na sequência, à comparação das médias pelo teste de Scott-Knott, adotando-se o nível de 95% de confiança.

3. Resultados e discussão

Os resultados médios de ângulo de contato são apresentados graficamente na Figura 2.

Figura 2 – Ângulo de contato médio da madeira de *Palownia fortunei*, em 4 tratamentos de densificação termomecânica. Valores médios seguidos da mesma letra nas barras não diferem significativamente entre si.

Os resultados apresentados na Tabela 1 e na Figura 2 evidenciam a formação de dois grupos estatisticamente distintos: o primeiro, composto pelos Tratamentos 1, 2 e 3, com ângulos de contato variando entre 20,92° à 31,06°; e o segundo, formado pelos Tratamentos 4 e 5, com valores de 44,12° e 46,05°. Essa separação indica que os parâmetros de temperatura e taxa de compressão empregados nos Tratamentos 4 e 5 foram mais efetivos na modificação da molhabilidade da superfície da madeira.

Embora todos os tratamentos avaliados tenham apresentado ângulos de contato inferiores a 90°, o que confirma a manutenção do caráter hidrofílico da madeira de *Paulownia fortunei* mesmo após a densificação, os Tratamentos 4 e 5, com ângulos superiores a 44°, sugerem redução expressiva da molhabilidade em relação aos demais, apontando aumento da hidrofobicidade superficial. Essa tendência está em concordância com os achados de Pertuzzatti et al. (2018), que, ao avaliarem a densificação termomecânica em madeiras de *Pinus elliottii* e *Eucalyptus grandis*, também observaram incremento considerável da hidrofobicidade nas amostras densificadas, com ângulos de contato iniciais superiores a 85°. Essa convergência entre os estudos reforça a eficácia geral do processo de densificação termomecânica na redução da molhabilidade de diferentes espécies madeireiras, independentemente de suas características anatômicas e densidade básica.

Ao comparar os resultados com o estudo específico sobre *Paulownia* conduzido por Candan et al. (2021), verificou-se relação direta quanto à tendência de aumento do ângulo de contato em função da temperatura de tratamento. Os autores relataram aumento expressivo nos valores do ângulo de contato para a madeira de *Paulownia* submetida à compressão térmica, com valores que passaram de 30,63° no grupo controle para 59,98° a 150°C e 82,59° a 170°C. Embora os valores absolutos obtidos no presente estudo (máximo de 46,05° a 170°C/40%) sejam inferiores aos reportados por Candan et al. (2021), a mesma relação de proporcionalidade entre o aumento da temperatura e o incremento da hidrofobicidade foi observada. Essa discrepância numérica pode ser atribuída a diferenças metodológicas, tais como o tempo de prensagem e as condições específicas de medição do ângulo de contato (volume da gota, tempo de estabilização etc.).

4. Conclusões

De modo geral, os resultados obtidos corroboram a literatura especializada ao confirmar que a densificação termomecânica constitui uma técnica eficaz para reduzir a molhabilidade e aumentar a hidrofobicidade da superfície da madeira de *Paulownia fortunei*. O tratamento a

170°C destacou-se como o mais eficiente, promovendo um acréscimo significativo no ângulo de contato, efeito que está diretamente relacionado à degradação térmica de componentes hidrofílicos, como as hemiceluloses, e à compactação superficial, que reduz a rugosidade e promove o fechamento de poros e microfissuras. Essa melhoria é particularmente relevante para a *Paulownia fortunei*, espécie de rápido crescimento e baixa densidade, cuja principal limitação para aplicações nobres reside justamente na baixa resistência mecânica e na elevada higroscopicidade. Assim, o incremento da hidrofobicidade observado nos tratamentos a 170°C agrega valor tecnológico a essa espécie, ampliando seu leque de aplicações para usos que exigem maior estabilidade dimensional e durabilidade, como pisos, decks e móveis para áreas externas, e confirmando o potencial da densificação termomecânica como estratégia para a valorização de madeiras de baixa densidade.

5. Agradecimentos

Os autores agradecem a Universidade do Estado de Santa Catarina (UDESC), a Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação de Santa Catarina (FAPESC), ao Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Cientifica (PROBIC) e a todos os colegas do Laboratório de Tecnologia da Madeira.

6. Referências bibliográficas

Corrêa, C. A., da Cunha, A. B., da Silva Santos, S., de Camargo, T. F., Rodrigues, T. M., de Oliveira Souza, G., ... & Brand, M. A. (2026). Technological properties and uses of wood from Paulownia fortunei and its hybrids: a systematic review. European Journal of Wood and Wood Products, 84(3), 80.

Jaić, M., Palija, T., & Dobić, J. (2010). The influence of sanding system on wetting of Paulownia siebold et zucc.

de Souza Mangini, T., Nardini, C., Eloy, E., Caron, B. O., Trevisan, R., Monteiro, T. C., ... & Rodrigues Roubuste, R. (2025). Wood anatomy and its implications for the wettability of four species grown in an agroforestry system in southern Brazil. Wood Material Science & Engineering, 1-12.

Rohumaa, A., Kallakas, H., Mäetalu, M., Savest, N., & Kers, J. (2021). The effect of surface properties on bond strength of birch, black alder, grey alder and aspen veneers. International Journal of Adhesion and Adhesives, 110, 102945.

Carvalho, D. E., Rocha, M. P. D., Klitzke, R. J., & Cademartori, P. H. G. D. (2024). Surface changes in wood submitted to thermomechanical densification. Maderas. Ciencia y tecnología, 26.

Bekhta, P., & Krystofiak, T. (2016). The influence of short-term thermo-mechanical densification on the surface wettability of wood veneers. Maderas. Ciencia y tecnología, 18(1), 79-90.

Carvalho, D. E., Rocha, M. P. D., Klitzke, R. J., & Cademartori, P. H. G. D. (2020). Caracterização tecnológica e densificação termomecânica da madeira de Gmelina arborea Roxb.

Soares, A. C., Oliveira, R. M. D., Brisolari, A., Sales, A., & Gonçalves, D. (2011). Molhabilidade em amostras de Araucaria angustifolia e Pinus elliottii após tratamento térmico e envelhecimento.

Pertuzzatti, A., Missio, A. L., de Cademartori, P. H., Santini, E. J., Haselein, C. R., Berger, C., ... & Tondi, G. (2018). Effect of process parameters in the thermomechanical densification of Pinus elliottii and Eucalyptus grandis fast-growing wood. BioResources, 13(1), 1576-1590.

Candan, Z., Gonultas, O., Gorgun, H. V., & Unsal, O. (2021). Examining parameters of surface quality performance of paulownia wood materials modified by thermal compression technique. Drvna industrija, 72(3), 231-236.

ASTM International. (1994). Standard Test Methods for Small Clear Specimens of Timber (ASTM D143-94). ASTM International. https://www.astm.org/d0143-94.html

American Psychological Association. (2020). Publication manual of the American psychological association 2020. American Psychological Association.

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Efeito da densificação termomecânica nos parâmetros colorimétricos da madeira de *Paulownia fortunei*

Nicolas Costa Pucci[1]; Camila Alves Corrêa[1]; Maickele Aparecida Muniz[1];
Marine Alves Antonello[1]; Tarcisio Francisco de Camargo[1];
Alexsandro Bayestorff da Cunha[1]; Ricardo Ritter de Souza Barnasky[1]

[1] Laboratório de Tecnologia da Madeira, Departamento de Engenharia Florestal, Centro de Ciências Agroveterinárais – CAV, Universidade do Estado de Santa Catarina – UDESC, Lages/SC, Brasil.

Resumo: Este estudo avaliou os efeitos de diferentes tratamentos de densificação termomecânica sobre os parâmetros colorimétricos da madeira de *Paulownia fortunei*. Foram aplicados quatro tratamentos, combinando temperaturas (150 °C e 170 °C) e taxas de compressão (20% e 40%). As amostras foram avaliadas no sistema CIELAB, obtendo-se os parâmetros L* (luminosidade), a* (eixo vermelho-verde), b* (eixo amarelo-azul) e C* (saturação). Os resultados indicaram que a luminosidade (L) permaneceu estatisticamente estável entre 62 e 65 para todos os tratamentos, contrariando a tendência de escurecimento observada em outras espécies na literatura. Por outro lado, os tratamentos promoveram aumento significativo nos eixos a e b, com intensificação das tonalidades avermelhadas e amareladas, especialmente nos tratamentos com maior temperatura (170 °C). A saturação (C) foi mais elevada nos tratamentos 3 (150 °C/40%) e 5 (170 °C/40%), indicando cores mais vivas e puras.

Palavras-chave: Saturação**;** *Palownia spp.***;** Prensagem de madeira.

Effect of thermomechanical densification on the colorimetric parameters of *Paulownia fortunei* wood

Abstract: This study evaluated the effects of different thermomechanical densification treatments on the colorimetric parameters of *Paulownia fortunei* wood. Four treatments were applied, combining temperatures (150 °C and 170 °C) and compression ratios (20% and 40%). The samples were evaluated using the CIELAB system, obtaining the parameters L* (lightness), a* (red-green axis), b* (yellow-blue axis), and C* (saturation). The results indicated that lightness (L) remained statistically stable between 62 and 65 for all treatments, contradicting the darkening trend observed in other species in the literature. On the other hand, the treatments promoted a significant increase in the a and b* axes, with intensification of reddish and yellowish hues, especially in treatments with higher temperatures (170 °C). Saturation (C*) was higher in treatments 3 (150 °C/40%) and 5 (170 °C/40%), indicating more vivid and pure colors.

Keywords: Saturation; *Palownia spp.*; Wood pressing.

1. Introdução

A cor da madeira é um dos atributos estéticos mais determinantes para sua valorização comercial, influenciando diretamente a preferência do consumidor e preço final do produto. Essa relação é tão marcante que, no comércio de espécies valiosas, como as do gênero

Dalbergia, a percepção subjetiva da cor é utilizada para distinguir tipos comerciais com preços significativamente distintos, sendo o "rosewood" (com coloração que varia do roxo ao vermelho-vinho) tipicamente mais caro que o "palisander" (de tom amarelado a alaranjado) (Razafimahatratra et al., 2024). Além disso, a possibilidade de modificar a coloração de madeiras de menor valor comercial por meio de tratamentos térmicos, tornando-as mais escuras e atrativas, representa uma estratégia eficaz para aumentar seu valor econômico e ampliar suas aplicações (Freitas et al., 2016).

A densificação termomecânica da madeira é um processo que combina calor e pressão para modificar sua estrutura e aprimorar propriedades físicas, estando diretamente associada a alterações significativas em sua colorimetria. A temperatura de compressão é o fator de processo mais influente nessas mudanças, sendo seu efeito mais pronunciado do que o da própria taxa de compressão (Bekhta et al., 2014). O processo de densificação, especialmente em temperaturas mais elevadas, resulta em um escurecimento geral da madeira, caracterizado pela redução da luminosidade (L) e da tonalidade amarela (b), acompanhado por um aumento do pigmento vermelho (a).

O método de medição colorimétrica mais utilizado é o sistema CIELAB, descrito em 1976 por pesquisadores do Commission Internationale de L'Eclairage. Esse sistema se consolidou por apresentar maior precisão nos resultados das medições da cor, eliminando o caráter subjetivo ao explicar essa propriedade matematicamente em luminosidade ou brilho, tonalidade ou matiz e saturação ou cromaticidade, permitindo calcular diferenças e variações na coloração (Júnior; Lengowski, 2018).

A madeira de *Paulownia* é descrita na literatura tradicional como leve, macia e de coloração amarelo-claro. De modo geral, os estudos mostram que a madeira de *P. fortunei* e de seus híbridos apresenta coloração predominantemente clara, com altos valores de (L) ou de brancura, indicando alta luminosidade, o que pode ser considerado uma vantagem para usos decorativos (Corrêa et al., 2026).

O objetivo deste trabalho foi avaliar como os diferentes tratamentos de densificação termomecânica afetaram os parâmetros colorimétricos na madeira de *Paulownia fortunei*, comparando com a literatura.

2. Material e métodos

A espécie utilizada foi a *Paulownia fortunei*, oriunda de uma floresta de idade entre 7 e 11 anos. Foram feitos 7 corpos de prova para cada tratamento, com dimensões de 25mm x

25mm x 410mm, seguindo as normas da ASTM D143. A elaboração dos corpos de prova foi realizada com o uso de uma serra circular simples, de modo que ficassem com lados lisos e uniformes.

Foram realizados 4 tratamentos de densificação termomecânica, alterando a temperatura em 150°C e 170°C, e a taxa de compressão em 20% e 40%. O tempo de prensagem se manteve igual para todos os tratamentos em 30 minutos, com uma pressão constante de 25kgf/cm² (Carvalho et al., 2020). Após a prensagem, as amostras foram a estufa a 103°C por 1 hora e posteriormente ficaram em uma câmara de climatização a 20°C e 65% de umidade a fim de estabilizar o teor de umidade em 12%. Depois de estabilizarem, cada corpo de prova de 25mm x 25mm x 410mm foi cortado em duas amostras menores de 25mm x 25mm x 80mm para a realização das análises de colorimetria, totalizando 70 corpos de prova por amostra.

A medição colorimétrica foi realizada utilizado um colorímetro Konica Minolta (modelo CR-400) equipado com fonte de iluminação D65, ângulo de observação de 10° e sensor de abertura de 8 mm, de acordo com o padrão CIELAB, e foram coletados 3 pontos na face dos corpos de prova que ficaram em contato com os pratos da prensa, totalizando 210 pontos, onde foram coletados dados dos parâmetros luminosidade (L), eixo vermelho-verde (a), eixo amarelo-azul (b) e saturação (C). Os pontos foram coletados de forma aleatória.

O delineamento experimental foi inteiramente casualizado (DIC) e os dados foram submetidos aos testes estatísticos de Shapiro-Wilk e Levene para verificar a normalidade e homogeneidade das variâncias, que quando atendidos os pressupostos, prosseguiu-se com o teste de ANOVA e o teste de médias de Scott-Knott a 95% de probabilidade.

3. Resultados e discussão

Na Tabela 1 são apresentados os valores médios dos parâmetros colorimétricos analisados.

Tabela 1 – Valores médios dos parâmetros colorimétricos da madeira sob tratamentos de densificação termomecânica

Tratamento	Parâmetros Colorimétricos			
	L	**a**	**b**	**C**
1 (Controle)	62,90 a	8,28 b	16,48 d	18,32 c
2 (150ºC 20%)	64,94 a	9,52 a	20,31 b	22,56 a
3 (150ºC 40%)	64,76 a	10,08 a	21,58 a	23,99 a
4 (170ºC 20%)	62,17 a	9,74 a	18,40 c	20,97 b
5 (170ºC 40%)	63,04 a	10,24 a	19,88 c	22,91 a

L: luminosidade, a: eixo vermelho-verde, b: eixo amarelo-azul, C: saturação. Médias seguidas da mesma letra na coluna não diferem entre si, pelo teste de Scott-Knott.

Nos dados apresentados na Tabela 1 observa-se que os diferentes tratamentos de densificação termomecânica não alteraram a luminosidade (L), com os valores se mantendo entre 62 e 65. No eixo vermelho-verde (a) os Tratamentos 2, 3, 4 e 5 apresentaram diferença do Tratamento 1 (controle), o que representa uma proximidade maior da coloração verde. No eixo amarelo-azul (b) o Tratamento 3 apresentou maior proximidade do amarelo (21,58), enquanto os Tratamentos 4 e 5 formaram um grupo intermediário (18,40 e 19,88), com um amarelo moderado e equivalente. Na saturação (C), os tratamentos 2, 3 e 5 apresentam cores mais vivas (22,56, 23,99 e 22,91) quando comparados ao Tratamento 1 (controle), que apresentou cores mais apagadas (18,32).

De forma geral, o Tratamento 1 (controle) apresenta uma coloração mais pálida, com baixa saturação, sendo mais acinzentada em relação aos outros. O Tratamento 4 mostra um aumento na saturação, mas ainda demonstra uma coloração menos explosiva que os Tratamentos 2 e 5. O Tratamento 3 demonstra a coloração mais pura e forte em relação aos outros.

Na literatura, quando realizado a densificação termomecânica, a luminosidade (L) tende a diminuir conforme é aumentado a temperatura e taxa de compressão do processo, porém nesse estudo observa-se que a luminosidade se mantém constante em uma faixa que não difere estatisticamente entre si. Estudos com *Gmelina arborea* e diferentes espécies de madeira também observaram alterações significativas nos eixos verde-vermelho (a) e azul-amarelo (b) após a densificação. Em alguns casos, notou-se um aumento no pigmento vermelho (a) e redução do amarelo (b) (Bekhta et al., 2014; Dos Santos Silva, 2015).

Em comparação com a cor natural de diferentes espécies, a madeira de Caúna apresenta valores no eixo vermelho-verde (a) muito baixos (1,44), indicando uma coloração mais neutra (Dos Santos Silva, 2015). Todos os tratamentos realizados na *P. fortunei*, com exceção do controle, apresentam valores mais próximos do verde, sugerindo que a densificação pode ter deslocado a cor para tons menos avermelhados. Já no eixo amarelo-azul (b) e saturação (C), a madeira de Grápia apresenta valores altos (27,87 e 29,19), indicando uma cor amarela forte e saturada (Dos Santos Silva, 2015). Os tratamentos, em especial o 3, mostra valores em (C) de 23,99, demonstrando que a densificação pode resultar em madeiras com saturação comparável a espécies naturalmente vibrantes.

Os valores de luminosidade (L), eixo vermelho-verde (a) e eixo amarelo-azul (b) foram transformados para o sistema Vermelho-Verde-Azul (RGB), a fim de facilitar a visualização das colorações conforme cada tratamento (Figura 1).

Figura 1 – Amostras de cores para os diferentes tratamentos de densificação termomecânica em, onde os números na coluna “Amostra de Cor” representam as coordenadas em RGB das respectivas cores.

Tratamento	**Amostra de Cor (RGB)**
1 (Controle)	178, 146, 123
2 (150ºC 20%)	187, 151, 122
3 (150ºC 40%)	188, 150, 119
4 (170ºC 20%)	179, 143, 118
5 (170ºC 40%)	183, 145, 118

4. Conclusões

Os diferentes tratamentos de densificação termomecânica aplicados à madeira de *Paulownia fortunei* não promoveram alterações significativas nos valores de luminosidade (L), que se mantiveram estatisticamente estáveis entre 62 e 65, contrariando parcialmente o comportamento observado em outras espécies na literatura.

No entanto, os tratamentos influenciaram de forma significativa os demais parâmetros colorimétricos. Observou-se um aumento expressivo no eixo vermelho-verde (a) e no eixo amarelo-azul (b) em relação ao controle, indicando uma intensificação das tonalidades avermelhadas e amareladas. Esse efeito foi mais pronunciado nos tratamentos com maior temperatura (170°C), independentemente da taxa de compressão, sugerindo que a temperatura exerce maior influência sobre a alteração cromática do que a própria taxa de compressão.

A saturação (C) também foi afetada, com os tratamentos a 150 °C e 170 °C a 40% (tratamentos 3 e 5) apresentando as cores mais vivas e intensas, enquanto o controle e o tratamento 4 (170 °C a 20%) exibiram menor saturação, sugerindo que combinações de temperatura moderada a alta com maior taxa de compressão resultam em colorações mais puras e saturadas.

5. Agradecimentos

Os autores agradecem a Universidade do Estado de Santa Catarina (UDESC), a Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação de Santa Catarina (FAPESC), ao Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Cientifica (PROBIC) e a todos os colegas do Laboratório de Tecnologia da Madeira.

6. Referências bibliográficas

Corrêa, C. A., da Cunha, A. B., da Silva Santos, S., de Camargo, T. F., Rodrigues, T. M., de Oliveira Souza, G., ... & Brand, M. A. (2026). Technological properties and uses of wood from Paulownia fortunei and its hybrids: a systematic review. European Journal of Wood and Wood Products, 84(3), 80.

Júnior, E. A. B., & Lengowski, E. C. (2018). Colorimetria aplicada à ciência e tecnologia da madeira. Pesquisa Florestal Brasileira, 38.

Bekhta, P., Proszyk, S., & Krystofiak, T. (2014). Colour in short-term thermo-mechanically densified veneer of various wood species. European Journal of Wood and Wood Products, 72(6), 785-797.

Carvalho, D. E., Rocha, M. P. D., Klitzke, R. J., & Cademartori, P. H. G. D. (2024). Surface changes in wood submitted to thermomechanical densification. Maderas. Ciencia y tecnología, 26.

dos Santos Silva, E., Stangerlin, D. M., Gatto, D. A., Calegari, L., & Pariz, E. (2015). Colorimetria da madeira de oito espécies nativas do estado do Rio Grande do Sul, Brasil. Revista Ciência da Madeira (Brazilian Journal of Wood Science), 6(1), 10-12953.

Freitas, A. S., Gonçalez, J. C., & Del Menezzi, C. H. (2016). Tratamento termomecânico e seus efeitos nas propriedades da Simarouba amara (Aubl.). Floresta e Ambiente, 23(4), 565-572.

Razafimahatratra, A. R., Chaix, G., Belloncle, C., & Ramananantoandro, T. (2024, August). Extractives and phenol contents of Malagasy precious wood species belonging to the Dalbergia genus: attempt to identify criteria for distinguishing rosewood from palisander. In International Conference on Tropical Wood (ICTW) (pp. 30-31). University of Antananarivo.

ASTM International. (1994). Standard Test Methods for Small Clear Specimens of Timber (ASTM D143-94). ASTM International. https://www.astm.org/d0143-94.html

American Psychological Association. (2020). Publication manual of the American psychological association 2020. American Psychological Association.

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Efeito da poliploidia sobre a densidade básica e a composição química da madeira de *Eucalyptus urophylla*

Wesley Munhoz Ribeiro[1]; Maurício Alves Ramos[1]; Osmarino Pires dos Santos[2]; Laíse Vergara Nörnberg[2]; Katherine Rodrigues Breder[3]; Jordão Cabral Moulin[3]; Gabriel Valim Cardoso[1]

[1] Universidade Federal de Pelotas
[2] CMPC Celulose Riograndense
[3] Universidade Federal do Espírito Santo

Resumo: A poliploidia tem sido utilizada como estratégia no melhoramento genético florestal por promover alterações morfológicas, anatômicas e fisiológicas que podem influenciar a qualidade tecnológica da madeira. Nesse contexto, o objetivo deste estudo foi avaliar a influência da poliploidia na densidade básica e na composição química da madeira de *Eucalyptus urophylla*, visando à caracterização de atributos tecnológicos relevantes para a produção de celulose kraft. Foram avaliados um clone diploide e seis clones poliploides, com oito anos de idade. Determinaram-se a densidade básica e os teores de extrativos totais, lignina total e cinzas, sendo os resultados submetidos à análise de variância e ao teste de Tukey (95% de confiança). Os clones poliploides apresentaram, de modo geral, menor densidade básica e maiores teores de extrativos totais em relação ao diploide. Para a lignina total, não foram observadas diferenças consistentes entre os materiais avaliados. Quanto ao teor de cinzas, alguns clones poliploides apresentaram valores superiores ao clone diploide. Os resultados indicam que a poliploidia promove alterações em importantes propriedades tecnológicas da madeira de *Eucalyptus urophylla*, especialmente na densidade básica e nos teores de extrativos totais, podendo influenciar sua utilização como matéria-prima para a produção de celulose kraft.

Palavras-chave: Celulose kraft; Extrativos; Lignina.

Effect of Polyploidy on Basic Density and Chemical Composition of *Eucalyptus urophylla* Wood

Abstract: Polyploidy has been used as a strategy in forest tree breeding because it promotes morphological, anatomical, and physiological changes that may influence wood technological properties. In this context, this study aimed to evaluate the influence of polyploidy on the basic density and chemical composition of *Eucalyptus urophylla* wood, seeking to characterize technological attributes relevant to kraft pulp production. One diploid clone and six polyploid clones, all eight years old, were evaluated. Basic density and the contents of total extractives, total lignin, and ash were determined. The results were subjected to analysis of variance (ANOVA) followed by Tukey's test at a 95% confidence level. In general, the polyploid clones exhibited lower basic density and higher total extractives content than the diploid clone. No consistent differences were observed for total lignin among the evaluated materials. Regarding ash content, some polyploid clones showed higher values than the diploid clone. The results indicate that polyploidy alters important technological properties of *Eucalyptus urophylla* wood, particularly basic density and total extractives content, and may influence its suitability as a raw material for kraft pulp production.

Keywords: Kraft pulp; Extractives; Lignin.

1. Introdução

Segundo o IBÁ (2025), o Brasil possuía, em 2024, 10,52 milhões de hectares de florestas plantadas, dos quais 8,1 milhões correspondiam a plantios de eucalipto, consolidando essa espécie como a principal cultura florestal do país. Esse cenário é impulsionado principalmente pelo setor de celulose e papel, responsável por aproximadamente 38% da área plantada. No mesmo ano, o Brasil produziu 25,5 milhões de toneladas de celulose, das quais 18,6 milhões foram destinadas à exportação, mantendo o país como líder mundial em exportações e segundo maior produtor global de celulose.

Introduzido no Brasil no final do século XIX, o gênero *Eucalyptus* tem origem australiana e apresentou ampla adaptação às condições ambientais encontradas no país, favorecendo sua rápida expansão e consolidação no setor florestal brasileiro (Vechi; Magalhães Júnior, 2018). Entre as espécies cultivadas no país, *Eucalyptus urophylla* destaca-se entre as espécies de eucalipto cultivadas no Brasil devido à sua elevada produtividade, potencial de expansão em novas fronteiras florestais e ampla aplicabilidade industrial, sendo utilizado na produção de celulose e papel, chapas de madeira, produtos serrados e carvão vegetal (Scanavaca Junior & Garcia, 2003).

O melhoramento genético florestal tem desempenhado papel fundamental no aumento da produtividade e da qualidade da matéria-prima utilizada pela indústria de base florestal. Entre as estratégias empregadas nesse contexto, destaca-se a poliploidia, caracterizada pela presença de mais de dois conjuntos cromossômicos completos em um mesmo núcleo celular (Wood *et al.*, 2009). A obtenção de poliploides artificiais pode ser realizada por meio da aplicação de agentes antimitóticos, como a colchicina, que promovem a duplicação cromossômica e a geração de nova variabilidade genética, podendo resultar em alterações morfológicas, anatômicas e fisiológicas de interesse para programas de melhoramento (Castillo *et al.*, 2020).

Estudos realizados com clones poliploides de *Eucalyptus grandis* × *Eucalyptus urophylla* têm demonstrado o potencial dessa técnica para aplicações no setor de celulose e papel. Da Silva Souza *et al.* (2021) observaram que materiais poliploides apresentam menor densidade básica, além de fibras mais longas e com paredes mais espessas em comparação aos diploides. As maiores dimensões e espessura de parede das fibras favorecem sua acomodação na formação da folha, contribuindo para a melhoria das propriedades do papel. De forma

semelhante, Muniz *et al.* (2023) verificaram valores de densidade básica e teor de lignina semelhantes entre clones tetraploides e diploides, além de elevada homogeneidade morfológica nos tetraploides, característica considerada favorável ao controle industrial das propriedades da polpa e do papel.

A densidade básica é uma das principais propriedades tecnológicas da madeira, influenciando diretamente suas características físicas e o desempenho em diferentes processos industriais, sendo amplamente utilizada como parâmetro para sua classificação (Moreschi, 2005). Essa propriedade resulta da interação entre diferentes características anatômicas da madeira, como as dimensões e espessura de parede das fibras, a proporção de vasos e parênquima e a distribuição dos elementos celulares (Foelkel; Brasil; Barrichelo, 1971). Na produção de celulose, a densidade básica exerce influência sobre a eficiência do processo, uma vez que madeiras menos densas podem proporcionar vantagens durante o cozimento, mas também apresentam limitações, como maior consumo específico de madeira e menor produtividade industrial (Queiroz *et al.*, 2004).

Além da densidade básica, a composição química da madeira constitui um dos principais parâmetros utilizados na avaliação de sua qualidade tecnológica, influenciando diretamente o desempenho em processos industriais como a produção de celulose (Gomide; Fantuzzi Neto; Regazzi, 2010). Entre os principais constituintes avaliados destacam-se a lignina, os extrativos e as cinzas. Elevados teores de lignina estão associados à maior demanda de reagentes químicos durante a deslignificação kraft e à redução do rendimento do processo (Cardoso *et al.*, 2011). Os extrativos podem interferir na eficiência da deslignificação devido ao consumo de reagentes, enquanto altos teores de cinzas podem ocasionar incrustações, corrosão e outros problemas operacionais nos equipamentos industriais (Barrichelo; Brito, 1985; Cardoso *et al.*, 2001; Zanuncio *et al.*, 2013).

Diante do exposto, o objetivo deste estudo foi avaliar a influência da poliploidia na densidade básica e na composição química da madeira de *Eucalyptus urophylla*, visando à caracterização de atributos tecnológicos relevantes para sua utilização na produção de celulose kraft.

2. Material e métodos

O material utilizado neste estudo é proveniente de um plantio experimental pertencente à CMPC Celulose Riograndense, localizado no município de Eldorado do Sul, Rio Grande do

Sul (30°14’69.3”S; 51°54’53.3”W). Foram avaliados seis clones poliploides e um clone diploide (testemunha) de *Eucalyptus urophylla*, todos com oito anos de idade.

Os clones poliploides foram obtidos a partir do tratamento de brotações in vitro de um clone diploide com o agente antimitótico colchicina. Após o tratamento, os brotos foram clonados e submetidos à análise por citometria de fluxo para confirmação da ploidia. Posteriormente, o material foi destinado à formação de minijardins clonais para a produção de mudas por estaquia. Todos os clones poliploides avaliados neste estudo são tetraploides.

Foram amostradas 16 árvores no total, sendo duas pertencentes ao clone diploide e 14 aos clones poliploides. Os tratamentos P1 e P2 foram representados por três árvores cada, P3 e P5 por uma árvore cada, P4 por duas árvores e P6 por quatro árvores.

A densidade básica da madeira foi determinada pelo método da balança hidrostática, conforme a norma SCAN-CM 43:95 (1995). Foram utilizadas cunhas retiradas dos discos coletados nas posições de 0%, DAP, 33%, 66% e 100% da altura comercial das árvores. As amostras foram saturadas em água sob pressão e, posteriormente, tiveram seus volumes determinados pelo método de empuxo. Após secagem em estufa a 105 ± 3 °C até massa constante, a densidade básica foi calculada pela razão entre a massa seca e o volume saturado da madeira.

A análises de composição química foram realizadas no Laboratório de Qualidade da Madeira da CMPC Celulose Riograndense. As amostras foram preparadas conforme a norma TAPPI T 257 (2012), utilizando-se a fração da serragem que passou pela peneira de 40 mesh e ficou retida na peneira de 60 mesh.

Os teores de extrativos totais foram determinados por extrações sequenciais em acetona e água quente, de acordo com as normas TAPPI T 204 (2007), TAPPI T 207 (2008) e TAPPI T 264 (2007). O teor de cinzas foi determinado conforme a norma TAPPI T 211 (2011).

O teor de lignina total foi obtido pelo somatório das frações insolúvel e solúvel, determinadas segundo a norma TAPPI T 222 (2011). A lignina insolúvel foi quantificada após hidrólise ácida da amostra livre de extrativos, enquanto a lignina solúvel foi determinada por espectrofotometria UV-Vis a 205 nm.

Os resultados foram submetidos à análise de variância (ANOVA) e as médias comparadas pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro.

3. Resultados e discussão

A Tabela 1 apresenta os valores de densidade básica e teores de extrativos em água quente, acetona e total da madeira dos clones diploide e poliploides de *Eucalyptus urophylla* avaliados.

Tabela 1 – Densidade básica e extrativos dos clones diploide e poliploides de *E. urophylla.*

Clone	Densidade básica (Kg/m³)	Extrativos A.Q. (%)	Extrativos Acetona (%)	Extrativos Totais (%)
Diploide	459 a	1,84 ± 0,05 a	1,77 ± 0,03 a	3,61 ± 0,08 a
P1	403 bc	2,22 ± 0,25 bc	2,64 ± 0,18 c	4,86 ± 0,29 cd
P2	409 b	2,37 ± 0,27 cd	2,75 ± 0,42 c	5,12 ± 0,64 d
P3	447 a	1,86 ± 0,13 a	2,61 ± 0,04 c	4,47 ± 0,09 bc
P4	396 bc	2,59 ± 0,15 d	3,23 ± 0,12 d	5,81 ± 0,04 e
P5	379 d	1,94 ± 0,04 ab	2,45 ± 0,03 c	4,39 ± 0,01 bc
P6	390 cd	2,24 ± 0,17 bc	2,06 ± 0,13 b	4,3 ± 0,24 b

Em que: Valores apresentados como média ± desvio padrão. Médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si de acordo com o teste de Tukey, com $p < 0,05$.

Em relação a densidade básica, de modo geral, os clones poliploides apresentaram menores valores de densidade básica em relação ao clone diploide, sendo observada diferença estatística para P1, P2, P4, P5 e P6. Os valores dos poliploides variaram entre 379 e 447 kg/m³, com P5 apresentando a menor densidade básica.

A tendência de redução da densidade básica em materiais poliploides também foi observada por Muniz *et al.* (2023), embora esses autores tenham encontrado valores absolutos superiores aos obtidos no presente estudo e maior homogeneidade entre os clones poliploides. A menor densidade observada na maioria dos poliploides pode estar relacionada ao crescimento reduzido apresentado por esses materiais em campo, uma vez que alterações no crescimento influenciam a espessura da parede das fibras e, consequentemente, a densidade da madeira (Vidaurre, 2022).

Para os extrativos em acetona, todos os clones poliploides apresentaram teores superiores ao clone diploide, com diferença estatística. O clone P4 apresentou o maior teor entre os materiais avaliados, diferindo dos demais clones. Para os extrativos em água quente, os clones P1, P2, P4 e P6 apresentaram teores superiores ao diploide, enquanto P3 não diferiu estatisticamente da testemunha e P5 apresentou comportamento intermediário. Assim como

observado para os extrativos em acetona, o clone P4 apresentou o maior teor entre os materiais avaliados.

Os clones poliploides apresentaram em média teores de extrativos totais 33,7% superiores ao clone diploide, com todos diferindo estatisticamente da testemunha. Entre os poliploides, P4 apresentou o maior teor de extrativos totais, diferindo dos demais materiais. Por outro lado, P6 apresentou o menor teor entre os clones poliploides, não diferindo estatisticamente de P3 e P5.

Esse comportamento difere do observado por Muniz *et al.* (2023), que verificaram menores teores de extrativos em clones poliploides de *Eucalyptus grandis* × *Eucalyptus urophylla* quando comparados aos diploides. Para a produção de celulose, elevados teores de extrativos são considerados desfavoráveis, pois podem aumentar o consumo de reagentes químicos durante o cozimento e favorecer a formação de pitch, reduzindo a eficiência do processo industrial (Gomide *et al.*, 2005).

A Tabela 2 apresenta os teores de lignina insolúvel, lignina solúvel, total e teor de cinzas dos clones diploide e poliploides avaliados.

Tabela 2 – Teores de cinzas lignina solúvel, insolúvel, total e cinzas dos clones diploide e poliploides de *E. urophylla.*

Clone	Lignina insolúvel (%)	Lignina solúvel (%)	Lignina total (%)	Cinzas (%)
Diploide	25,73 ± 0,20 bc	3,38 ± 0,19 abc	29,09 ± 0,09 ab	0,31 ± 0,02 a
P1	25,73 ± 0,46 bc	3,19 ± 0,21 a	28,92 ± 0,26 abc	0,35 ± 0,02 ab
P2	24,95 ± 1,25 ab	3,38 ± 0,26 abc	28,33 ± 1,30 bc	0,4 ± 0,05 bc
P3	25,18 ± 0,003 abc	3,55 ± 0,05 ab	28,72 ± 0,05 abc	0,33 ± 0,02 ab
P4	26,17 ± 0,32 c	3,19 ± 0,10 a	29,36 ± 0,41 a	0,35 ± 0,03 ab
P5	24,17 ± 0,003 a	3,69 ± 0,04 c	27,85 ± 0,04 c	0,37 ± 0,02 abc
P6	25,03 ± 0,59 ab	3,32 ± 0,17 ab	28,35 ± 0,45 bc	0,43 ± 0,06 c

Em que: Valores apresentados como média ± desvio padrão. Médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si de acordo com o teste de Tukey, com $p < 0,05$.

Para a lignina insolúvel, foram observadas diferenças estatísticas entre alguns materiais. O clone P4 apresentou o maior teor, diferindo estatisticamente de P2, P5 e P6. Apesar dessas diferenças, o clone diploide não difere da maior parte dos clones poliploides, evidenciando

ampla sobreposição entre os materiais avaliados e indicando ausência de uma tendência consistente de variação da lignina insolúvel em função da poliploidia.

Para a lignina solúvel também foram observadas diferenças estatísticas entre alguns clones. O maior teor foi registrado em P5, que difere de P1 e P4, os quais apresentaram os menores valores. Assim como observado para a fração insolúvel, o clone diploide apresentou comportamento intermediário, não diferindo estatisticamente da maioria dos clones poliploides. Dessa forma, os resultados indicam que a poliploidia não promoveu alterações consistentes nos teores de lignina solúvel dos materiais avaliados.

Em relação à lignina total, os clones poliploides apresentam valores semelhantes ao clone diploide. Apenas P5 possui teor de lignina total inferior ao da testemunha, diferindo estatisticamente do clone diploide. Entre os poliploides, P4 apresentou o maior teor de lignina total, sem diferir estatisticamente do diploide.

A ausência de uma tendência consistente de variação nos teores de lignina total em função da poliploidia também foi observada por Muniz *et al.* (2023), que encontraram valores semelhantes entre clones diploides e poliploides. Esses resultados indicam que a duplicação cromossômica exerceu pouca influência sobre esse parâmetro da madeira.

Como a lignina é o principal componente removido durante a deslignificação kraft, menores teores favorecem condições de cozimento mais brandas e reduzem o consumo de reagentes químicos, enquanto maiores teores demandam condições mais severas de deslignificação (Baldin *et al.*, 2020). Dessa forma, os resultados obtidos indicam que a poliploidia não promoveu alterações expressivas no teor de lignina total capazes de influenciar significativamente o processo de deslignificação kraft.

Os teores de cinzas variaram entre 0,31 e 0,43%. Apenas os clones P2 e P6 apresentaram valores superiores ao do clone diploide, diferindo estatisticamente da testemunha. Os demais poliploides não apresentaram diferenças significativas em relação ao diploide. Entre os materiais poliploides, P6 apresentou o maior teor de cinzas, enquanto P3 apresentou o menor valor. De modo geral, observa-se uma tendência de aumento do teor de cinzas nos poliploides, embora esse comportamento não tenha sido uniforme entre todos os clones.

Elevados teores de cinzas são indesejáveis para a produção de celulose, pois favorecem a ocorrência de incrustações e corrosão em equipamentos e tubulações do sistema de recuperação, podendo também contribuir para entupimentos e perdas de produção, especialmente em sistemas com maior fechamento do circuito de água (Mata, 2016; Freddo,

1997). Assim, o aumento observado em alguns clones poliploides pode representar uma característica desfavorável para o processo kraft.

4. Conclusões

De modo geral, os clones poliploides apresentaram redução da densidade básica e aumento dos teores de extrativos totais, características que podem afetar negativamente o desempenho da madeira na produção de celulose kraft. Em relação ao teor de lignina total, não foram observadas diferenças consistentes entre os materiais, indicando baixa influência da poliploidia sobre esse parâmetro. Para o teor de cinzas, alguns clones poliploides apresentaram valores superiores ao diploide, o que pode representar uma característica desfavorável ao processo industrial. Os resultados demonstram que a poliploidia modifica importantes características da madeira de *Eucalyptus urophylla*, evidenciando a necessidade de avaliações tecnológicas complementares para determinar seu potencial de utilização na produção de celulose.

5. Agradecimentos

Os autores agradecem à Universidade Federal de Pelotas pelo suporte acadêmico e à CMPC Celulose Riograndense pelo apoio ao desenvolvimento da pesquisa e pela disponibilização do material experimental.

6. Referências bibliográficas

BALDIN, Talita et al. Qualidade da madeira de *Eucalyptus benthamii* para produção de celulose por espectroscopia no infravermelho próximo (NIRS). Scientia Forestalis, 2020.

BARRICHELO, L. E. G.; BRITO, J. O. Química da Madeira. Piracicaba: ESALQ, 1985. 125 p.

CARDOSO, G. V., ROSA, C., GUARIENTI, A. F., PEDRAZZI, C., SOUZA, M., FRIZZO, S. M. B., & FOELKEL, C. E. B. (2001). Adequação de metodologia amostral de madeira de *Eucalyptus saligna* e *Eucalyptus globulus* para determinação do teor de cinzas. In CONGRESSO ANUAL DE CELULOSE E PAPEL (Vol. 34).

CARDOSO, G. V., FOELKEL, C. E. B., FRIZZO, S. M. B., ROSA, C. A. B. D., ASSIS, T. F. D., & OLIVEIRA, P. D.. Efeito do teor de lignina da madeira de Eucalyptus globulus Labill. no desempenho da polpação kraft. Ciência Florestal, v. 21, n. 1, p. 133-147, 2011.

CASTILLO, Alicia et al. Polyploid induction of *Eucalyptus dunnii Maiden* to generate variability in breeding programs. Agrociencia (Uruguay), v. 24, n. SPE2, 2020.

DA SILVA SOUZA, Thaise et al. Polyploidy as a strategy to improve the industrial quality of eucalypt wood. Wood Science and Technology, v. 55, n. 1, p. 181–193, 1 jan. 2021.

FOELKEL, Celso Edmundo Bochetti; BRASIL, Maria Aparecida Mourão; BARRICHELO, Luiz Ernesto George. Métodos para determinação da densidade básica de cavacos para coníferas e folhosas. IPEF, Piracicaba, v. 2, n. 3, p. 65–74, 1971.

FREDDO, A. Elementos minerais em madeira de eucaliptos e acácia negra e sua influência na indústria de celulose kraft branqueada. 1997. 69 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade de Santa Maria, Santa Maria, 1997.

GOMIDE, Jose Livio; FANTUZZI NETO, Humberto; REGAZZI, Adair José. Análise de critérios de qualidade da madeira de eucalipto para produção de celulose kraft. Revista Árvore, v. 34, p. 339–344, 2010.

GOMIDE, José Lívio et al. Caracterização tecnológica, para produção de celulose, da nova geração de clones de *Eucalyptus* do Brasil. Revista Árvore, v. 29, p. 129–137, 2005.

MATA, Rafles Anselmo da. Efeitos do lixiviado de cinzas de precipitadores eletrostáticos de caldeiras de recuperação no tratamento biológico de efluentes de indústrias de polpa celulósica Kraft. 2016. 61 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa. 2016.

MORESCHI. J. C. Propriedades tecnológicas da madeira. Curitiba: Departamento de Engenharia e Tecnologia Florestal da UFPR, 2005.

MUNIZ, Fabiana Rezende et al. Qualidade da madeira de clones poliploides de eucalipto. Revista O Papel, v. 84, n. 10, p. 58-65, 2023.

QUEIROZ, Simone Cristina Setúbal et al. Influência da densidade básica da madeira na qualidade da polpa kraft de clones hibrídos de *Eucalyptus grandis W. Hill ex Maiden X Eucalyptus urophylla S. T. Blake*. Revista Árvore, v. 28, p. 901–909, 2004.

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES. Relatório anual. Brasília, 2025. 104 p. Disponível em: https://iba.org/wp-content/uploads/2025/10/relatorioAnual2025.pdf.

SCANAVACA JUNIOR, L., & GARCIA, J. N. (2003). Potencial de melhoramento genético em Eucalyptus urophylla procedente da Ilha Flores. Scientia Forestalis, (64), 23–32.

SCANDINAVIAN PULP, PAPER AND BOARD. SCAN-CM 43:95. Basic density, SCAN, 1995. p. 4.

TECHNICAL ASSOCIATION OF THE PULP AND PAPER INDUSTRY. TAPPI T 257: Sampling and preparing wood for analysis. Atlanta: TAPPI, 2012.

TECHNICAL ASSOCIATION OF THE PULP AND PAPER INDUSTRY. TAPPI T 264: Preparation of wood for chemical analysis. Atlanta: TAPPI, 2007.

TECHNICAL ASSOCIATION OF THE PULP AND PAPER INDUSTRY. TAPPI T 204: Solvent Extractives of Wood and Pulp. Atlanta: TAPPI, 2007.

TECHNICAL ASSOCIATION OF THE PULP AND PAPER INDUSTRY. TAPPI T 207: Water solubility of wood and pulp. Atlanta: TAPPI, 2008.

TECHNICAL ASSOCIATION OF THE PULP AND PAPER INDUSTRY. TAPPI T 211: Ash in wood, pulp, paper and paperboard: combustion at 525 °C. Atlanta: TAPPI, 2012.

TECHNICAL ASSOCIATION OF THE PULP AND PAPER INDUSTRY. TAPPI T 222: Acid-insoluble lignin in wood and pulp. Atlanta: TAPPI, 2011.

VECHI, Anderson; MAGALHÃES JÚNIOR, Carlos. Aspectos positivos e negativos da cultura do eucalipto e os efeitos ambientais do seu cultivo. Revista Valore, v. 3, p. 495–507, 14 jun. 2018.

VIDAURRE, Graziela Baptista (Ed.). Qualidade da madeira de eucalipto proveniente de plantações no Brasil. EdUfes, 2022.

WOOD, Troy et al. The frequency of polyploid speciation in vascular plants. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, v. 106, p. 13875–9, 1 set. 2009.

ZANUNCIO, Antônio José Vinha et al. Composição química da madeira de eucalipto com diferentes níveis de desbaste. Ciência Florestal, v. 23, p. 755–760, 2013.

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Efeito da temperatura de modificação térmica em propriedades do alburno de *Tectona grandis*

Bárbara Luísa Corradi Pereira[1]; Ariany Mendes Cruz[1]; Karoline Ruiz Ferreira[1]; Michelly Casagrande Stragliotto[2]; Djeison César Batista[3]; Aylson Costa Oliveira[1]

[1] Universidade Federal de Mato Grosso - UFMT
[2] Universidade Federal do Oeste do Pará - UFOPA
[3] Universidade Federal do Espírito Santo - UFES

Resumo: A elevada proporção de alburno em árvores de plantios de *Tectona grandis* conduzidos em curta rotação limita seu aproveitamento em produtos de maior valor agregado, tornando necessária a adoção de tecnologias que melhorem suas propriedades tecnológicas. Assim, este estudo avaliou a influência da modificação térmica nas propriedades físicas e mecânicas do alburno de teca. Corpos de prova foram submetidos a tratamentos térmicos a 160, 180, 200 e 220 °C durante 2,5 horas. A umidade de equilíbrio higroscópico reduziu de 12,70% para 5,38% e a eficiência anti-inchamento foi de 49,87% no tratamento a 220 °C. Em contrapartida, a resistência à flexão estática e a dureza Janka diminuíram 36,4% e 34,1%, respectivamente, na temperatura mais elevada. O tratamento a 200 °C apresentou o melhor equilíbrio entre a melhoria das propriedades físicas e a manutenção das propriedades mecânicas. Os resultados fornecem subsídios para a definição de condições de modificação térmica capazes de ampliar o aproveitamento tecnológico do alburno de *Tectona grandis*.

Palavras-chave: Estabilidade dimensional; Flexão estática; dureza Janka.

Effect of thermal modification temperature on sapwood properties of *Tectona grandis*

Abstract: The high proportion of sapwood in short-rotation *Tectona grandis* plantations limits its use in high-value products, highlighting the need for technologies that improve its technological properties. This study evaluated the influence of thermal modification on the physical and mechanical properties of teak sapwood. Wood specimens were thermally modified at 160, 180, 200, and 220 °C for 2.5 h. Equilibrium moisture content decreased from 12.70% to 5.38%, while the anti-swelling efficiency reached 49.87% at 220 °C. Conversely, static bending strength and Janka hardness decreased by 36.4% and 34.1%, respectively, at the highest treatment temperature. The treatment at 200 °C provided the best balance between improved physical properties and the preservation of mechanical performance. These findings provide support for defining thermal modification conditions capable of enhancing the technological utilization of *Tectona grandis* sapwood.

Keywords: Dimensional stability; Static bending; Janka hardness.

1. Introdução

Tectona grandis L.f. (teca) é uma das espécies florestais de maior valor comercial no mercado mundial de madeiras tropicais. A crescente demanda mundial e a expansão dos plantios comerciais em rotações mais curtas, em países tcomo o Brasil, têm aumentado a disponibilidade de madeira proveniente de desbastes e de árvores jovens, caracterizada por elevada proporção de alburno.

O alburno pode representar até 50% do volume da madeira em árvores com aproximadamente 15 anos (Albuês et al., 2024). Entretanto, devido à preferência do mercado pelo cerne, essa madeira normalmente é destinada a produtos de menor valor agregado. Dessa forma, tecnologias capazes de melhorar suas propriedades tecnológicas são fundamentais para ampliar seu aproveitamento industrial.

Entre essas tecnologias, destaca-se a modificação térmica, que promove alterações químicas na parede celular, reduzindo a higroscopicidade da madeira, aumentando sua estabilidade dimensional e alterando sua coloração. Contudo, temperaturas elevadas também promovem degradação parcial das hemiceluloses e, em menor intensidade, da celulose, podendo reduzir a resistência mecânica da madeira (Juizo et al., 2018; Lengowski et al., 2020).

Embora os benefícios da modificação térmica sejam amplamente reconhecidos, ainda são escassas informações sobre a temperatura mais adequada para otimizar as propriedades físicas do alburno de teca sem comprometer significativamente seu desempenho mecânico. Assim, este estudo teve como objetivo avaliar o efeito da temperatura de modificação térmica nas propriedades físicas e mecânicas da madeira de alburno de *Tectona grandis*.

2. Material e métodos

Foram utilizadas peças serradas de madeira de teca, com predominância de alburno (≥80%), ausência de defeitos como nós, rachaduras e empenamentos e dimensões iguais a 5,0 x 2,5 x 37,0 cm (largura x espessura x comprimento). As amostras tiveram como procedência a madeira de desbaste de um plantio comercial, com idade de 16 anos, localizado no município de São José do Rio Claro, Mato Grosso, Brasil.

A modificação térmica da madeira foi realizada de acordo com a metodologia proposta por Severo e Calonego (2009), com modificações. As amostras foram acondicionadas, em estufa com circulação forçada de ar (100±5°C) para obtenção da massa seca (massa inicial). A modificação térmica, em atmosfera de ar, foi realizada em forno mufla (Linn Elektro Therm, KK260), com taxa de aquecimento média de 4,23°C min^{-1} até as temperaturas de 160, 180, 200

e 220°C, nas quais as amostras foram mantidas por 2,5 horas. Após o processo, a massa final de cada amostra foi obtida e a perda de massa de cada amostra, em porcentagem, foi calculada.

Foram confeccionados 12 corpos de prova para determinação de cada uma das propriedades físicas (densidade aparente, umidade de equilíbrio higroscópico (UEH), inchamento e absorção de água; ângulo de contato e molhabilidade) e mecânicas (dureza Janka; resistência à flexão estática) das madeiras *in natura* (testemunha) e modificada termicamente. Os corpos de prova foram mantidos em uma sala climatizada, 20±2ºC e 65±5% de umidade relativa do ar (URar), para atingirem a UEH.

Os ensaios de densidade aparente e UEH (20ºC, 65%URar) e inchamentos (tangencial, radial, longitudinal e volumétrico) foram realizados de acordo com a norma técnica NBR 7190 (ABNT, 2022), com adaptação nas dimensões dos corpos de prova para 2,0 x 2,5 x 5,0 cm (tangencial x radial x longitudinal). A eficiência anti-inchamento (ASE) foi determinada conforme Hill (2006), utilizando a redução percentual do inchamento volumétrico da madeira modificada em relação à testemunha.

As análises do ângulo de contato e molhabilidade, foram realizadas em corpos de prova com superfície de 5,0 x 5,0 cm, utilizando Goniômetro (Kruss, DSA10) e do Software Advance, com aplicação uma gota d'água em cada corpo de prova. Os valores dos ângulos foram obtidos em ambos os lados da gota durante 60 segundos, sendo as leituras realizadas em triplicata em diferentes regiões da amostra. Para o ângulo de contato com a água foi considerado a média dos ângulos no primeiro segundo de contato.

Para a molhabilidade, foi considerado o valor do ângulo de contato médio em 5 e 60 segundos, conforme a ASTM D724-99 (ASTM, 2003). Para avaliar a absorção de água, foi determinada a massa das amostras utilizadas nos ensaios anteriores, nos períodos de uma e 24 horas, a cada sete dias até 70 dias e após 90 e 110 dias de saturação.

Os ensaios mecânicos de resistência à flexão estática e dureza Janka normal às fibras foram realizados em Máquina Universal de Ensaios (W Lestor AMSLER, Testa 200kN). A dureza Janka foi determinada conforme a NBR 7190 (ABNT, 2022), utilizando corpo de prova com dimensões de 5,0 x 2,5 x 5,0 cm (tangencial x radial x longitudinal). A resistência à flexão estática foi avaliada conforme a norma ASTM D143 (ASTM, 2014), utilizando corpos de prova para 2,5 x 2,5 x 37 cm e vão livre de 32 cm.

O experimento foi instalado seguindo um Delineamento Inteiramente Casualizado (DIC), com cinco tratamentos e doze repetições, totalizando 60 unidades amostrais. A análise estatística foi realizada no software R Project (R Core Team, 2021), onde os dados foram

submetidos à análise de variância (ANOVA), e quando observadas diferenças significativas, foi aplicado o teste de Tukey ($p < 0,05$).

3. Resultado e Discussão

3.1 Perda de Massa

O tratamento a 160 °C apresentou a menor perda de massa (5,87%), enquanto a maior temperatura (220 °C) resultou na maior perda (16,0%), evidenciando a intensificação da degradação térmica da madeira (Figura 1).

Figura 1 – Valores médios e desvio-padrão da perda de massa do alburno de *Tectona grandis* submetido à modificação térmica em diferentes temperaturas. Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p \geq 0,05$).

Nas menores temperaturas, a perda de massa está relacionada principalmente à volatilização de extrativos (Hill et al., 2021). Com o aumento da temperatura, a degradação das hemiceluloses, os constituintes menos estáveis termicamente da parede celular, torna-se o principal mecanismo responsável pela redução da massa da madeira (Hill et al., 2021). A perda de massa superior a 10%, observada em temperaturas acima de 200 °C, indica que, nessas condições, a degradação térmica passa a envolver alterações mais intensas nos componentes estruturais da parede celular.

3.2 Propriedades físicas e de superfície

A densidade aparente da madeira modificada termicamente variou de 0,516 a 0,613 g cm^{-3}, sem diferenças significativas entre os tratamentos (Tabela 1). A perda de massa decorrente da modificação térmica é acompanhada pela redução do volume das peças (Poubel et al., 2013), resultando em pequenas alterações na densidade aparente.

Tabela 17 – Densidade aparente, umidade de equilíbrio higroscópico, ângulo de contato e molhabilidade do alburno de *Tectona grandis* submetido à modificação térmica

Tratamento	ρ ap_{UEH} (g/cm^3)	$UEH_{20°C, 65\%URar}$ (%)	Representação visual	Ângulo de contato	Molhabilidade ($^o.s^{-1}$)

Testemunha	0,613 (0,03) a	12,70 (1,30) a		77,69° b	0,273 b
160°C	0,582 (0,10) a	9,93 (0,60) b		97,23° a	0,433 a
180°C	0,593 (0,07) a	8,13 (0,54) c		88,12° a	0,098 c
200°C	0,568 (0,03) a	7,53 (0,78) c		94,56° a	0,036 c
220°C	0,516 (0,06) a	5,38 (0,30) d		93,10° a	0,024 c

Valores entre parênteses correspondem ao desvio-padrão. ρapUEH = densidade aparente na umidade de equilíbrio higroscópico; UEH = umidade de equilíbrio higroscópico. "Representação visual" corresponde à imagem da gota de água utilizada para a determinação do ângulo de contato. Médias seguidas pela mesma letra na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p \geq 0,05$).

A UEH foi significativamente reduzida pela modificação térmica, passando de 12,70% (testemunha) para 5,38% (220 °C), correspondendo a uma redução de aproximadamente 58% (Tabela 1). Essa diminuição está associada principalmente à degradação das hemiceluloses e à redução dos grupos hidroxila disponíveis para ligação com moléculas de água, tornando a madeira menos higroscópica (Poubel et al., 2013; Lengowski et al., 2020).

A modificação térmica aumentou significativamente o ângulo de contato em relação à testemunha, indicando menor molhabilidade inicial da superfície da madeira (Tabela 1). Entretanto, não houve diferenças significativas entre as temperaturas de tratamento, sugerindo que temperaturas a partir de 160 °C já são suficientes para alterar a energia superficial da madeira. O aumento do ângulo de contato está associado à redução dos grupos hidroxila expostos e ao incremento do caráter hidrofóbico da superfície após o tratamento térmico (Calonego, 2017).

Embora o tratamento a 160 °C tenha apresentado o maior ângulo de contato inicial, também apresentou a maior taxa de molhabilidade, diferindo dos demais tratamentos. O ângulo de contato descreve a interação inicial entre a gota de água e a superfície da madeira, enquanto a molhabilidade reflete a velocidade de redução desse ângulo ao longo do tempo, sendo influenciada pela penetração capilar da água na estrutura porosa da madeira. Assim, o tratamento a 160 °C promoveu uma superfície inicialmente mais hidrofóbica, mas ainda com elevada capacidade de absorção capilar. Em contrapartida, os tratamentos a 180, 200 e 220 °C reduziram significativamente a taxa de molhabilidade.

A testemunha apresentou os maiores valores de absorção de água após 1 e 24 horas de imersão, com 12,70% e 19,02%, respectivamente, enquanto a madeira modificada a 220 °C apresentou os menores valores (5,20% e 8,54%) (Figura 2).

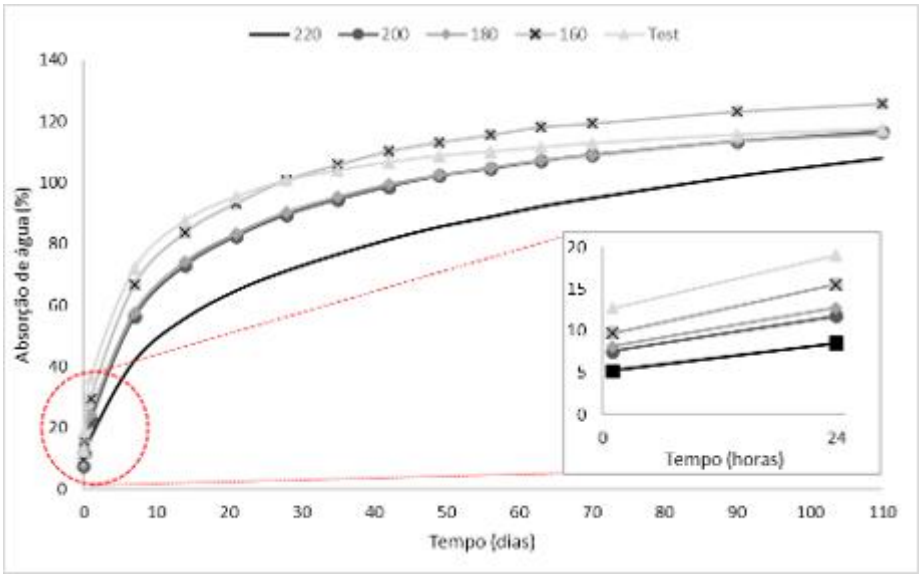


Figura 2 - Cinética de absorção de água do alburno de Tectona grandis submetido à modificação térmica em diferentes temperaturas durante 110 dias de imersão. O detalhe apresenta o comportamento nas primeiras 24 horas.

Ao longo dos 110 dias de imersão, observou-se redução progressiva da absorção de água com o aumento da temperatura de modificação térmica. O tratamento a 160 °C apresentou a maior absorção acumulada (125,56%), enquanto a madeira modificada a 220 °C apresentou o menor valor (107,74%). A menor absorção observada nas temperaturas mais elevadas está associada à maior severidade da modificação térmica. Essas alterações diminuem a afinidade da parede celular pela água, reduzindo a higroscopicidade da madeira, conforme evidenciado pela menor UEH (Poubel et al., 2013; Calonego, 2017; Lengowski et al., 2020).

O comportamento observado no tratamento a 160 °C merece destaque. Embora essa temperatura tenha reduzido a UEH e aumentado o ângulo de contato em relação à testemunha, a madeira apresentou a maior absorção acumulada durante a imersão prolongada, evidenciando que a absorção de água em longo prazo depende da penetração capilar através dos lumens celulares, enquanto a umidade de equilíbrio está relacionada à adsorção de água na parede celular.

Em contrapartida, nas temperaturas de 180 a 220 °C, houve redução significativa da afinidade da madeira pela água, limitando tanto a absorção inicial quanto a absorção acumulada. Além disso, a redução das diferenças entre os tratamentos ao longo do período de imersão indica que a modificação térmica atua principalmente retardando a cinética de absorção de água, sem impedir completamente sua penetração quando a madeira permanece exposta por longos períodos.

O tratamento a 220 °C o único que promoveu reduções significativas nos inchamentos radial, tangencial e volumétrico em relação à testemunha (Tabela 2).

Tabela *18* – Índices de inchamento e eficiência anti-inchamento (ASE) do alburno de *Tectona grandis* submetido à modificação térmica em diferentes temperaturas

Tratamento	εiR (%)	εiL (%)	εiT (%)	εiV (%)	ASE (%)
Testemunha	2,34 (0,51) a	0,23 (0,07) a	5,08 (0,89) a	7,78 (1,18) a	–
160 °C	2,57 (0,51) a	0,25 (0,10) a	4,04 (1,71) a	6,99 (1,84) a	10,15
180 °C	2,20 (0,77) a	0,18 (0,05) a	5,29 (2,52) a	7,81 (2,92) a	- 0,39
200 °C	1,91 (0,69) a	0,17 (0,11) a	4,04 (1,39) a	6,21 (2,02) a	20,18
220 °C	1,19 (0,51) b	0,23 (0,23) a	2,43 (0,48) b	3,90 (0,60) b	49,87

Valores entre parênteses correspondem ao desvio-padrão. εiR = inchamento radial; εiL = inchamento longitudinal; εiT = inchamento tangencial; εiV = inchamento volumétrico; ASE = eficiência anti-inchamento, calculada em relação à testemunha segundo Hill (2006). Médias seguidas pela mesma letra na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p \geq 0,05$).

A redução dos índices de inchamento está diretamente relacionada às alterações químicas promovidas pela modificação térmica. A degradação parcial das hemiceluloses reduz a quantidade de grupos hidroxila livres disponíveis para interação com moléculas de água, enquanto modificações estruturais da lignina, como reações de condensação e reticulação, tornam a parede celular menos hidrofílica e mais rígida (Delucis et al., 2014; Lengowski et al., 2020). Esse mecanismo explica a redução da UEH, da absorção de água e, consequentemente, dos índices de inchamento.

A eficiência anti-inchamento (ASE) confirmou esse comportamento. O tratamento realizado a 220 °C apresentou a maior ASE, indicando elevada eficiência na redução do inchamento volumétrico da madeira. Em contraste, os tratamentos conduzidos em temperaturas inferiores apresentaram baixa eficiência.

Resultados semelhantes foram relatados por Ramos (2013), que verificou redução dos índices de inchamento e aumento da estabilidade dimensional de madeiras submetidas à modificação térmica, especialmente nas temperaturas mais elevadas. Da mesma forma, Priadi, Suharjo e Karlinasari (2019) observaram que a melhoria da estabilidade dimensional da madeira de teca é fortemente dependente da severidade do tratamento térmico.

3.3 Propriedades Mecânicas

A modificação térmica reduziu a resistência à flexão estática da madeira (Tabela 3). Em contrapartida, a dureza Janka permaneceu estatisticamente semelhante à testemunha até 200 °C, sendo reduzida apenas no tratamento mais severo (220 °C).

Tabela 19 –Resistência à flexão estática e dureza Janka do alburno de *Tectona grandis* submetido à modificação térmica em diferentes temperaturas

Tratamento	Resistência à flexão estática (MPa)	Dureza Janka (MPa)
Testemunha	94,67 (37,84) a	64,13 (5,06) a
160 °C	82,30 (10,33) a	61,37 (15,69) a
180 °C	70,69 (16,46) b	60,86 (11,16) a
200 °C	62,34 (12,32) b	62,01 (2,18) a
220 °C	60,22 (10,49) b	42,23 (5,37) b

Valores entre parênteses correspondem ao desvio-padrão. Médias seguidas pela mesma letra na coluna não diferem significativamente entre si pelo teste de Tukey ($p \geq 0,05$).

A redução da resistência mecânica está diretamente relacionada às alterações químicas promovidas pela modificação térmica. A degradação das hemiceluloses reduz a integridade da parede celular e compromete a transferência de tensões entre as microfibrilas de celulose, tornando a madeira mais suscetível à ruptura por flexão (Esteves & Pereira, 2009). Embora a redução da UEH possa contribuir para o aumento da rigidez da madeira, esse efeito torna-se secundário quando a degradação dos componentes estruturais da parede celular é mais intensa (Lengowski et al., 2020).

Essa tendência também foi observada neste estudo, em que o aumento da perda de massa foi acompanhado pela redução das propriedades mecânicas, evidenciada pelas elevadas correlações de Pearson negativas entre perda de massa e resistência à flexão ($r = -0,85$) e entre perda de massa e dureza Janka ($r = -0,89$). Esses resultados corroboram estudos anteriores que

demonstram que a perda de massa constitui um dos principais indicadores indiretos da degradação mecânica da madeira modificada termicamente (Juizo et al., 2018).

4. Conclusões

A modificação térmica melhorou a estabilidade dimensional do alburno de *Tectona grandis*, com redução das propriedades mecânicas em temperaturas mais elevadas. O tratamento a 200 °C apresentou o melhor equilíbrio entre desempenho físico e mecânico, evidenciando o potencial dessa técnica para agregar valor ao alburno de teca.

5. Agradecimentos

Os autores agradecem à CAPES, CNPq e FAPEMAT.

6. Referências Bibliográficas

Albuês, T. A., Corradi-Pereira, B. L., Guimarães-Carvalho, A., Môra, R., & Costa-Oliveira, A. (2024). *Quality of Tectona grandis for sawn wood production*. *Maderas. Ciencia y Tecnología, 26*, Article 6.

American Society for Testing and Materials. (2003). *ASTM D724-99: Standard test method for surface strength of paper (wax pick test)*. ASTM International.

American Society for Testing and Materials. (2014). *ASTM D143-14: Standard test methods for small clear specimens of timber*. ASTM International.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2022). *ABNT NBR 7190-1:2022: Projeto de estruturas de madeira – Parte 1: Critérios de dimensionamento*. ABNT

Calonego, F. W. (2017). *Caracterização tecnológica da madeira de Schizolobium parahyba (Vell.) Blake modificada termicamente* (Tese de doutorado). Universidade Estadual Paulista.

Delucis, R. A., et al. (2014). Propriedades físicas da madeira termorretificada de quatro folhosas. *Floresta e Ambiente, 21*(1), 99–107.

Esteves, B. M., & Pereira, H. (2009). Wood modification by heat treatment: A review. *BioResources, 4*(1), 370–404.

Hill, C. A. S. (2006). *Wood modification: Chemical, thermal and other processes*. John Wiley & Sons.

Hill, C., Altgen, M., & Rautkari, L. (2021). Thermal modification of wood—A review: Chemical changes and hygroscopicity. *Journal of Materials Science, 56*(11), 6581–6614.

Juizo, C. G. F., et al. (2018). Propriedades tecnológicas da madeira de eucalipto submetida ao tratamento térmico. *Nativa, 6*(5), 537–542.

Lengowski, E. C., et al. (2020). Properties of thermally modified teakwood. *Maderas. Ciencia y Tecnología, 23*.

Poubel, D. S., et al. (2013). Efeito da termorretificação nas propriedades físicas e químicas da madeira de *Pinus caribaea*. *Cerne, 19*(3), 391–398.

Pratiwi, L. A., et al. (2019). Characterization of thermally modified short- and long-rotation teaks and the effects on coating performance. *Maderas. Ciencia y Tecnología, 21*(2), 209–222.

R Core Team. (2021). *R: A language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing. https://www.r-project.org/

Ramos, K. R. (2013). *Modificação térmica da madeira de três espécies de florestas plantadas pelo processo Vap HolzSysteme*® (Dissertação de mestrado). Universidade Federal do Paraná.

Severo, E. T. D., & Calonego, F. W. (2009). *Thermal modification process by heat irradiation to improve the dimensional stability and biological durability of solid wood* (Brazilian Patent No. PI0902138-8). Instituto Nacional da Propriedade Industrial.

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Efeito da temperatura de pirólise nas propriedades do biochar de eucalipto para condicionamento de solo

Clara Esposito Gualandi[1]; Tayná Rebonato Oliveira[1]; Hemanuelly Ferreira Breda Lãn Oliveira[1]; Merlindo Jacinto Manjate[1]; Rodolpho Stephan Santos Braga[1]; Gabriela Aguiar Amorim[2]; Iara Nobre Carmona[1]; Ananias Francisco Dias Júnior[1]

[1] Universidade Federal do Espírito Santo - UFES 01
[2] Universidade de São Paulo – USP 02

Resumo: O cultivo de eucalipto ocupa aproximadamente 8,1 milhões de hectares no Brasil, e estima-se que os resíduos gerados durante a colheita correspondam a cerca de 20% da quantidade de madeira produzida. A conversão dessa biomassa residual em biochar por meio da pirólise constitui uma alternativa de valorização, com potencial de aplicação como condicionador do solo. Este estudo avaliou o efeito da temperatura final de pirólise nas características químicas e morfológicas do biochar de *Eucalyptus* sp. A madeira foi triturada e pirolisada a 350, 450, 550 e 650 °C, com taxa de aquecimento de 5 °C min^{-1} e permanência de 120 minutos. Foram determinadas materiais voláteis, carbono fixo, cinzas, pH, composição multielementar por FRX e morfologia por meio do MEV. Os materiais voláteis diminuíram de 35% para 6%, enquanto o carbono fixo atingiu 90% a 650 °C. O pH aumentou de 4,37 para 7,04, o cálcio predominou e a porosidade tornou-se mais evidente nas maiores temperaturas. Entre as temperaturas avaliadas, 650 °C apresentou características mais promissoras para a obtenção de biochar com potencial de uso como condicionador do solo.

Palavras-chave: Conversão termoquímica; Valorização de resíduos; Fertilidade de solo.

Effect of pyrolysis temperature on the properties of eucalyptus biochar for soil amendment

Abstract: Eucalyptus plantations cover approximately 8.1 million hectares in Brazil, and the residues generated during harvesting are estimated to account for about 20% of the total wood produced. Converting this residual biomass into biochar through pyrolysis represents a valorization strategy with potential application as a soil conditioner. This study evaluated the effect of final pyrolysis temperature on the chemical and morphological characteristics of biochar produced from *Eucalyptus* sp. wood. The wood was ground and pyrolyzed at 350, 450, 550, and 650 °C, using a heating rate of 5 °C min^{-1} and a holding time of 120 min. Volatile matter, fixed carbon, ash content, pH, multielement composition by X-ray fluorescence spectroscopy, and morphology by scanning electron microscopy were determined. Volatile matter decreased from 35% to 6%, whereas fixed carbon reached 90% at 650 °C. The pH increased from 4.37 to 7.04, calcium was the predominant element, and porosity became more evident at higher temperatures. Among the temperatures evaluated, 650 °C produced the most promising characteristics for obtaining biochar with potential use as a soil conditioner.

Keywords: Thermochemical conversion; Waste valorization; Soil fertility.

1. Introdução

A expansão da produção brasileira de celulose é sustentada por extensas áreas de florestas plantadas, entre as quais o eucalipto ocupa posição predominante, com aproximadamente 8,1 milhões de hectares cultivados em 2024 (Ibá, 2025). Durante a colheita comercial, parte da biomassa arbórea permanece no campo na forma de resíduos, incluindo ponteiros e frações subcomerciais do fuste (Sena et al., 2025; Titus et al., 2021). Estima-se que os resíduos da colheita de eucalipto possam corresponder a aproximadamente 20% da quantidade de madeira produzida (Pena-Vergara et al., 2022), evidenciando a disponibilidade de uma parcela expressiva de biomassa ainda passível de valorização.

No contexto da economia circular, a valorização dessas frações lenhosas representa uma oportunidade de manter os recursos da biomassa em uso e convertê-los em produtos de maior valor agregado. Entre as alternativas possíveis, a pirólise permite transformar a madeira residual em biochar (Shyam et al., 2025), criando uma rota de aproveitamento que conecta a cadeia florestal à produção de materiais com potencial de aplicação no solo. Dessa forma, um material que permanece fora do fluxo industrial pode ser reinserido em uma nova cadeia de valor, contribuindo para ampliar a eficiência no uso dos recursos florestais.

Entretanto, a simples conversão da madeira residual em biochar não assegura a obtenção de um material adequado à aplicação pretendida. A temperatura final de pirólise determina a intensidade das transformações térmicas da madeira e pode modificar simultaneamente a composição química, o grau de carbonização, o pH, a composição mineral e a estrutura superficial do produto (Birhanu et al., 2025a; Caturegli et al., 2026). Assim, diferentes condições de pirólise podem gerar, a partir da mesma biomassa, biochars com características contrastantes e distintos potenciais de aplicação.

A conversão de frações lenhosas residuais em biochar constitui uma rota de valorização dessa biomassa alinhada aos princípios da economia circular, considerando os resíduos como recursos alternativos que podem ser reciclados como produtos de valor agregado (Sarkar et al., 2022). Entretanto, como as propriedades do material dependem das condições empregadas durante a pirólise (Tu et al., 2022), compreender o efeito da temperatura é importante para interpretar seu comportamento e direcionar sua aplicação. Nesse sentido, este estudo teve como objetivo, avaliar como a temperatura final de pirólise modifica as propriedades químicas e morfológicas do biochar produzido a partir da madeira de *Eucalyptus* sp., com o propósito de subsidiar a seleção de condições mais adequadas à obtenção de biochars com potencial de aplicação como condicionadores do solo.

2. Material e métodos

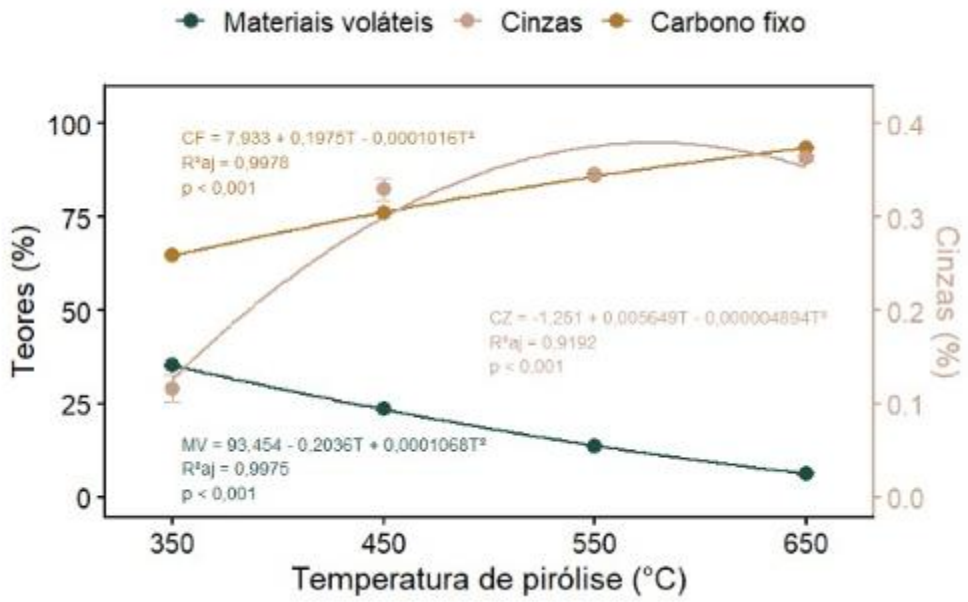
Para a produção do biochar, utilizou-se madeira de *Eucalyptus* sp., aos sete anos de idade. A madeira foi previamente triturada em moinho de facas e, em seguida, submetida à pirólise em forno tipo mufla, nas temperaturas finais de 350, 450, 550 e 650 °C, com taxa de aquecimento de 5 °C min^{-1} e tempo de permanência de 120 minutos. Após o processo de pirólise, foi realizada a classificação granulométrica do biochar por meio das peneiras de 40 – 60 mesh. A composição química imediata foi realizada segundo a norma D1762-84 (American society for testing and materials, 2021), para a determinação dos teores de materiais voláteis, cinzas e carbono fixo. A determinação do pH foi realizada mediante a mistura de 1 g de biochar em 40 mL de água destilada, submetida à agitação mecânica por 20 minutos a 25 °C. Após esse período, a suspensão permaneceu em repouso por aproximadamente 1 hora, sendo posteriormente realizada a leitura do pH com auxílio de um pHmetro Tecnal modelo Tec-7.

As análises multielementares foram realizadas utilizando um espectrômetro modelo Epsilon 1 (Malvern Panalytical, Almelo, Holanda), baseado na tecnologia de espectroscopia de fluorescência de raios X (FRX). Foi realizada a caracterização morfológica do biochar por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), através da obtenção de imagens em alta resolução da superfície das amostras. Os dados foram submetidos ao teste de normalidade Shapiro-Wilk e à homogeneidade de variâncias pelo teste de Bartlett. Posteriormente, realizou-se análise de variância (ANOVA) considerando delineamento inteiramente casualizado, tendo como fator de estudo a temperatura de pirólise (350, 450, 550, 650 °C). Quando verificadas diferenças significativas pela temperatura ($p < 0,05$), foram ajustados modelos de regressão linear e quadrática. Todas as análises estatísticas foram realizadas no software R, adotando nível de significância de 5%.

3. Resultados e discussão

Os teores de materiais voláteis, carbono fixo e cinzas do biochar produzido a partir de serragem de eucalipto em diferentes temperaturas de pirólise estão apresentados na Figura 1.

Figura 1: Teores de materiais voláteis, carbono fixo e cinzas do biochar de serragem de eucalipto em diferentes temperaturas de pirólise.



O teor de materiais voláteis diminuiu com o aumento da temperatura final de pirólise, passando de aproximadamente 35% a 350 °C para 6% a 650 °C, o que corresponde a uma redução de 82,9%. Esse comportamento decorre da intensificação da decomposição térmica e da liberação de compostos orgânicos voláteis à medida que a biomassa é submetida a temperaturas mais elevadas (Birhanu et al., 2025b; Shin et al., 2023). Para uso como condicionador de solo, o teor de materiais voláteis no biochar pode representar uma fonte prontamente disponível aos microrganismos, devido à sua fácil decomposição (Tu et al., 2022). Além disso, essa fração influencia a porosidade e a área superficial do biochar, características que favorecem a adsorção de nutrientes e a atividade microbiana (Shyam et al., 2025). Em contrapartida, biochars com menores teores de materiais voláteis tendem a apresentar maior estabilidade e menores taxas de decomposição, tornando-se mais adequados para a melhoria do solo em longo prazo (El-Naggar et al., 2024).

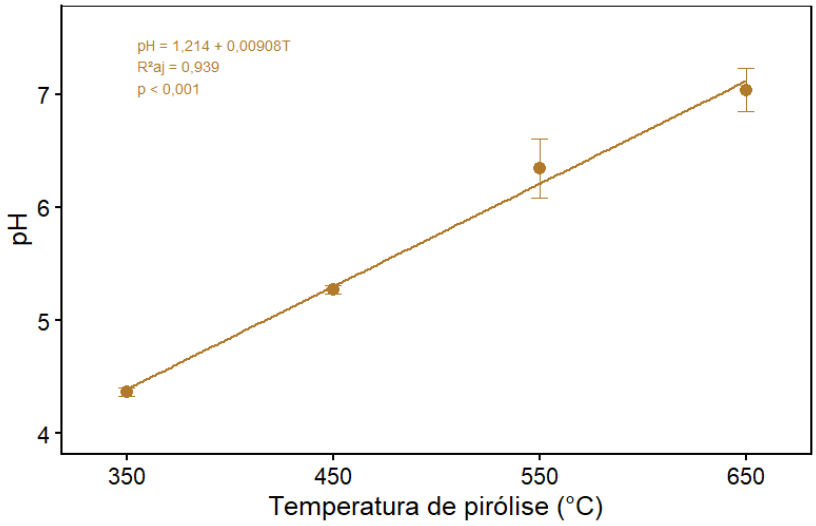
Verificou-se aumento dos teores de carbono fixo à medida que se eleva a temperatura de pirólise, atingindo aproximadamente 90% na temperatura de 650°C. Esses dados são condizentes com resultados presentes em literatura onde é relatado valores de superiores a 80% em carbono fixo para temperaturas mais elevadas (de Sousa Venega et al., 2023). Esse comportamento é característico de biochars produzidos em temperaturas mais elevadas, uma vez que, o material passa a ser constituído predominantemente por formas aromáticas estáveis de carbono orgânico (Trazzi et al., 2018). Comportamento similar é relatado para diversas fontes de biomassas estudadas na produção de biochar (Santos et al., 2024; Venkatesh et al.,

2022; Zhang et al., 2022). O aumento da temperatura de pirólise produz biochar mais denso em carbono, termicamente estável e mais bem desenvolvida (Caturegli et al., 2026), capaz de reter nutrientes presentes no solo ou quando adicionados fertilizantes (Ghobadian et al., 2026).

Os teores de cinzas apresentaram aumento significativo de aproximadamente 200% de 350°C para 450°C. Nas temperaturas de 550°C e 650°C, o incremento foi menos expressivo (~ 5,25%), embora os teores tenham permanecido superiores ao observado na menor temperatura. O teor de cinzas relatado em literatura para a madeira de eucalipto é baixo comparada a outras biomassas. Enquanto autores que estudaram a madeira de eucalipto relatam teores de cinzas de aproximadamente 0,6 % (Dias et al., 2025; Nogueira et al., 2025), outros autores ao estudar biomassas de cana-de-açúcar e casca de café relatam 12% e 21% em cinzas, respectivamente (Morais et al., 2025; Viana et al., 2024). As cinzas oriundas do eucalipto, embora presente em pequenas quantidades, pode concentrar elementos como potássio, cálcio e magnésio, que, após a pirólise, podem ocorrer em formas mais solúveis e potencialmente mais disponíveis do que na biomassa original (Trazzi et al., 2018).

O pH dos biochars aumentou com a elevação da temperatura final de pirólise, passando de aproximadamente 4,37 a 350 °C para 5,27 em 450 °C, 6,35 e 7,04 nas temperaturas de 550 e 650 °C, respectivamente (Figura 2).

Figura 2: pH do biochar de serragem de eucalipto em diferentes temperaturas de pirólise.



Entre as temperaturas de 350°C para 650°C, foi observado um aumento de aproximadamente 61% no pH. Assim, os biochars produzidos a 350 e 450 °C apresentaram caráter ácido, enquanto o material obtido a 650 °C apresentou pH próximo da neutralidade. Comportamento similar é relatado por Domingues et al. (2020) ao estudarem o biochar de

eucalipto em diferentes temperaturas de pirólise. O caráter ácido dos biochars produzidos a 350 e 450 °C pode estar relacionado à permanência de grupos funcionais oxigenados de natureza ácida e ao baixo teor de cinzas da serragem de eucalipto, que limita a concentração de constituintes minerais alcalinos (Dhar et al., 2020; Domingues et al., 2017). Com a intensificação da pirólise, a degradação desses grupos e a concentração relativa da fração mineral favoreceram o aumento progressivo do pH.

O pH do biochar é um fator chave para sua aplicação no solo, uma vez que pode modificar a disponibilidade de nutrientes, a atividade microbiana e a solubilidade de elementos potencialmente tóxicos (Ghorbani et al., 2024; Rahman et al., 2018; Xia et al., 2023). Assim, enquanto os biochars produzidos em temperaturas mais elevadas podem contribuir para a correção da acidez, aqueles obtidos a 350 e 450 °C apresentam menor potencial de neutralização do solo.

A temperatura final de pirólise alterou a proporção dos elementos detectados no biochar, sem produzir uma tendência única para toda a composição multielementar (Tabela 1).

Tabela 1: Composição multielementar do biochar de serragem de eucalipto em diferentes temperaturas de pirólise

Tratamento	**Composição multielementar (%)**									
	P	**K**	**Fe**	**Ca**	**Mn**	**Zn**	**S**	**Cu**	**Cl**	**Si**
BC350	4,6	20,6	14,4	53,33	1,53	0,42	0,96	0,33	0,39	1,4
BC450	3,78	16,8	9,76	62,2	2,12	0,39	0,69	0,21	0,39	1,52
BC550	3,27	19,55	11,19	58,43	1,59	0,27	0,58	0,24	0,9	1,71
BC650	3,17	20,94	9,66	59,13	1,56	0,32	0,54	0,35	1,48	0,91

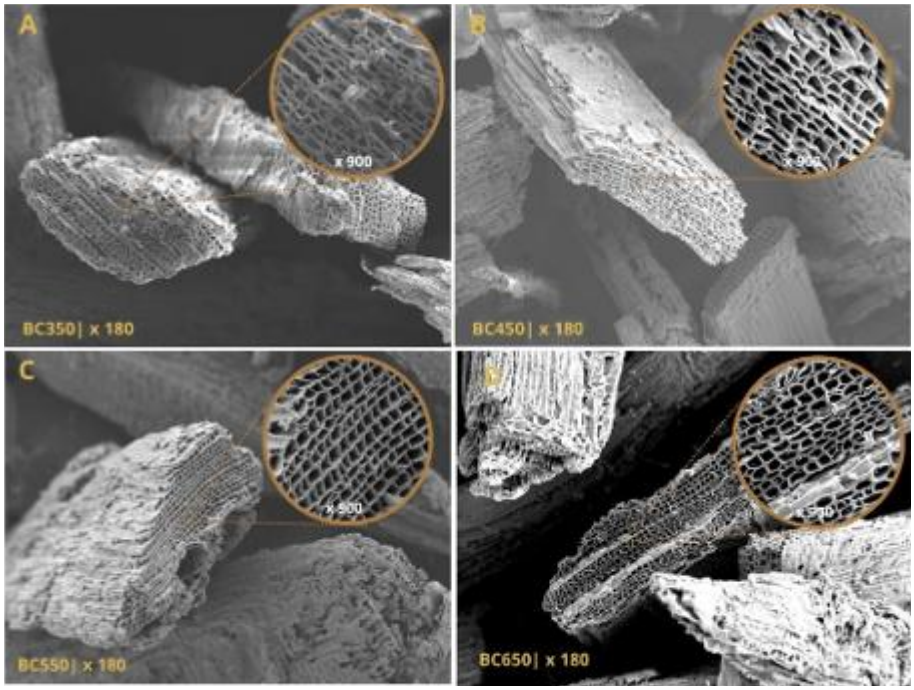
O cálcio (Ca) permaneceu como o elemento predominante em todas as temperaturas, apresentando maior proporção no biochar produzido a 450 °C. O potássio (K) apresentou redução nessa mesma temperatura, seguida de aumento nos biochars obtidos a 550 e 650 °C. Em contrapartida, fósforo (P) e enxofre (S) apresentaram redução progressiva com a elevação da temperatura, enquanto o cloro (Cl) apresentou maior proporção nas temperaturas mais elevadas.

Cada elemento presente nos condicionadores possui funções especifica no metabolismo das plantas. O fósforo desempenha funções essenciais na fotossíntese, na respiração, no

armazenamento e na transferência de energia, além de participar da divisão e do crescimento celular (Santoro et al., 2023). O potássio atua na regulação da fotossíntese e no transporte dos fotoassimilados, de modo que sua deficiência pode comprometer a fixação de CO_2 e reduzir a eficiência fotossintética (M. Zhang et al., 2023). O enxofre integra aminoácidos, proteínas, enzimas e vitaminas, além de participar da síntese de clorofila (Chung et al., 2022). O cálcio, por sua vez, é fundamental para a divisão celular e para o crescimento dos tecidos meristemáticos, especialmente para o desenvolvimento e o funcionamento dos ápices radiculares (Shabbir et al., 2022). Considerando as diferentes funções desempenhadas por esses elementos, a escolha do biochar deve levar em conta sua composição química, temperatura de pirólise, as características do solo e o objetivo da aplicação, de modo a favorecer o uso eficiente e sustentável.

As micrografias obtidas por MEV dos biochars produzidos em diferentes temperaturas de pirólise são apresentadas na Figura 3.

Figura 3: Microscopia eletrônica de varredura no aumento de 180 e 900 do biochar de serragem de eucalipto em diferentes temperaturas de pirólise.



Observou-se aumento aparente no tamanho e na abertura dos poros com a elevação da temperatura de pirólise. O BC350 apresentou estrutura porosa mais obstruída, condição que se tornou progressivamente menos evidente nos biochars produzidos em temperaturas superiores. Esse comportamento é atribuído ao aumento da temperatura de pirólise, que promove maior dissipação de compostos voláteis, elevando a área superficial e a quantidade

de microporos do biochar (Wang & Wang, 2019). Dessa forma, biochars produzidos em temperaturas mais elevadas, por apresentarem maior porosidade, favorecem a adsorção e a retenção de água, além de agentes contaminantes presentes no solo ou na água (Masud et al., 2023).

4. Conclusões

A produção de biochar a partir da madeira de *Eucalyptus* sp., representa uma alternativa sustentável para o aproveitamento de resíduos gerados pela indústria madeireira, agregando valor e ampliando seu potencial de aplicação no setor florestal e agrícola. A temperatura de 650 °C apresentou características mais promissoras para a obtenção de biochar com potencial de aplicação como condicionador do solo.

A temperatura final de pirólise modificou as características químicas e morfológicas do biochar, sendo necessário a seleção adequada da temperatura de pirólise de acordo com as propriedades desejadas para sua aplicação em diferentes tipos de solo.

Indicamos a necessidade de novos estudos comparando as características de custo/rendimento para avaliar a viabilidade de produção do biochar de eucalipto.

5. Agradecimentos

Os autores agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação do Espírito Santo (FAPES), à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e à Universidade Federal do Espírito Santo (UFES) pelo apoio financeiro, institucional e estrutural concedido para o desenvolvimento deste trabalho.

6. Referências bibliográficas

Birhanu, A., Hailu, A. M., Worku, Z., Tessema, I., Angassa, K., & Tibebu, S. (2025a). Optimization of pyrolysis conditions for Catha edulis waste-based biochar production using response surface methodology. *Bioresources and Bioprocessing*, *12*(1), 1–18. https://doi.org/10.1186/S40643-025-00866-9/FIGURES/8

Birhanu, A., Hailu, A. M., Worku, Z., Tessema, I., Angassa, K., & Tibebu, S. (2025b). Optimization of pyrolysis conditions for Catha edulis waste-based biochar production using response surface methodology. *Bioresources and Bioprocessing 2025 12:1*, *12*(1), 62-. https://doi.org/10.1186/S40643-025-00866-9

Caturegli, L., Bianchini, G., Trivellini, A., Carmassi, G., Maggini, R., Tavarini, S., Cardelli, R., Ragucci, R., Giudicianni, P., Grottola, C. M., Ariemma, G. B., Amato, D., & Angelini, L. G. (2026). Pyrolysis Temperature Affects Biochar Properties in a Soil–Plant System.

Agriculture 2026, Vol. 16, Page 518, *16*(5), 518. https://doi.org/10.3390/AGRICULTURE16050518

Chung, J. S., Kim, H. C., Yun, S. M., Kim, H. J., Kim, C. S., & Lee, J. J. (2022). Metabolite Analysis of Lettuce in Response to Sulfur Nutrition. *Horticulturae 2022, Vol. 8, Page 734*, *8*(8), 734. https://doi.org/10.3390/HORTICULTURAE8080734

de Sousa Venega, R., da Silva, R. C., Sousa, T. O., Saraiva, K. F., Colares, C. J. G., Loiola, P. L., da Silva, D. A., & Marchesan, R. (2023). Energy Quality of Wood and Charcoal from the Stem and Root of *Eucalyptus* spp. *Floresta e Ambiente*, *30*(1), e20220031. https://doi.org/10.1590/2179-8087-FLORAM-2022-0031

Dhar, S. A., Sakib, T. U., & Hilary, L. N. (2020). Effects of pyrolysis temperature on production and physicochemical characterization of biochar derived from coconut fiber biomass through slow pyrolysis process. *Biomass Conversion and Biorefinery 2020 12:7*, *12*(7), 2631–2647. https://doi.org/10.1007/S13399-020-01116-Y

Dias, J., Conceição, A., Delatorre, F. M., & Siqueira, P. (2025). Production, Characterization Physical, Chemical, and Structural Analysis of Biochar Fines for Bio-Reinforcement in Composite Materials. *Processes 2025, Vol. 13, Page 504*, *13*(2), 504. https://doi.org/10.3390/PR13020504

Domingues, R. R., Sánchez-Monedero, M. A., Spokas, K. A., Melo, L. C. A., Trugilho, P. F., Valenciano, M. N., & Silva, C. A. (2020). Enhancing Cation Exchange Capacity of Weathered Soils Using Biochar: Feedstock, Pyrolysis Conditions and Addition Rate. *Agronomy 2020, Vol. 10, Page 824*, *10*(6), 824. https://doi.org/10.3390/AGRONOMY10060824

Domingues, R. R., Trugilho, P. F., Silva, C. A., De Melo, I. C. N. A., Melo, L. C. A., Magriotis, Z. M., & Sánchez-Monedero, M. A. (2017). Properties of biochar derived from wood and high-nutrient biomasses with the aim of agronomic and environmental benefits. *PLOS ONE*, *12*(5), e0176884. https://doi.org/10.1371/JOURNAL.PONE.0176884

El-Naggar, A., Jiang, W., Tang, R., Cai, Y., & Chang, S. X. (2024). Biochar and soil properties affect remediation of Zn contamination by biochar: A global meta-analysis. *Chemosphere*, *349*, 140983. https://doi.org/10.1016/J.CHEMOSPHERE.2023.140983

Ghobadian, S., Romero, O. R., Kraume, M., Tabatabaei, M., Aghbashlo, M., & Marzban, N. (2026). Biochar from poplar sawdust for digestate nutrient recovery and potential for long-term carbon sequestration. *Biomass Conversion and Biorefinery 2026 16:13*, *16*(13), 265-. https://doi.org/10.1007/S13399-026-07179-7

Ghorbani, M., Amirahmadi, E., Bernas, J., & Konvalina, P. (2024). Testing Biochar's Ability to Moderate Extremely Acidic Soils in Tea-Growing Areas. *Agronomy 2024, Vol. 14, Page 533*, *14*(3), 533. https://doi.org/10.3390/AGRONOMY14030533

Masud, M. A. Al, Shin, W. S., Sarker, A., Septian, A., Das, K., Deepo, D. M., Iqbal, M. A., Islam, A. R. M. T., & Malafaia, G. (2023). A critical review of sustainable application of biochar for green remediation: Research uncertainty and future directions. *Science of The Total Environment*, *904*, 166813. https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2023.166813

Morais, E. G. de, Silva, C. A., Gao, S., Melo, L. C. A., Benevenute, P. A. N., Lago, B. C., Teodoro, J. C., & Guilherme, L. R. G. (2025). Rapid Adsorption of Ammonium on Coffee Husk and Chicken Manure-Derived Biochars: Mechanisms Unveiled by Chemical Speciation, Physical, and Spectroscopic Approaches. *Sustainability 2025, Vol. 17, Page 1616*, *17*(4), 1616. https://doi.org/10.3390/SU17041616

Oliveira De Souza Nogueira, C., De Almeida Pereira, V., Latorre, F. L., De, R., Paula, J., Dutra Junior, A. T., Aroeira De Almeida, I., Ferreira, O. E., Lima, E. N., César Da, A., Bezerra, S., Rodrigues, A., & Machado, T. (2025). Pilot-scale production of biochar from eucalyptus wood chips for carbon sequestration. *Carbon Neutral Systems 2025 1:1*, *1*(1), 15-. https://doi.org/10.1007/S44438-025-00015-X

Pena-Vergara, G., Castro, L. R., Gasparetto, C. A., & Bizzo, W. A. (2022). Energy from planted forest and its residues characterization in Brazil. *Energy*, *239*, 122243. https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2021.122243

Rahman, M. A., Lee, S. H., Ji, H. C., Kabir, A. H., Jones, C. S., & Lee, K. W. (2018). Importance of Mineral Nutrition for Mitigating Aluminum Toxicity in Plants on Acidic Soils: Current Status and Opportunities. *International Journal of Molecular Sciences 2018, Vol. 19, Page 3073*, *19*(10), 3073. https://doi.org/10.3390/IJMS19103073

Santoro, V., Schiavon, M., & Celi, L. (2023). Role of soil abiotic processes on phosphorus availability and plant responses with a focus on strigolactones in tomato plants. *Plant and Soil 2023 494:1*, *494*(1), 1–49. https://doi.org/10.1007/S11104-023-06266-2

Santos, M., Morim, A. C., Videira, M., Silva, F., Matos, M., & Tarelho, L. A. C. (2024). Characteristics of Biochar Obtained by Pyrolysis of Residual Forest Biomass at Different Process Scales. *Energies 2024, Vol. 17, Page 4861*, *17*(19), 4861. https://doi.org/10.3390/EN17194861

Sarkar, B., Debnath, A., Chiu, A. S. F., & Ahmed, W. (2022). Circular economy-driven two-stage supply chain management for nullifying waste. *Journal of Cleaner Production*, *339*, 130513. https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2022.130513

Sena, K. N., Maltoni, K. L., Barbosa, M. C., & Araujo, E. G. de. (2025). Nutrient release and decomposition time of Eucalyptus urograndis harvest residues practices under Brazil tropical conditions. *Forest Ecology and Management*, *582*, 122558. https://doi.org/10.1016/J.FORECO.2025.122558

Shabbir, R., Javed, T., Hussain, S., Ahmar, S., Naz, M., Zafar, H., Pandey, S., Chauhan, J., Siddiqui, M. H., & Pinghua, C. (2022). Calcium homeostasis and potential roles in combatting environmental stresses in plants. *South African Journal of Botany*, *148*, 683–693. https://doi.org/10.1016/J.SAJB.2022.05.038

Shin, -H ;, Lee, D.-C. ;, Jeong, Y.-E. ;, Jung, Y. ;, Kim, J. ;, Baranowska, H., Stangierski, J., Ahn, K.-H., Shin, D.-C., Lee, Y.-E., Jeong, Y., Jung, J., & Kim, I.-T. (2023). Biochar Production and Demineralization Characteristics of Food Waste for Fuel Conversion.

Molecules 2023, Vol. 28, Page 6114, *28*(16), 6114. https://doi.org/10.3390/MOLECULES28166114

Shyam, S., Ahmed, S., Sanket, ·, Joshi, J., & Sarma, H. (2025). Biochar as a Soil amendment: implications for soil health, carbon sequestration, and climate resilience. *Discover Soil 2025 2:1*, *2*(1), 1–22. https://doi.org/10.1007/S44378-025-00041-8

Titus, B. D., Brown, K., Helmisaari, H. S., Vanguelova, E., Stupak, I., Evans, A., Clarke, N., Guidi, C., Bruckman, V. J., Varnagiryte-Kabasinskiene, I., Armolaitis, K., de Vries, W., Hirai, K., Kaarakka, L., Hogg, K., & Reece, P. (2021). Sustainable forest biomass: a review of current residue harvesting guidelines. *Energy, Sustainability and Society 2021 11:1*, *11*(1), 10-. https://doi.org/10.1186/S13705-021-00281-W

Trazzi, P. A., Higa, A. R., Dieckow, J., Mangrich, A. S., & Higa, R. C. V. (2018). BIOCARVÃO: REALIDADE E POTENCIAL DE USO NO MEIO FLORESTAL. *Ciência Florestal*, *28*(2), 875–887. https://doi.org/10.5902/1980509832128

Tu, P., Zhang, G., Wei, G., Li, J., Li, Y., Deng, L., & Yuan, H. (2022). Influence of pyrolysis temperature on the physicochemical properties of biochars obtained from herbaceous and woody plants. *Bioresources and Bioprocessing 2022 9:1*, *9*(1), 131-. https://doi.org/10.1186/S40643-022-00618-Z

Venkatesh, G., Gopinath, K. A., Reddy, K. S., Reddy, B. S., Prabhakar, M., Srinivasarao, C., Kumari, V. V., & Singh, V. K. (2022). Characterization of Biochar Derived from Crop Residues for Soil Amendment, Carbon Sequestration and Energy Use. *Sustainability 2022, Vol. 14, Page 2295*, *14*(4), 2295. https://doi.org/10.3390/SU14042295

Viana, D. G., Soares, M. B., Alleoni, L. R. F., Egreja Filho, F. B., Duckworth, O. W., & Regitano, J. B. (2024). Sugarcane straw biochar: effects of pyrolysis temperature on barite dissolution and Ba availability under flooded conditions. *Biochar 2024 6:1*, *6*(1), 83-. https://doi.org/10.1007/S42773-024-00371-W

Wang, J., & Wang, S. (2019). Preparation, modification and environmental application of biochar: A review. *Journal of Cleaner Production*, *227*, 1002–1022. https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2019.04.282

Xia, H., Riaz, M., Babar, S., Yan, L., Li, Y., Wang, X., Wang, J., & Jiang, C. (2023). " Assessing the impact of biochar on microbes in acidic soils: Alleviating the toxicity of aluminum and acidity." *Journal of Environmental Management*, *345*, 118796. https://doi.org/10.1016/J.JENVMAN.2023.118796

Zhang, M., Hu, Y., Han, W., Chen, J., Lai, J., & Wang, Y. (2023). Potassium nutrition of maize: Uptake, transport, utilization, and role in stress tolerance. *The Crop Journal*, *11*(4), 1048–1058. https://doi.org/10.1016/J.CJ.2023.02.009

Zhang, X., Yang, X., Yuan, X., Tian, S., Wang, X., Zhang, H., & Han, L. (2022). Effect of pyrolysis temperature on composition, carbon fraction and abiotic stability of straw biochars: correlation and quantitative analysis. *Carbon Research 2022 1:1*, *1*(1), 17-. https://doi.org/10.1007/S44246-022-00017-1

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

EFEITO DE AMBIENTES CONTRASTANTES NAS CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS DA MADEIRA EM ESPÉCIES DE *Corymbia*

Paulo Fernando Trugilho[1]; Jonas Zefanias Massuque[2]; Thiago de Paula Protásio[1]; Ana Luiza de Jesus Dias[1]; Maria Fernanda Martins Vilas Boas[1]; Genilson Maia Corrêa[1]; Elvis Vieira dos Santos[1]; Patrícia Leonídia dos Santos[1]

[1] Universidade Federal de Lavras, Escola de Ciências Agrárias de Lavras, Departamento de Ciências Florestais
[2] Lúrio University (Unilúrio), Faculty of Agrarian Sciences, Campus Universitário de Unango

Resumo: Todos compostos presentes na madeira estão associados a fatores genéticos, ambientais e de suas interações. Fatores como as condições climáticas locais podem interferir na biossíntese de tais componentes, modificando sua quantidade e qualidade. O objetivo da pesquisa foi avaliar a alteração na composição química da madeira em espécies de *Corymbia* plantadas em dois locais similares na altitude, temperatura média anual e precipitação pluviométrica, mas contrastantes na duração e severidade do período de seca. Quatro espécies de *Corymbia* foram utilizadas na pesquisa. Algumas características químicas da madeira foram avaliadas. O delineamento inteiramente casualizado disposto em esquema fatorial com dois fatores e com sete repetições foi utilizado. O efeito de espécie foi significativo para todas as características químicas avaliadas, exceto os teores de lignina insolúvel e total, enquanto os teores de extrativos solúveis em acetona, lignina solúvel, cinzas e holocelulose apresentaram efeito significativo de local. A interação foi significativa somente para o teor de lignina solúvel. O local com maior período e com seca mais severa, Paraopeba-MG, induziu nas espécies de *Corymbia* maiores teores de extrativos solúveis em acetona e cinzas, além de menores teores de holocelulose e lignina solúvel.

Palavras-Chave: Condição climática; Local; Seca; Qualidade da madeira

EFFECT OF CONTRASTING ENVIRONMENTS ON WOOD CHEMICAL CHARACTERISTICS IN *Corymbia* SPECIES

Abstract: All compounds present in wood are associated with genetic, environmental, and interactive factors. Factors such as places climatic conditions can interfere with the biosynthesis of such components, modifying their quantity and quality. This research aimed to evaluate the alteration on wood chemical composition in four *Corymbia* species planted in two locations

similar in altitude, average annual temperature and rainfall, but contrasting in the duration and severity of the drought period. Several chemical characteristics of the wood were evaluated. A completely randomized design arranged in a factorial scheme with two factors and seven replications was used. The species effect was significant for all chemical characteristics evaluated, except for insoluble and total lignin content, while the contents of acetone-soluble extractives, soluble lignin, ash, and holocellulose showed a significant effect of local. The interaction was significant only for the soluble lignin content. The local with the longest and most severe drought period induced higher levels of acetone-soluble extractives and ash, as well as lower levels of holocellulose and soluble lignin in *Corymbia* species.

Keywords: Climatic conditions, Local, Drought, Wood quality

1. Introdução

A parede celular dos tecidos que formam a madeira é formada por três componentes químicos fundamentais, a celulose, as hemiceluloses e a lignina. A celulose é um polímero de cadeia longa de elevada massa molecular, não ramificado e que apresenta cristalinidade. As hemiceluloses também são componentes poliméricos, mas de cadeiras ramificadas, amorfas e massa molecular bem menor que o da celulose. A celulose mais as hemiceluloses formam a fração de carboidratos da madeira denominada de holocelulose e pode representar até dois terços da massa seca de madeira.

A lignina é uma macromolécula de composição bem diferente tanto da celulose como das hemiceluloses. É o composto fenólico mais abundante da madeira. A qualidade da lignina pode ser mensurada em relação aos monômeros presentes na sua formação, ou seja, o guaiacilpropano (G), e o siringilpropano (S), nas folhosas. Entretanto, nas coníferas o monômero p-hidroxifenilpropano (H) também está presente em quantidades consideráveis (Chen, 1992). As hemiceluloses juntamente com a lignina formam uma matriz que reveste as fibrilas de celulose assegurando-lhe proteção.

É comum observar em vários trabalhos acadêmicos estudos da relação entre os monômeros S e G (relação S/G) como influenciador de alguns produtos da madeira, especialmente na produção de celulose e também como importante índice relacionado à fonte energética da madeira e derivados (Pereira et al; 2013; Gouvêa et al., 2015; Soares et al., 2015, Santos et al., 2026, Protásio et al., 2017).

Ouros compostos químicos também estão presentes na madeira, não de formação da parece celular dos tecidos, mas oriundos do metabolismo celular, os normalmente denominados de extrativos. Nesta categoria de compostos encontram-se várias substâncias químicas, que têm função de proteção, cheiro, cor e armazenamento de carbono, entre outras. Tais compostos podem ser produzidos em maior quantidade quando a planta está sob estresse, provocado por período de seca, por exemplo. Os extrativos da madeira desempenham papel duplo na fisiologia vegetal; atuando como fontes de energia de reserva para o metabolismo da planta e fornecendo mecanismos de defesa contra estresses ambientais (Almeida et al., 2022).

Nas células vegetais ainda se pode encontrar, em menor quantidade, os compostos minerais. Geralmente estes compostos são formados por óxido de cálcio, potássio, magnésio, manganês e ferro, além de sílica, e podem representar até 1% da massa seca nas madeiras de clima temperado e 5% nas tropicais. Na madeira de eucalipto plantada no Brasil geralmente está entre 0,2 e 0,8%, dificilmente ultrapassando 1% (Vieira, et al., 2023).

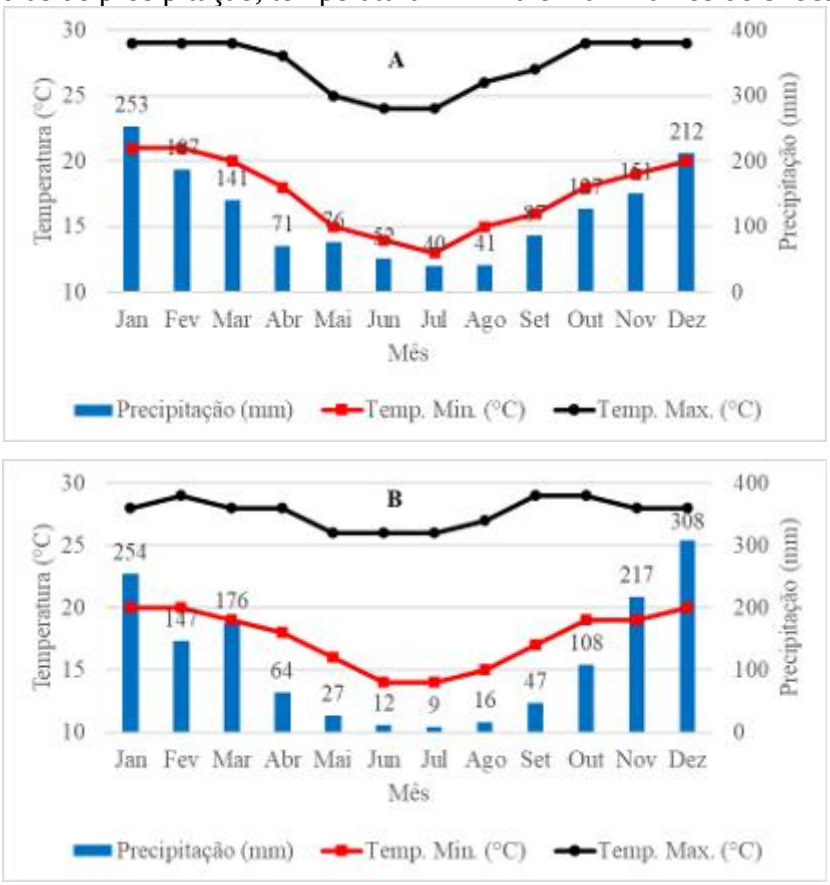
Estas características da madeira estão associadas a fatores genéticos, ambientais e de suas interações. A expressão fenotípica nos indivíduos sofre influência da interação genótipo x ambiente, isso ocorre devido ao fato das condições climáticas, por exemplo, características do solo, clima, entre outros, além do próprio material genético estarem ligado à produtividade o que, consequentemente, pode interferir tanto na quantidade quanto na qualidade dos compostos que compõem a madeira (Rosado et al., 2012).

Este trabalho teve por objetivo avaliar a alteração na composição química da madeira em espécies de *Corymbia* plantadas em dois locais similares na altitude, temperatura média anual e precipitação pluviométrica, mas contrastantes na duração e severidade do período de seca.

2. Material e Métodos

A Figura 1 mostra informações sobre a variação média da precipitação, temperatura máxima e mínima observadas em Borebi-SP (A) e Paraopeba-MG (B). As médias climatológicas são valores calculados a partir de série de dados de 30 anos observados. Paraopeba-Mg apresenta forte déficit hídrico em 4 meses, maio, junho, julho e agosto. O clima de Borebi-SP é classificado como subtropical úmido, com duas estações distintas: o verão chuvoso e o inverno seco, enquanto em Paraopeba-MG o clima é tropical de altitude, com uma estação seca e fria, e outra chuvosa e quente. Outras informações sobre os dois locais podem ser obtidas em Silva et al. (2022).

Figura 1 – Médias de precipitação, temperatura mínima e máxima nos dois locais avaliados



Fonte: https://www.climatempo.com.br

Este trabalho utilizou 57 árvores de quatro espécies de *Corymbia*, tendo sido amostradas seis árvores por espécie e em dois locais de plantio, um no Estado de São Paulo e outro em Minas Gerais. Os experimentos estão dentro do Programa Cooperativo, Melhoramento Florestal (Projeto - Espécies Potenciais) do IPEF. A relação das espécies utilizadas encontra-se na Tabela 1. Nos dois locais, a seleção das espécies foi realizada de acordo com Silva et al. (2017 e 2022).

Tabela 1 – Relação das espécies utilizadas

Espécie	Secção	Codificação
Corymbia citriodora subesp, citriodora	*Ochraria*	CC
Corymbia citriodora subesp. variegata	*Ochraria*	CCV
Corymbia henryi	*Ochraria*	CH
Corymbia torelliana	*Torellianae*	CT

A amostragem longitudinal no fuste das árvores consistiu na retirada de discos de 2,5 cm de espessura nas posições de 0% (base), 25%, 50%, 75% e 100% da altura comercial, considerada até o diâmetro de 4,0 cm. As árvores apresentam 6 anos de idade e foram colhidas em Borebi-SP, entre os meses de fevereiro e março de 2020, e em Paraopeba-MG, entre os meses de fevereiro e março de 2021. Nos discos foram retiradas amostras (maravalhas) com plaina elétrica manual em todas as posições longitudinais de amostragem no fuste das árvores. As maravalhas foram moídas em moinho de facas e o pó resultante foi classificado nas peneiras de 40 e 60 mesh, sendo utilizada a fração que ficou retida na malha de 60 mesh.

As características químicas avaliadas na madeira foram os teores de lignina solúvel e insolúvel, a relação entre os monômeros siringil (S) e guaiacil (G) da lignina, os extrativos solúveis em acetona e as cinzas. O teor de extrativos solúveis em acetona foi determinado com base a norma T280 pm-99 (TAPPI, 1999). O teor de lignina insolúvel foi determinado pelo método Klason conforme recomendado por Gomide e Demuner (1986). O teor de lignina solúvel foi determinado por espectroscopia UV conforme proposto por Goldschmid (1971). O teor de lignina total é a soma dos teores de lignina insolúvel e solúvel. O teor de cinzas foi obtido conforme a norma E1755-01 standard (ASTM, 2015). O teor de holocelulose foi obtido por meio da análise somativa, conforme a equação 1.

$$Holo = 100 - (Ligt + Ext + Ciz) \quad (1)$$

onde, Holo, Ligt, Ext e Ciz são, respectivamente, os teores de holocelulose (%), lignina total (%), extrativos em acetona (%) e cinzas (%).

A degradação da lignina, para posterior determinação da relação entre os monômeros S e G, foi realizada por meio da oxidação alcalina da madeira com nitrobenzeno, seguida de cromatografia líquida de alta eficiência para quantificação de seus derivados, de acordo com o método descrito por Lin e Dance (1992) e adaptado por Araujo et al. (2016).

Na avaliação dos experimentos foi utilizado o delineamento inteiramente casualizado disposto em esquema fatorial com dois fatores (local e espécie) e com sete repetições. O teste de agrupamento de Scott-Knott foi utilizado para classificar as espécies (α = 5%). O modelo do delineamento estatístico adotado está apresentado na equação 2.

$$Y_{ij} = \mu + E_i + L_j + EL_{ij} + \epsilon_{ij} \quad (2)$$

em que, Y_{ij} é o i-ésimo efeito de espécie no j-ésimo efeito de local, μ é um valor inerente a todas as observações, E_i é o i-ésimo efeito de espécie, L_j é o j-ésimo efeito de local, EL_{ij} é o efeito da interação e ε_{ij} é o termo de erro aleatório.

3. Resultados e Discussão

Na Tabela 2 encontra-se o resumo da análise de variância para as características químicas avaliadas na madeira. Pode-se observar que o efeito de espécie foi não significativo somente para os teores de lignina insolúvel e total, enquanto o efeito de local foi não significativo para os teores de lignina insolúvel, total e a relação siringil/guaiacil. O efeito da interação foi significativo somente para o teor de lignina solúvel. Interação significativa significa que existe dependência entre os fatores e que o seu desdobramento e a avaliação de um efeito dentro do outro deve ser realizada. Os teores de extrativos solúveis em acetona, cinzas e holocelulose foram afetados significativamente pelo local.

Tabela 2 – Resumo da análise de variância do delineamento estatístico adotado

FV	GL	QMExt	QMLigs	QMLigi	QMLigt	QMCiz	QMHolo	QMS/G
Espécie (E)	3	16,0311**	2,6624**	3,8401ns	2,5078ns	0,3303**	28,9666**	2,5544**
Local (L)	1	107,2891**	3,2292**	0,0533ns	2,4319ns	0,5041**	39,2744**	0,2164ns
E x L	3	1,6973ns	1,9162**	3,7867ns	0,6115ns	0,0753ns	2,7076ns	0.0581ns
Resíduo	49	0,9063	0,1426	1,8950	2,0013	0,0302	3,1912	0,2008
Média		4,48	3,67	25,02	28,69	0,76	66,49	2,99
CVe (%)		21,25	10,30	5,50	4,93	22,88	2,69	14,98

QMExt, QMLigs, QMLigi, QMLigt, QMCiz, QMHolo, QMS/G são os quadrados médios, respectivamente, para os teores de extrativos em acetona, lignina solúvel, lignina insolúvel, lignina total, cinzas, holocelulose e a relação siringil/guaiacil da lignina.

CVe = coeficiente de variação experimental, ** e ns = significativo a 1% e não significativo a 5% de probabilidade.

A Tabela 3 apresenta os valores médios e o teste de comparação múltipla realizado para os teores de extrativos em acetona, lignina insolúvel, lignina total e holocelulose. A espécie e o local que apresentaram, em média, os maiores teores de extrativos solúveis em acetona foi o *Corymbia torelliana* (CT) e o local 1 (Paraopeba-MG). Os teores de lignina insolúvel e total não variaram significativamente entre as espécies e locais. As espécies *Corymbia citriodora* subesp. variegata e *C. henryi* e o local 2 (Borebi-SP) apresentaram os maiores teores de holocelulose. O local 1 (Paraopeba-MG), por apresentar seca mais prolongada e severa, provocou estresse ambiental nas espécies que levou ao aumento no teor de extrativos, fato que está de acordo com Almeida et al. (2022), além da redução da holocelulose. Entretanto, a lignina, insolúvel e total, não apresentou nenhuma influência significativa tanto de espécie como de local.

Tabela 3 – Valores médios de extrativos em acetona, lignina insolúvel, total e holocelulose

Extrativos em Acetona		Lignina Insolúvel		Lignina Total		Holocelulose	
Espécie	Valor (%)	Espécie	Valor (%)	Espécie	Valor (%)	Espécie	Valor (%)
CH	3,54 b	CCV	24,24 a	CCV	28,33 a	CT	64,70 c
CCV	3,94 b	CH	25,26 a	CH	28,33 a	CC	66,17 b
CC	4,39 b	CT	25,27 a	CT	28,93 a	CCV	67,39 a
CT	5,93 a	CC	25,31 a	CC	29,15 a	CH	67,85 a
Local	Valor (%)	Local	Valor (%)	Local	Valor (%)	Local	Valor (%)
1	5,88 a	1	25,05 a	1	28,48 a	1	65,65 b
2	3,13 b	2	24,99 a	2	28,89 a	2	67,31 a

Valores médios seguidos de mesma letra nas colunas não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott em nível de 5% de probabilidade. 1-Paraopeba-MG, 2-Borebi-SP.

Os valores médios de extrativos em acetona ficaram abaixo da faixa observada por Barros Junior et al. (2026), que avaliaram duas progênies e nove clones híbridos de *Corymbia* com idade variando de 3 a 4 anos, enquanto os teores de lignina total e holocelulose estão dentro da faixa observada pelos autores. Loureiro et al. (2019), estudando clones híbrido de *Corymbia* aos 45 meses de idade, também obtiveram maiores valores médios de extrativos, porém menores teores de lignina total e de holocelulose na madeira.

Na Tabela 4 encontram-se os valores médios e o teste de comparação múltipla realizado para os teores de lignina solúvel, cinzas e a relação entre o monômero siringil (S) e guaiacil (G) da lignina. Como a interação entre espécie e local foi significativa para o teor de lignina solúvel foi realizado o seu desdobramento e avaliado o efeito de espécie dentro de local e vice versa.

Na avaliação do efeito de espécie dentro de local foi verificado que somente em Paraopeba-MG o efeito de espécie foi significativo, tendo a espécie *Corymbia citriodora* subesp. *variegata* (CCV) apresentado o maior teor de lignina solúvel. Na avaliação de local dentro de espécie, somente o *Corymbia henryi* (CH) apresentou diferença estatística, em que o local 2 (Borebi-SP) apresentou o maior teor. O teor de lignina solúvel da CH também foi afetado significativamente pelo local, que foi de maior teor no local que proporcionou o maior estresse ambienta, Paraopeba-MG, enquanto a relação S/G não sofreu nenhuma variação significativa, igual aos teores de lignina insolúvel e total. Pode-se verificar que o teor de cinzas foi mais

elevado na espécie *Corymbia torelliana* (CT) e no local 1 (Paropeba-MG). A relação S/G da lignina foi menor na espécie CT e os dois locais não apresentaram diferença significativa.

Tabela 4 – Valores médios dos teores de lignina solúvel, cinzas e relação siringil/guaiacil

Teor de Lignina Solúvel (%)			
Espécie	Local		Geral
	1 (Paraopeba-MG)	2 (Borebi-SP)	
CH	2,28 c B	3,85 a A	3,07 c
CT	3,58 b A	3,73 a A	3,66 b
CC	3,71 b A	3,97 a A	3,84 b
CCV	4,12 a A	4,07 a A	4,09 a
Geral	3,42 B	3,90 A	3,67

Teor de Cinzas (%)				Relação Siringil (S)/Guaiacil (G)			
Espécie	Valor	Local	Valor	Espécie	Valor	Local	Valor
CC	0,60 b	1	0,86 a	CT	2,39 b	1	3,05 a
CH	0,73 b			CH	3,12 a		
CCV	0,73 b	2	0,57 b	CCV	3,24 a	2	2,93 a
CT	0,96 a			CC	3,27 a		

Valores médios seguidos de mesma letra minúscula, nas colunas, e maiúscula, nas linhas não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott em nível de 5% de probabilidade. 1-Paraopeba-MG, 2-Borebi-SP.

Os valores médios de lignina solúvel estão maiores que o normalmente observado nos estudos envolvendo o gênero *Eucalyptus*, por exemplo, Araújo et al. (2016), exceto para a espécie *Corymbia henryi* (CH). O conteúdo de cinzas está de acordo com o observado por Barros Junior et al. (2026) e Loureiro et al. (2019), mas são valores mais elevados que o de espécies e clones de eucalipto plantados no Brasil (Vieira et al., 2021 e Teixeira et al., 2024). A relação S/G da lignina está dentro da faixa geralmente observada para os eucaliptos, conforme relatado por Santos et al. (2016) e Araújo et al., (2016), entretanto estão de acordo com os valores encontrados por Protásio et al. (2020), que estudaram 14 clones de *Eucalyptus* plantados em Minas Gerais.

4. Conclusões

Os resultados observados permitem concluir que:

- O efeito de espécie foi significativo para todas as características químicas avaliadas, exceto os teores de lignina insolúvel e total;
- O efeito de local foi significativo para os teores de extrativos solúveis em acetona, lignina solúvel, cinzas e holocelulose;

- O efeito da interação foi significativo somente para o teor de lignina solúvel;
- As espécies plantadas em Paraopeba-MG, local com maior período e com seca mais severa, apresentaram maiores teores de extrativos em acetona e cinzas, além de menores teores de holocelulose e lignina solúvel.

5. Agradecimentos

Os autores agradecem a FAPEMIG, CNPq e CAPES pelo auxílio concedido para a realização do presente trabalho.

6. Referências Bibliográficas

Almeida M., Picoli E., Moulin J., Guimarães L., Zauza E., Loos R., Hall K., Gomes, D., Conceição, G., Rodrigues, P., Vidaurre, G. (2022). Wood properties as potential biomarkers of physiological disorder tolerance: comparison of divergent *Eucalyptus* genotypes. Scientia Forestalis, 50, e3864. https://doi.org/10.18671/scifor.v50.22

Araújo, A. C.; Trugilho, P. F.; Napoli, A.; Braga, P. P. C.; Lima, R. V.; Protásio, T. P. (2016). Efeito da relação siringil/guaiacil e de fenóis derivados da lignina nas características da madeira e do carvão vegetal de *Eucalyptus* spp. Scientia Forestalis, Piracicaba, 44(110), p. 405-414. https://doi.org/10.18671/scifor.v44n110.13

ASTM (2015) E1755 − 01-Standard Test Method for Ash in Biomass. Man Hydrocarb Anal 6th Ed 01:545-545–3. https://doi.org/10.1520/mnl10913m

Barros Junior, U.O., Marcelino, P.R.C., João Gabriel Missia Silva, J.M., Lemos, A.V., Oliveira, A.F.C.F., Rocha, S.M.G, Araujo, S.L., Protásio, T.P., Almada Oliveira, C.V., Vidaurre, G.B. (2026). Classification of young *Corymbia* genotypes for steelmaking charcoal production based on their wood properties. New Zealand Journal of Forestry Science, 56(5). https://doi.org/10.33494/nzjfs562026x398x

Chen, L. C. Nitrobenzene and Cupric Oxide Oxidations. In: Dence, C. W.; Lin, S. Y.; Timell, T. E (1992). Methods in lignin chemistry. New York: Springer Verlag, p. 301-321. https://doi.org/10.1007/978-3-642-74065-7_21

Gomide, J. L., Demuner, B. J. (1986) Determinação do teor de lignina em material lenhoso

método klason modificado. O Papel 47(8), p. 36–38.

Goldschmid, O. (1971) Utraviolet spectra. In: Sarkanen K V., Ludwig C. H., Wiley Jhon (eds) Lignins: occurrence, formation, structure and reactions.occurrence, formation, structure and reactions. New York.; Wiley-Interscience, New York, p. 241–298.

Gouvêa, A. F. G; Trugilho, P. F.; Assis, C. O.; Assis, M. R.; Colodette, J. L.; Gomes, C. M. (2015). Avaliação do efeito da relação siringila/guaiacila da lignina de eucalipto na produção de carvão vegetal. Ciência da Madeira, 6(2), p.71-78. Doi: 10.12953/2177-6830/rcm.v6n2p71-78

Lin, S. Y.; Dence, C. W. (1992). Methods in lignin chemistry. Berlin: Springer Verlag, 578 p. https://doi.org/10.1007/978-3-642-74065-7

Loureiro, B, Vieira, T, Costa, L, Silva, A, Assis, M, Trugilho, P. (2019). Selection of superior clones of *Corymbia* hybrids based on wood and charcoal properties. Maderas Ciencia y Tecnología, 21, 619-630. https://doi.org/10.4067/S0718-221X2019005000417

Pereira, B. L. C.; Carneiro, A. D. C. O.; Carvalho, A. M. M. L.; Colodette, J. L.; Oliveira, A. C.; Fontes, M. P. F. (2013). Influence of chemical composition of *Eucalyptus* wood on gravimetric yield and charcoal properties. BioResources, 8(3), p. 4574-4592. https://doi.org/10.15376/biores.8.3.4574-4592

Protásio, T. P.; Trugilho, P. F.; Araújo, A. C. C.; Bastos, T. A.; Rosado, S. C. S.; Pinto, J. F. N. (2017). Classificação de clones de *Eucalyptus* por meio da relação siringil/guaiacil e das características de crescimento para uso energético. Scientia Forestalis, 45(114), p. 327-341. Doi: dx.doi.org/10.18671/scifor.v45n114.09

Rosado, A. M.; Rosado, T. B.; Alves, A. L.; Laviola, B. G.; Bhering, L. L. (2012). Seleção simultânea de clones de eucalipto de acordo com produtividade, estabilidade e adaptabilidade. Pesquisa Agropecuária Brasileira, 47(7), p. 966-973. https://doi.org/10.1590/S0100-204X2012000700013

Santos, R.C., Carneiro, A.C.O., Vital, B.R., Castro, R.V.O., Vidaurre, G.B., Trugilho, P.F., Castro, A.F.N.M. (2016). Influência das propriedades químicas e da relação siringil/guaiacil da madeira de eucalipto na produção de carvão vegetal. Ciência Florestal, 26(2), p. 657-669. https://doi.org/10.5902/1980509822765

Silva, P.H.M., Araujo, M.J., Lee, D.J., Bush, D., Baroni, G.R., De Paula, R.C. (2022). Adaptability and stability of novel eucalypt species and provenances across environments in Brazil at two assessment. New Forests, 53, p. 779–796. https://doi.org/10.1007/s11056-021-09886-7

Silva, P.H.M., Lee, D.J., Miranda, A.C., Marino, C.L., Moraes, M.L.T., De Paula, R.C. Sobrevivência e crescimento inicial de espécies de eucalipto em diferentes condições climáticas. (2017). *Sentia Forestalis*, v. 45, n. 115, p. 563–571. https://doi.org/10.18671/scifor.v45n115.13

Soares, V. C.; Bianchi, M. L.; Trugilho, P. F.; Höfler, J.; Pereira, A. J. (2015). Análise das propriedades da madeira e do carvão vegetal de híbridos de eucalipto em três idades. Cerne, 21(2), p. 191-197. https://doi.org/10.1590/01047760201521021294

TAPPI (1999) T 280 pm-99: acetone extractives of wood and pulp. TAPPI Methods.

Teixeira, V.; Carneiro, A.; Leite, H.; Trugilho, P.; Carvalho, A.; Castro, R. (2024). Selection of *Eucalyptus* genotypes for charcoal production based on using multivariate analysis. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 179, 106444 https://doi.org/10.1016/j.jaap.2024.106444

Vieira, T. A. S., Trugilho, P. F.; Carabineiro, S. A. C.; Zanuncio, A. J. V.; Carvalho, A. G.; Branco-Vieira, M. (2023). Impact of Chemical Composition on *Eucalyptus* Wood Clones for Sustainable Energy Production. Forests, 14, 2240. https://doi.org/10.3390/f14112240

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Efeito de soluções salinas na retratibilidade da madeira de *Pinus taeda*

Fernanda Niéri de Lima[1]; Kassiani de Fatima Bueno Ruth[1]; Nilson Costa Neto[1]; Flávia Alves Pereira[1]; Gabrieli De Paula Schultz[1]; Luana Maria dos Santos[1]; Érick Martins Nieri[1];

[1] Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Resumo: Este trabalho avaliou o efeito de soluções salinas sobre a retratibilidade da madeira de *Pinus taeda*. Foram utilizados 70 corpos de prova distribuídos em sete tratamentos, com dez repetições: testemunha em água destilada e soluções de sulfato de cobre (II), cloreto de sódio e sulfato de zinco, nas concentrações de 2,5% e 5,0%. Após 11 dias de imersão, as amostras foram secas gradualmente em estufa até 103 ± 2 °C. Determinaram-se o coeficiente anisotrópico, a retração volumétrica e a redução de massa durante a secagem. Os tratamentos salinos foram analisados em esquema fatorial 3 × 2, com análise adicional incluindo a testemunha. Sal, concentração e interação não influenciaram significativamente o coeficiente anisotrópico nem a retração volumétrica. Para a redução de massa, houve interação significativa entre sal e concentração. Assim, as soluções salinas alteraram a resposta gravimétrica da madeira, mas não promoveram melhoria significativa de sua estabilidade dimensional nas condições avaliadas.

Palavras-chave: Impregnação química; Higroscopicidade; Tratamento da madeira.

Effects of saline solutions on the dimensional stability of *P. taeda* wood

Abstract: This study evaluated the effect of saline solutions on the shrinkage behavior of *Pinus taeda* wood. Seventy specimens were assigned to seven treatments with ten replicates each: a distilled-water control and solutions of copper(II) sulfate, sodium chloride, and zinc sulfate at concentrations of 2.5% and 5.0%. After 11 days of immersion, the specimens were gradually oven-dried to 103 ± 2 °C. The anisotropy coefficient, volumetric shrinkage, and mass reduction during drying were determined. Saline treatments were analyzed using a 3 × 2 factorial design, followed by an additional analysis including the control treatment. Salt type, concentration, and their interaction had no significant effect on the anisotropy coefficient or volumetric shrinkage. Mass reduction, however, showed a significant interaction between salt type and concentration. Overall, the saline solutions affected the gravimetric response of the wood but did not significantly improve its dimensional stability under the conditions evaluated.

Keywords: Chemical impregnation; Hygroscopicity; Wood treatment.

1. Introdução

O gênero *Pinus* ocupa posição relevante no setor florestal brasileiro, com aproximadamente 1,84 milhão de hectares plantados em 2024, constituindo o segundo principal grupo de árvores cultivadas no país (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2025). Sua madeira abastece diferentes segmentos industriais, incluindo a produção de madeira serrada,

painéis e produtos destinados à construção civil e ao setor moveleiro (Indústria Brasileira de Árvores, 2025).

A madeira é um material higroscópico e, por isso, estabelece trocas de umidade com o ambiente (Thybring et al., 2022). Variações no teor de umidade provocam contração ou inchamento, afetando a estabilidade dimensional, a forma e o desempenho dos produtos de madeira (Sargent, 2019; Thybring et al., 2022). Essas alterações não ocorrem com a mesma intensidade nas direções anatômicas da madeira, razão pela qual a avaliação conjunta das contrações radial e tangencial é importante para estimar sua propensão a deformações (Sargent, 2019).

Em *Pinus taeda*, a movimentação dimensional pode variar de acordo com as características do material lenhoso. Palma e Ballarin (2003) observaram diferenças nas contrações radial, tangencial, longitudinal e volumétrica entre as regiões de madeira juvenil e adulta, demonstrando que a retratibilidade não deve ser considerada uniforme dentro da espécie. Essa variabilidade é particularmente relevante em materiais provenientes de plantios de menor idade, nos quais pode haver participação expressiva de madeira juvenil.

Entre as estratégias empregadas para melhorar a estabilidade dimensional está a modificação da madeira por impregnação, que busca reduzir sua interação com a água e, consequentemente, limitar os movimentos de contração e inchamento (Sargent, 2022). No caso das soluções salinas, a estabilização dimensional tem sido associada à presença dos sais na estrutura da madeira, que pode modificar sua interação com a umidade e, consequentemente, sua resposta dimensional (Paes et al., 2015). A eficiência desse tipo de tratamento, contudo, pode variar em função do agente empregado e das características do material lenhoso, resultando em diferentes respostas entre combinações de madeira e tratamento (Paes et al., 2015; Sargent, 2022).

Paes *et al*. (2015), ao avaliarem diferentes soluções salinas nas madeiras de *Corymbia torelliana* e *Eucalyptus cloeziana*, observaram que a resposta dimensional variou de acordo com a solução e o material lenhoso, evidenciando que o efeito do tratamento não deve ser generalizado entre diferentes combinações de sal e madeira. Diante disso, objetivou-se avaliar o efeito de soluções de sulfato de cobre (II), cloreto de sódio e sulfato de zinco, nas concentrações de 2,5% e 5,0%, sobre a estabilidade dimensional da madeira de *Pinus taeda*, por meio do coeficiente anisotrópico e da retração volumétrica, bem como sobre a redução de massa durante a secagem.

2. Material e métodos

O experimento foi conduzido no Laboratório de Tecnologia da Madeira da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), Campus Dois Vizinhos, com metodologia adaptada de Paes et al. (2015). Foram utilizadas 27 tábuas de *Pinus taeda*, provenientes de um plantio com 15 anos de idade, localizado em Cascavel, Paraná, e conduzido em espaçamento de 3 m × 3 m. As tábuas foram processadas na marcenaria da UTFPR para obtenção de 70 corpos de prova com dimensões de 2,5 × 2,5 × 10 cm, correspondentes às direções radial, tangencial e longitudinal, respectivamente.

Antes da impregnação, os corpos de prova foram secos em estufa com circulação de ar, a 103 ± 2 °C, até massa constante, sendo então determinadas a massa e as dimensões nas direções radial, tangencial e longitudinal. A densidade aparente anidra foi calculada pela razão entre a massa e o volume nessa condição, conforme a Equação 1:

$$\rho_0 = \frac{M_0}{V_0} \quad (1)$$

Em que: ρ_0é a densidade aparente anidra, em g cm^{-3}; M_0, a massa anidra, em g; e V_0, o volume anidro, em cm³.

Em seguida, foram determinados a massa e as dimensões nas direções radial, tangencial e longitudinal, utilizando-se balança analítica e paquímetro analógico. Esses valores corresponderam à condição anidra inicial dos corpos de prova.

Após o processamento, os corpos de prova foram numerados e identificados individualmente. Em cada amostra foram demarcados pontos fixos para as medições dimensionais, de modo que as avaliações subsequentes fossem realizadas nas mesmas posições durante todo o experimento.

O experimento foi conduzido em delineamento inteiramente casualizado, com sete tratamentos e dez repetições, sendo cada corpo de prova considerado uma unidade experimental. Os tratamentos consistiram na imersão da madeira em água destilada, utilizada como testemunha, e em soluções aquosas de sulfato de cobre (II), cloreto de sódio e sulfato de zinco, nas concentrações de 2,5% e 5,0% m/m (Tabela 1).

Tabela 1 – Composição das soluções utilizados no tratamento da madeira de *P. taeda*

Tratamento	Solução	Concentrações (%)
T1	Água destilada (testemunha)	-
T2	Sulfato de cobre II	2,5
T3	Sulfato de cobre II	5,0
T4	Cloreto de sódio	2,5
T5	Cloreto de sódio	5,0
T6	Sulfato de zinco	2,5
T7	Sulfato de zinco	5

Foram utilizados dessecadores de vidro independentes para cada tratamento. Os corpos de prova foram distribuídos aleatoriamente, com volumes iguais das respectivas soluções. Para assegurar a completa submersão, foram mantidos sob placas de porcelana com peso adicional. Os dessecadores foram submetidos a aplicações de vácuo intermitente, com duração aproximada de 10 min por aplicação, com a finalidade de favorecer a penetração das soluções na madeira.

Os corpos de prova permaneceram imersos durante 11 dias. Nesse período, foram realizadas cinco avaliações, em intervalos aproximados de 48h. Em cada avaliação, determinaram-se a massa e as dimensões nas direções radial, tangencial e longitudinal, utilizando-se balança analítica e paquímetro analógico. As medições intermediárias foram realizadas para acompanhar a estabilização dos corpos de prova. As medições foram efetuadas nos pontos previamente demarcados, conforme ilustrado na Figura 1.

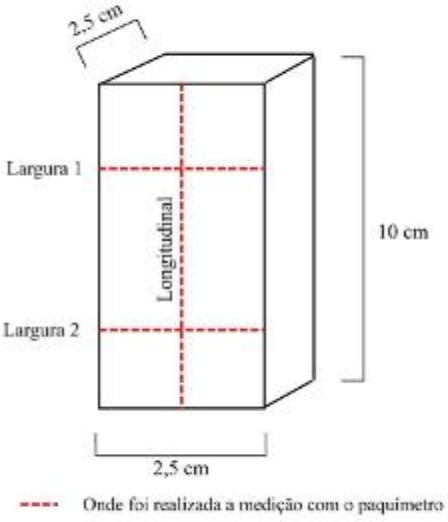


Figura 1 - Esquema das medições realizadas nos corpos de prova.

Após o período de imersão, os corpos de prova foram retirados das soluções e tiveram novamente sua massa e suas dimensões determinadas. Em seguida, foram submetidos à secagem em estufa com circulação de ar e, ao término do processo, foram novamente pesados e medidos nas posições previamente demarcadas.

O volume de cada corpo de prova foi calculado a partir das dimensões radial, tangencial e longitudinal, conforme a Equação 2. Para cada condição avaliada, foram utilizadas as dimensões correspondentes ao mesmo corpo de prova, permitindo acompanhar sua variação volumétrica ao longo do experimento.

$$V = R \times L \times T \quad (2)$$

Em que: V é o volume do corpo de prova, em cm³; R, a dimensão radial; T, a dimensão tangencial; e L, a dimensão longitudinal, todas em centímetros.

As contrações radial, tangencial e longitudinal foram calculadas em relação às dimensões, conforme as Equações 3, 4 e 5:

$$CR = \left(\frac{R_{sat.} - R_{103\,°C}}{R_{sat.}} \right) \times 100 \quad (3)$$

$$CT = \left(\frac{T_{sat.} - T_{103\,°C}}{T_{sat.}} \right) \times 100 \quad (4)$$

$$CL = \left(\frac{L_{sat.} - L_{103\,°C}}{L_{sat.}} \right) \times 100 \quad (5)$$

Em que: CR, CT e CL correspondem às contrações radial, tangencial e longitudinal, respectivamente; o subscrito sat representa a condição saturada; e o subscrito 103, a condição após a secagem a 103 ± 2 °C.

O coeficiente anisotrópico foi calculado pela razão entre as contrações tangencial e radial, de acordo com a Equação 6:

$$CA = \frac{CT}{CR} \quad (6)$$

Portanto, o coeficiente anisotrópico foi obtido a partir das contrações percentuais, e não diretamente da razão entre as dimensões tangencial e radial. Já a redução volumétrica foi determinada pela diferença percentual entre os volumes nas condições saturada e seca a 103 ± 2 °C, conforme a Equação 7:

$$RV = \left(\frac{V_{Sat.} - V_{103\,°C}}{V_{Sat.}} \right) \times 100 \quad (7)$$

Em que: RV é a redução volumétrica, em porcentagem; $V_{Sat.}$, o volume na condição saturada; e $V_{103°C}$, o volume após a secagem a 103 ± 2 °C.

A redução percentual de massa durante a secagem foi calculada conforme a Equação 8:

$$RM = \left(\frac{M_{Sat.} - M_{103\,°C}}{M_{Sat.}} \right) \times 100 \quad (8)$$

Em que: RM representa a redução de massa durante a secagem; $M_{Sat.}$, a massa na condição saturada; e $M_{103°C,}$ a massa após a secagem a 103 ± 2 °C. Essa variável representa a variação gravimétrica entre as duas condições, não sendo interpretada como perda de substância lenhosa.

Para a análise estatística principal, adotou-se um esquema fatorial 3 × 2, constituído por três soluções salinas, sulfato de cobre (II), cloreto de sódio e sulfato de zinco, e duas concentrações, 2,5% e 5,0%. A testemunha não foi incluída nessa análise por não corresponder a nenhum nível dos fatores solução salina e concentração. Foram avaliados os efeitos dos fatores solução salina, concentração e da interação entre eles sobre o coeficiente anisotrópico, a redução volumétrica e a redução de massa durante a secagem. Adicionalmente, realizou-se uma análise em delineamento inteiramente casualizado considerando os sete tratamentos individualmente, incluindo a testemunha, com dez repetições por tratamento.

A normalidade dos resíduos e a homogeneidade das variâncias foram avaliadas pelos testes de Shapiro–Wilk e Levene, respectivamente, além da inspeção do gráfico quantil-quantil. Quando necessário, aplicou-se transformação logarítmica, utilizada para o coeficiente anisotrópico na análise com os sete tratamentos.

Os dados foram submetidos à análise de variância, seguida pelo teste de Tukey a 5% quando constatado efeito significativo. O tamanho de efeito foi estimado pelo eta quadrado (η^2), utilizando-se o software Jamovi 2.7 (The Jamovi Project, 2026).

3. Resultados e discussão

Antes da impregnação, os corpos de prova apresentaram densidade aparente anidra média de 0,545 ± 0,091 g cm^{-3}. As médias dos grupos destinados aos diferentes tratamentos variaram de 0,512 a 0,575 g cm^{-3} e não diferiram significativamente entre si ($F_{(6,63)} = 0,885$; $p = 0,511$), indicando que os grupos apresentavam densidades iniciais semelhantes antes da aplicação dos tratamentos.

Os pressupostos de normalidade dos resíduos e homogeneidade das variâncias foram atendidos nas análises fatoriais, não sendo necessária a transformação dos dados. O tipo de sal, a concentração e a interação entre esses fatores não influenciaram significativamente o coeficiente anisotrópico nem a redução volumétrica da madeira de *P. taeda* (Tabela 2). Desse modo, o aumento da concentração de 2,5% para 5,0% não produziu resposta dimensional consistente, independentemente da solução utilizada.

Tabela 2 – Resumo das análises de variância e valores médios das variáveis avaliadas na madeira de *P. taeda*

Fonte de variação	**GL**	***F*** **CA**	***p*** **CA**	***F*** **RV**	***p*** **RV**	***F*** **RM**	***p*** **RM**
Sais	2	0,307	0,737	0,141	0,869	0,227	0,798
Concentração	1	2,396	0,127	1,358	0,249	2,417	0,126
Sais × Concentração	2	2,806	0,069	2,577	0,085	17,768	<0,001
Resíduo	54						
CV (%)		25,49		20,00		8,38	

Em que: CA = coeficiente anisotrópico; RV = redução volumétrica; RM = redução de massa durante a secagem; GL = graus de liberdade; CV = coeficiente de variação.

Embora não tenham sido observados efeitos significativos, as médias e os desvios-padrão das combinações entre soluções salinas e concentrações são apresentados na Tabela 3. Os valores médios do coeficiente anisotrópico variaram de 1,20 a 1,68. A ausência de efeito

significativo indica que os tratamentos não alteraram de forma comprovada o equilíbrio entre as contrações tangencial e radial.

Tabela 3 – Médias e desvios-padrão do coeficiente anisotrópico e da retração volumétrica da madeira de *P. taeda*

Solução salina	Concentração (%)	Coeficiente anisotrópico	Retração Volumétrica (%)
Sulfato de cobre(II)	2,5	1,54±0,35	10,9 ± 2,05
Sulfato de cobre(II)	5,0	1,52±0,31	11,6 ± 1,79
Cloreto de sódio	2,5	1,47±0,40	11,8 ± 2,89
Cloreto de sódio	5,0	1,46 ± 0,37	11,5 ± 2,02
Sulfato de zinco	2,5	1,20 ± 0,33	12,6 ± 2,29
Sulfato de zinco	5,0	1,68 ± 0,49	10,1 ± 2,46

Valores expressos como média ± desvio-padrão, com dez repetições por combinação.

Essas direções respondem de maneira distinta à perda de água em razão da organização anatômica e estrutural da madeira, caracterizando seu comportamento anisotrópico (Thybring et al., 2022). Além disso, por ser calculado pela razão entre duas contrações, o coeficiente pode apresentar maior dispersão quando pequenas variações ocorrem em uma dessas medidas, sem representar necessariamente uma alteração tecnológica consistente.

Os valores médios observados, entre 1,20 e 1,68, foram inferiores aos coeficientes de 2,1 a 2,5 relatados por Trianoski et al. (2013) para *P. taeda* e outras espécies do gênero. A comparação deve ser feita com cautela, pois os estudos diferem quanto à origem e à idade da madeira, à amostragem e ao procedimento de determinação da retratibilidade. Os menores valores do coeficiente anisotrópico indicam uma diferença relativamente reduzida entre as contrações tangencial e radial. Essa característica pode ter limitado a identificação de possíveis efeitos adicionais dos tratamentos salinos.

A redução volumétrica também permaneceu estatisticamente semelhante entre as soluções e concentrações. Embora a impregnação salina possa restringir a movimentação da parede celular pela ocupação de espaços acessíveis em sua estrutura, sua eficiência depende da

espécie, do composto e da quantidade efetivamente retida. Paes et al. (2015) verificaram respostas distintas entre sais e espécies de eucalipto, demonstrando que o efeito estabilizante não pode ser generalizado para outros materiais lenhosos. No presente estudo, não foram determinadas a penetração nem a retenção dos sais, o que impede atribuir a ausência de resposta dimensional a um mecanismo específico.

Em contraste com as propriedades dimensionais, a redução de massa apresentou interação significativa entre sal e concentração ($p<0,001$), com efeito de elevada magnitude ($\eta^2=0,385$). O aumento da concentração elevou a redução de massa no tratamento com cloreto de sódio, reduziu essa variável no sulfato de cobre (II) e não causou diferença significativa no sulfato de zinco (Tabela 4). Portanto, o efeito da concentração sobre a resposta gravimétrica dependeu da solução utilizada.

Tabela 4 – Redução de massa da madeira de *P. taeda* durante a secagem em função dos tratamentos salinos

Tratamento	Redução de Massa (%)	Grupo
Cloreto de Sódio 5,0%	56,1 ± 4,8	a
Sulfato de Cobre (II) 2,5%	55,0 ± 3,0	a
Sulfato de Zinco 5,0%	53,8 ± 4,5	ab
Sulfato de Zinco 2,5%	49,0 ± 5,2	bc
Cloreto de Sódio 2,5%	48,2 ± 4,7	bc
Sulfato de cobre (II) 5,0%	47,5 ± 3,2	c

Valores apresentados como média ± desvio-padrão. Médias seguidas por pelo menos uma letra em comum não diferem pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

A variação de massa pode estar relacionada tanto à solução absorvida pela madeira durante a imersão quanto aos sais que permaneceram após a secagem. Como essas duas contribuições não foram avaliadas separadamente, o resultado representa apenas a variação total de massa do material. Por isso, esses valores não devem ser associados diretamente à melhoria da estabilidade dimensional.

Na análise complementar com a testemunha, os tratamentos não influenciaram o coeficiente anisotrópico ($p=0,248$) nem a redução volumétrica ($p=0,363$). Para o coeficiente

anisotrópico, a inferência foi realizada após transformação logarítmica, necessária para adequar a normalidade dos resíduos. Em contrapartida, houve diferença entre os tratamentos para a redução de massa ($p<0,001$). Sulfato de cobre (II) a 5%, cloreto de sódio a 2,5% e sulfato de zinco a 2,5% apresentaram menores reduções de massa que a testemunha, mas essa resposta gravimétrica não foi acompanhada por redução da movimentação dimensional.

4. Conclusões

Não foram observados efeitos significativos das soluções de sulfato de cobre (II), cloreto de sódio e sulfato de zinco, nas concentrações de 2,5% e 5,0%, sobre o coeficiente anisotrópico e a retração volumétrica da madeira de *P. taeda*. Assim, não foi comprovada melhoria da estabilidade dimensional em relação à madeira imersa em água destilada.

A redução de massa variou conforme a combinação entre o sal e a concentração, mas essas diferenças não resultaram em alterações significativas na retratibilidade da madeira.

5. Agradecimentos

Agradecemos à Universidade Tecnológica Federal do Paraná por fornecer toda a estrutura e materiais necessários para a realização do trabalho, aos autores e orientadores pelo acompanhamento das atividades e às instituições fomentadoras o NAPI Wood Tech e a Fundação Araucária.

6. Referências bibliográficas

Indústria Brasileira de Árvores. (2025). *Relatório anual 2025*. https://iba.org/?publications=relatorio-anual-2025

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. (2025). *Produção da extração vegetal e da silvicultura 2024*. https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/agricultura-e-pecuaria/9105-producao-da-extracao-vegetal-e-da-silvicultura.html

Paes, J. B., Loiola, P. L., Oliveira, J. T. S., Braz, R. L., & Klitzke, R. J. (2015). Efeito de soluções salinas na estabilidade dimensional das madeiras de *Corymbia torelliana e Eucalyptus cloeziana*. *Scientia Forestalis*, 43(106), 271–281. https://www.ipef.br/publicacoes/scientia/nr106/cap03.pdf

Palma, H. A. L., & Ballarin, A. W. (2003). Propriedades de contração na madeira juvenil e adulta de *P. taeda* L. Scientia Forestalis, (64), 13–22. https://repositorio.unesp.br/entities/publication/a4be2d6b-8f57-4819-89d3-195cc8e5394f

Sargent, R. (2019). Evaluating dimensional stability in solid wood: A review of current practice. Journal of Wood Science, 65, Article 36. https://doi.org/10.1186/s10086-019-1817-1

Sargent, R. (2022). Evaluating dimensional stability in modified wood: An experimental comparison of test methods. Forests, 13(4), 613. https://doi.org/10.3390/f13040613

Thybring, E. E., Fredriksson, M., Zelinka, S. L., & Glass, S. V. (2022). Water in wood: A review of current understanding and knowledge gaps. Forests, 13(12), 2051. https://doi.org/10.3390/f13122051

The jamovi project. (2026). jamovi (Version 2.7) [Computer software]. https://www.jamovi.org

Trianoski, R., Matos, J. L. M. de, Iwakiri, S., & Prata, J. G. (2013). Avaliação da estabilidade dimensional de espécies de *Pinus* tropicais. Floresta e Ambiente, 20(3), 398–406. https://doi.org/10.4322/floram.2012.071

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Efeito do lixamento na rugosidade superficial em peças de madeiras comerciais

Marina Prates Hartungs de Lima[1]; Érika da Silva Ferreira[1]

[1] Centro de Engenharias (CEng), Universidade Federal de Pelotas (UFPel), Pelotas/RS, Brasil

Resumo: A qualidade superficial da madeira é um indicador fundamental de seu desempenho tecnológico, influenciando diretamente etapas de acabamento, colagem e aplicação de revestimentos. A pesquisa teve como objetivo avaliar o efeito da usinagem, especificamente o processo de lixamento, na rugosidade superficial de três espécies madeireiras comerciais: pinus (*Pinus* sp.), cedrinho (*Erisma uncinatum*) e grápia (*Apuleia leiocarpa*). O estudo foi conduzido no Laboratório de Painéis de Madeira (LAPAM) da UFPel. As amostras foram submetidas a uma sequência de lixamento manual com grãos 60, 120, 150, 220 e 320. A análise da rugosidade foi realizada utilizando um rugosímetro portátil digital, marca Mitutoyo, modelo SJ-210 178-561-02A, mensurando-se os parâmetros Ra, Rq e Rz. Os resultados demonstraram que o avanço na sequência de lixamento promoveu uma redução progressiva e significativa dos valores de rugosidade para todas as espécies, resultando em superfícies mais homogêneas. A madeira de grápia apresentou o melhor desempenho geral, com os menores valores de rugosidade ao final do processo, enquanto o cedrinho, apesar da maior rugosidade inicial, demonstrou uma resposta expressiva ao refinamento do acabamento. Concluiu-se que a sequência de lixamento, especialmente com o uso de grãos mais finos (220 e 320), é eficiente para melhorar a qualidade superficial da madeira, sendo uma etapa crucial para atender às exigências de acabamento industrial.

Palavras-chave: Usinagem da madeira; Acabamento; Análise da superfície.

Effect of sanding on surface roughness of commercial timber

Abstract: Surface quality is a fundamental indicator of wood's technological performance, directly influencing finishing, gluing, and coating processes. This study aimed to evaluate the effect of machining, specifically the sanding process, on the surface roughness of three commercial wood species: pine (*Pinus* sp.), cedrinho (*Erisma uncinatum*), and grápia (*Apuleia leiocarpa*). The study was conducted at the Wood Panel Laboratory (LAPAM) at UFPel. Samples were subjected to a manual sanding sequence using grits 60, 120, 150, 220, and 320. Surface roughness was analyzed using a portable roughness tester, measuring Ra, Rq, and Rz parameters. The results demonstrated that advancing the sanding sequence promoted a progressive and significant reduction in roughness values for all species, resulting in more homogeneous surfaces. Grápia wood showed the best overall performance, presenting the lowest roughness values at the end of the process, while cedrinho, despite its higher initial roughness, showed a significant response to finishing refinement. It is concluded that the sanding sequence, especially using finer grits (220 and 320), is efficient for improving wood surface quality, being a crucial step to meet industrial finishing requirements.

Keywords: Wood machining; Finishing; Surface analysis.

1. Introdução

A madeira é um dos materiais naturais mais importantes utilizados pelo ser humano, destacando-se por sua elevada relação resistência/peso, renovabilidade, versatilidade e facilidade de processamento. Essas características possibilitam sua ampla aplicação na construção civil, na indústria moveleira, na fabricação de pisos, esquadrias, painéis e diversos produtos de maior valor agregado. Além disso, por ser um recurso renovável proveniente de manejo florestal sustentável, a madeira apresenta vantagens ambientais em relação a diversos materiais convencionais, contribuindo para a redução das emissões de carbono e para o desenvolvimento de uma economia mais sustentável (Ross, 2010).

O crescente nível de exigência do mercado consumidor tem impulsionado a busca por produtos de madeira com melhor qualidade dimensional e superficial. Nesse contexto, a usinagem constitui uma das principais etapas do processamento mecânico da madeira, sendo responsável pela obtenção das dimensões finais das peças e pelo acabamento necessário para operações subsequentes, como colagem, pintura, envernizamento e revestimento superficial. Entretanto, a qualidade da superfície produzida depende da interação entre fatores relacionados às propriedades da madeira — como densidade, estrutura anatômica, teor de umidade e orientação das fibras — e às condições de usinagem, incluindo geometria da ferramenta, velocidade de corte, velocidade de avanço e estado de afiação (Csanády *et al.*, 2015).

Entre os parâmetros utilizados para avaliar a qualidade superficial da madeira usinada, a rugosidade superficial destaca-se por sua influência direta sobre o desempenho tecnológico e a qualidade final dos produtos. Conforme estabelece a ABNT NBR ISO 4287:2002, a rugosidade corresponde ao conjunto das irregularidades presentes na superfície de um material, sendo caracterizada por parâmetros obtidos a partir do perfil de rugosidade, como Ra, Rz e Rt, amplamente empregados na avaliação da textura superficial em processos industriais.

A qualidade da superfície usinada exerce influência significativa sobre propriedades como aderência de adesivos, absorção de tintas e vernizes, resistência ao desgaste, aparência visual e durabilidade dos produtos de madeira. Segundo Csanády *et al.* (2015), a rugosidade superficial constitui um dos principais indicadores da qualidade da usinagem, uma vez que reflete simultaneamente as características anatômicas da madeira e as condições empregadas durante o processo de corte. Dessa forma, superfícies com menor rugosidade tendem a apresentar melhor desempenho em aplicações que exigem elevado padrão de acabamento e maior estabilidade superficial. Pereira et al. (2018) verificaram a influência significativa da textura anatômica e do preparo superficial sobre os parâmetros de rugosidade em madeiras

amazônicas, demonstrando que tanto as propriedades da espécie quanto as condições de processamento interferem na qualidade final da superfície.

Assim, o presente trabalho teve como objetivo analisar o efeito do lixamento na rugosidade superficial das madeiras comerciais de pinus (*Pinus* sp.), cedrinho (*Erisma uncinatum*) e grápia (*Apuleia leiocarpa*).

2. Material e métodos

O estudo foi conduzido no Laboratório de Painéis de Madeira (LAPAM), vinculado ao curso de Engenharia Industrial Madeireira do Centro de Engenharias (CEng) da Universidade Federal de Pelotas (UFPel).

Obtenção do Material

Para o desenvolvimento do estudo foram selecionadas três espécies de madeiras comerciais amplamente utilizadas na região sul do Brasil, sendo elas: pinus (*Pinus* sp.), cedrinho (*Erisma uncinatum*) e grápia (*Apuleia leiocarpa*), todas adquiridas em uma madeireira localizada na cidade de Pelotas - RS.

Preparação das amostras e análise da superfície

As tábuas de madeira foram aplainadas no mesmo estabelecimento para proporcionar homogeneidade na espessura e largura e na sequência destopadas apresentando as dimensões finais nominais de 19,1 x 63,2 x 304 mm, perfazendo um total de 8 amostras por espécie com teor de umidade inicial variando entre 13,9% a 25,6%.

No LAPAM foi realizado o monitoramento do teor de umidade em ambiente com controle de umidade relativa do ar (65%) e temperatura (22ºC) até a climatização por um período de 15 dias. Sendo utilizado um medidor de umidade da madeira por indução com regulagem da densidade e espessura da peça, caracterizado por um método não destrutivo.

Após o processo de climatização a densidade aparente foi determinada para cada espécie por meio da pesagem em balança semi-analítica e mensurando-se a largura e espessura em três pontos com auxílio de paquímetro digital e micrômetro para aferição da espessura das peças.

A etapa seguinte foi caracterizada pelo processo de seleção dos grãos de lixas utilizados para a usinagem das amostras de acordo com a sequência: 60, 120, 150, 220 e 320 e realização do processo de lixamento manual com auxílio de um suporte plano de lixa, com o intuito de uniformizar a pressão aplicada sob a superfície de madeira, sendo cada granulometria aplicada

20 vezes em cada amostra no mesmo sentido de movimento paralelo a orientação das fibras / comprimento das peças.

A leitura da superfície para cada tratamento, com exceção das testemunhas, foi realizada após o emprego de cada grão de lixa, assim a mesma amostra foi utilizada para o tratamento seguinte. Para realização da leitura do perfil de rugosidade, Figura 1, cada amostra foi dividida em cinco partes com o objetivo de obter 40 leituras por tratamento (espécie x grão de lixa).



Figura 1 – Rugosímetro portátil digital, da marca Mitutoyo, modelo SJ-210178-6102ª

O equipamento utilizado para a avaliação da superfície foi um rugosímetro digital portátil digital, da marca Mitutoyo, modelo SJ-210 178-561-02A, com as seguintes especificações de leitura: percurso de avaliação de 4,0 mm e com um cut-off de 0,8 mm, verificando-se os parâmetros Ra, Rz e Rq. Após a obtenção de todos os dados, o equipamento gerou planilhas no Excel para apresentação dos parâmetros.

Análise Estatística

O delineamento experimental empregado foi fatorial com o objetivo de avaliar o efeito isolado da espécie de madeira e grão de lixa no acabamento das amostras. Houve necessidade de transformação matemática (log10) dos parâmetros determinados pelo rugosímetro (Ra, Rq e Rz) para atendimento aos requisitos necessários à análise estatística paramétrica.

Os resultados de cada parâmetro de rugosidade (Ra, Rq e Rz) foram submetidos separadamente à análise de variância (ANOVA) fatorial, considerando os efeitos dos materiais e sequências de lixamento. Quando observadas diferenças significativas, as médias foram comparadas pelo teste de Tukey, adotando-se nível de significância de 5%. O software

empregado para o processamento estatístico dos dados foi o *Statgraphics Centurion* XVII versão *trial*.

3. Resultados e discussão

Por meio da Tabela 1 é possível visualizar o monitoramento do teor de umidade e densidade aparente médios dos corpos de prova avaliados por espécie utilizada no presente estudo.

Tabela 1 - Valores médios para teor de umidade (T.U.) e densidade aparente para as espécies de madeira a avaliadas antes do processo de climatização (Inicial) e após, material climatizado

Espécie	Inicial		Climatizado	
	T.U. (%)	Densidade Aparente (g/cm^3)	T.U. (%)	Densidade Aparente (g/cm^3)
Pinus	19,55	0,61	10,04	0,54
Cedrinho	24,00	0,68	9,75	0,62
Grápia	17,85	0,88	9,15	0,82

A Tabela 2 apresenta os valores médios para os parâmetros Ra, Rq e Rz determinados no perfil de rugosidade para avaliação dos efeitos isolados (espécies de madeiras e grãos de lixas utilizados).

Tabela 2 - Valores médios para os parâmetros Ra, Rq e Rz determinados no perfil de rugosidade para cada efeito avaliado

Tratamento	Ra (µm)	Rq (µm)	Rz (µm)
Material			
Pinus	1,70[b] (0,21)	2,14[b] (0,31)	9,86[b] (0,98)
Cedrinho	1,79[b] (0,22)	2,24[b] (0,32)	10,43[b] (0,99)
Grápia	1,52[a] (0,16)	1,91[a] (0,26)	8,86[a] (0,93)
Grão de Lixa			
sem lixa	2,21[d] (0,30)	2,78[d] (0,41)	12,42[d] (1,06)
lixa 60	1,75[c] (0,22)	2,18[c] (0,32)	10,03[c] (0,98)
lixa 120	1,69[c] (0,21)	2,14[c] (0,32)	9,82[c] (0,99)
lixa 150	1,57[bc] (0,18)	1,96[bc] (0,28)	9,11[bc] (0,95)
lixa 220	1,45[ab] (0,15)	1,84[ab] (0,25)	8,69[ab] (0,93)
lixa 320	1,35[a] (0,12)	1,72[a] (0,23)	8,23[a] (0,90)

*

Médias seguidas pela mesma letra na coluna não diferem entre si a 5% de significância; () dados transformados matematicamente por Log10;

Quando os resultados foram analisados considerando apenas o efeito das espécies, verificou-se que a superfície da madeira de grápia apresentou os menores valores médios de rugosidade para todos os parâmetros avaliados (Ra = 1,52 µm, Rq = 1,91 µm e Rz = 8,86 µm), diferindo estatisticamente das demais espécies.

Por meio da análise da Tabela 2 complementada pela visualização da Figura 2, onde é apresentada a influência do efeito isolado da espécie e grão de lixa no parâmetro Rz, pode-se observar a mesma tendência constatada nos demais parâmetros avaliados.

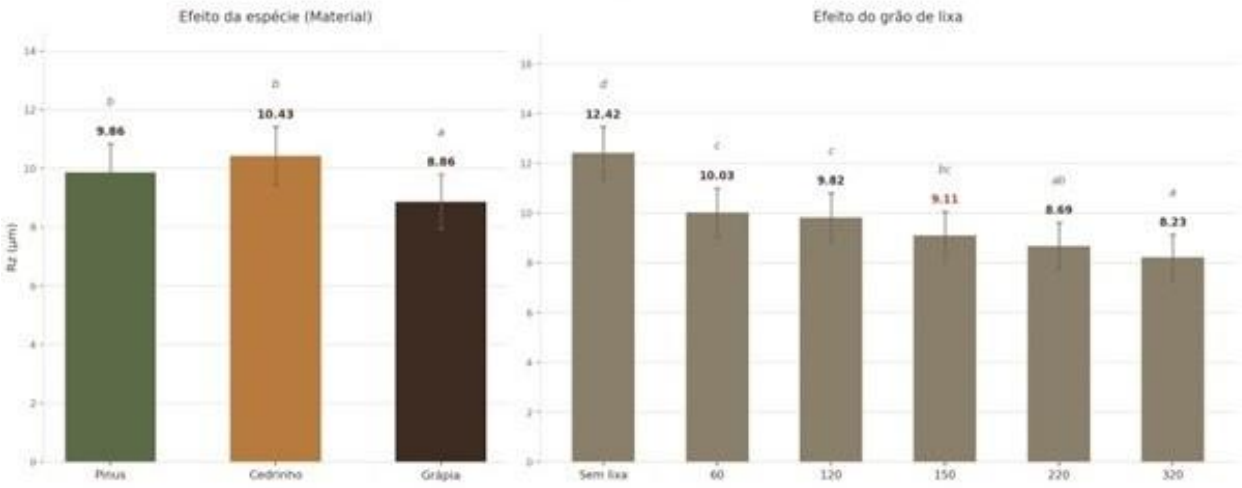


Figura 2 - Influência dos efeitos isolados (espécie e grão de lixa) na rugosidade superficial ao parâmetro Rz

As madeiras de pinus e cedrinho não apresentaram diferenças estatisticamente significativa entre si para os parâmetros médios. A madeira de grápia apresentou melhor desempenho geral. Embora não tenha diferido estatisticamente da lixa 220, a lixa 320 apresentou os menores valores médios de rugosidade e diferiu da lixa 150, enquanto a lixa 220 apresentou comportamento intermediário.

Sob o efeito da granulometria das lixas observou-se comportamento bastante consistente. A condição sem lixamento apresentou os valores médios mais elevados para todos os parâmetros (Ra = 2,21 µm, Rq = 2,78 µm e Rz = 12,42 µm), evidenciando a necessidade do acabamento superficial após o aplainamento.

A utilização da lixa 60 promoveu redução imediata da rugosidade, enquanto as lixas 120 e 150 proporcionaram refinamento progressivo da superfície. Entretanto, as maiores melhorias ocorreram com as lixas 220 e 320, que apresentaram os menores valores médios de rugosidade. Esse comportamento confirma que o emprego de granulometrias progressivamente mais finas reduz a altura dos picos e a profundidade dos vales presentes na superfície da madeira, proporcionando acabamento mais uniforme.

De maneira geral, observou-se que o avanço da sequência de lixamento promoveu redução gradual da amplitude dos perfis de rugosidade para todas as espécies estudadas. Esse comportamento indica que a utilização de lixas com granulometrias progressivamente mais finas favoreceu a remoção das irregularidades superficiais produzidas durante o aplainamento e pelas etapas anteriores de lixamento, resultando em superfícies mais homogêneas. Segundo

Csanády, Magoss e Tolvaj (2015), cada etapa do lixamento reduz a profundidade dos sulcos deixados pela operação anterior, proporcionando diminuição da rugosidade e melhoria da qualidade superficial da madeira.

4. Conclusões

Por meio dos resultados observados pode-se concluir que a sequência de lixamento exerceu influência direta na qualidade superficial das madeiras de pinus (*Pinus* sp.), cedrinho (*Erisma uncinatum*) e grápia (*Apuleia leiocarpa*).

Em todas as espécies avaliadas, observou-se redução dos parâmetros de rugosidade (Ra, Rq e Rz) à medida que foram utilizadas lixas de granulometrias mais finas, evidenciando a eficiência do processo de acabamento na melhoria da superfície da madeira.

5. Agradecimentos

Os autores agradecem a Universidade Federal de Pelotas - UFPel.

6. Referências bibliográficas

Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR ISO 4287:2002: especificações geométricas do produto (GPS) — Rugosidade: método do perfil — Termos, definições e parâmetros da rugosidade. Rio de Janeiro: ABNT, 2002.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR ISO 4288:2008: especificações geométricas do produto (GPS) — Rugosidade: método do perfil — Regras e procedimentos para avaliação da rugosidade. Rio de Janeiro: ABNT, 2008.

Carvalho, P. E. R. Espécies Arbóreas Brasileiras. Colombo: Embrapa Florestas, 2003.

Csanády, E.; Magoss, E.; Tolvaj, L. Quality of Machined Wood Surfaces. Cham: Springer, 2015. DOI: 10.1007/978-3-319-22419-0

Pereira, K. M. et al. Rugosidade da superfície de madeiras amazônicas em função da textura anatômica e do preparo superficial. Scientia Forestalis, v. 46, n. 119, 2018.

Ross, R. J. (Ed.). (2010). Wood handbook: Wood as an engineering material (Gen. Tech. Rep. FPL–GTR–190). U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. doi.org

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Efeito do peneiramento na determinação do teor de extrativos da madeira de *Eucalyptus*

José Pedro Brito Santos[1]; Dalton Longue Júnior[1]; Laura da Silva Rocha[1]; Victor Vinícius Sousa Martinelli Sales[1]; Elen de Sousa Barbosa[1]; Stéfany Vieira Silva[1]

[1] Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia

Resumo: A avaliação da qualidade da madeira é fundamental para garantir a eficiência dos processos industriais, especialmente sobre o teor de extrativos, que podem causar incrustações em equipamentos, sujidade na polpa e comprometer a qualidade do produto final. Assim, o objetivo foi avaliar a influência de diferentes condições de peneiramento da serragem na determinação do teor de extrativos da madeira de *Eucalyptus* sp. Foram utilizados serragem de cavacos industriais de eucalipto. Compararam-se o peneiramento manual e o padronizado (equipamento com controle de tempo e nível de vibração), utilizando diferentes massas de serragem, tempos e frequências de vibração das peneiras. Os resultados demonstraram que o aumento da massa de serragem na peneira reduziu o percentual da fração aceite e aumentou a fração de rejeito grosso, afetando a uniformidade granulométrica. O peneiramento padronizado apresentou melhor desempenho em relação ao manual, especialmente na condição de 10 min e 10 Hz, proporcionando maior eficiência na separação das partículas. Além disso, verificou-se que o teor de extrativos determinado pelo método da serragem foi mais influenciado pela massa utilizada no peneiramento. Assim, a padronização do peneiramento é essencial para aumentar a confiabilidade das análises químicas da madeira, sendo recomendada a utilização da condição de 10 min/10 Hz com no máximo 25 g de serragem por peneiramento.

Palavras-chave: Granulometria; Padronização; Química da madeira.

Effect of sieving on the determination of extractives content in *Eucalyptus* wood

Abstract: Assessing wood quality is fundamental to ensuring the efficiency of industrial processes, especially regarding the extractives content, which can cause incrustations in equipment, dirt in the pulp, and compromise the quality of the final product. This study aimed to evaluate the influence of different sawdust screening conditions on the determination of extractives content in *Eucalyptus* sp. wood. Industrial eucalyptus wood chips were used. Manual and standardized screening (equipment with time and vibration level control) were compared, using different sawdust masses, times, and vibration frequencies. The results showed that increasing the sawdust mass on the screen reduced the percentage of the accepted fraction and increased the thick reject fraction, affecting particle size uniformity. Standardized screening showed better performance compared to manual screening, especially under the conditions of 10 min and 10 Hz, providing greater efficiency in particle separation. Furthermore, it was found that the extractives content determined by the sawdust method was more influenced by the mass used in sieving. Thus, standardization of sieving is essential to increase the reliability of chemical analyses of wood, and it is recommended to use the 10 min/10 Hz setting with a maximum of 25 g of sawdust per screening.

Keywords: Particle size distribution; Standardization; Wood chemistry.

1. Introdução

O Brasil é um importante país produtor de polpa celulósica, exportando para importantes países como Estados Unidos, Chinas e União Europeia. Segundo dados da Indústria Brasileira de Árvores (IBÁ), em 2024 a produção nacional atingiu 25,5 milhões de toneladas de fibra curta. Essa produção é majoritariamente proveniente de madeiras de eucalipto, cujos plantios representam 76,9% da área plantada do país, evidenciando a crescente importância dessa cultura para economia florestal brasileira (IBÁ, 2025).

A caracterização da qualidade da madeira destinada à produção de polpa celulósica envolve compreender todo um conjunto de características e propriedades da madeira a ser utilizada. São exemplos dessa caracterização a constituição química, propriedades anatômicas e tecnológicas da transformação da madeira em polpa (Gomide et al., 2010). A madeira é composta principalmente por celulose, hemicelulose, lignina, extrativos e substancias inorgânicas, porém, a variabilidade entre espécies torna a composição química da madeira de difícil controle e previsão. (Colodette e Gomes, 2015). Os extrativos são parte dessa composição que causa grandes problemas na indústria, como incrustações em máquinas e impurezas no produto final, seja na polpa ou no papel. Portanto, é importante observar o teor de extrativos na seleção e avaliação da qualidade da madeira para a indústria celulósica. (Silvério et al., 2006)

Ainda, a análise da qualidade da madeira é muitas vezes demorada e custosa devido os reagentes químicos e os equipamentos, pelas análises serem realizadas em sua maioria por métodos analíticos em laboratório. De acordo com a norma TAPPI T 204 cm-17, a granulometria da serragem a ser utilizada na determinação do teor de extrativos deve estar entre as peneiras de 40-60 mesh. Entretanto, especificações visando o não entupimento da malha das peneiras, como a massa na peneira, o tempo de peneiramento e a vibração do aparelho podem ocasionar dúvidas e divergências entre laboratórios.

Diante disso, o objetivo do trabalho foi avaliar o efeito dos diferentes peneiramentos (manual e padronizado) na determinação do teor de extrativos da madeira de *Eucalyptus*.

2. Material e métodos

2.1 Local de coleta e materiais utilizados

Os cavacos foram coletados em empresa de polpa celulósica localizada no Extremo Sul da Bahia. A serragem foi produzida utilizando moinho de facas de tipo Willey. A serragem foi

classificada em peneiras de 40-60 mesh, onde a fração utilizada para as análises foram apenas as retidas na peneira de 60 mesh, conforme recomendado pela norma TAPPI T 257 (2012).

2.3 Avaliação do peneiramento da serragem

A avaliação do peneiramento da serragem foi realizada por meio de dois métodos: manual e padronizado. No método manual, as peneiras foram agitadas manualmente durante aproximadamente dois minutos. Para o peneiramento padronizado, utilizou-se um agitador de peneiras para análises granulométricas (modelo AGMAGB), com as seguintes combinações de tempo de peneiramento/nível de vibração das peneiras: 5 min/ 5 Hz, 5 min/ 10 Hz, 10 min/ 5 Hz e 10 min/ 10 Hz.

Em ambos os métodos, foram avaliadas no peneiramento, massas de 5, 15, 25, 60 g de serragem, sendo determinados os percentuais de aceite, rejeito grosso e rejeito fino após o peneiramento. Após a obtenção da fração aceite de cada tratamento, foi realizada à determinação do teor de extrativos das diferentes condições avaliadas.

2.3 Determinação do teor de extrativos

Para a determinação do teor de extrativos presentes na madeira, foram pesadas em balança analítica aproximadamente 2,000 g de serragem da fração aceita na peneira de 60 mesh. Em seguida, em aparelho do tipo Soxhlet, as amostras foram submetidas à extração por cinco horas, utilizando 150 mL de acetona, conforme a norma TAPPI 204 cm-17 (2017).

2.5 Análise estatística dos dados

Para a análise do peneiramento da serragem (cinco massas, dois níveis de vibração e dois tempos de peneiramento) foi aplicado o Teste de Identidade de Modelos, a 95% de probabilidade, conforme proposto por Regazzi (1993). Quando as equações referentes aos percentuais de material aceite, rejeito grosso e rejeito fino não apresentaram diferenças estatísticas significativas, foi ajustada uma equação comum aos tratamentos. Nos casos em que foram observadas diferenças estatísticas entre os modelos, as equações foram mantidas individualmente para cada tratamento.

Após a definição das melhores condições de peneiramento padronizado, foi determinado o teor de extrativos da madeira de eucalipto utilizando os tratamentos manual e padronizado (melhor desempenho), com as diferenças massas. Em seguida, aplicou-se o teste de

Tukey, a 95% de probabilidade, para comparar o teor de extrativos entre as diferentes massas de serragem.

3. Resultados e discussão

As condições de peneiramento influenciaram as frações granulométricas da serragem de eucalipto, afetando a homogeneidade do material e, consequentemente, afetando a precisão das análises subsequentes. Os percentuais de aceite (material retido na peneira de 60 mesh), rejeito grosso (material retido na peneira de 40 mesh) e rejeito fino (fundo da peneira) obtidos nos diferentes peneiramentos estão apresentados na Figura 1.

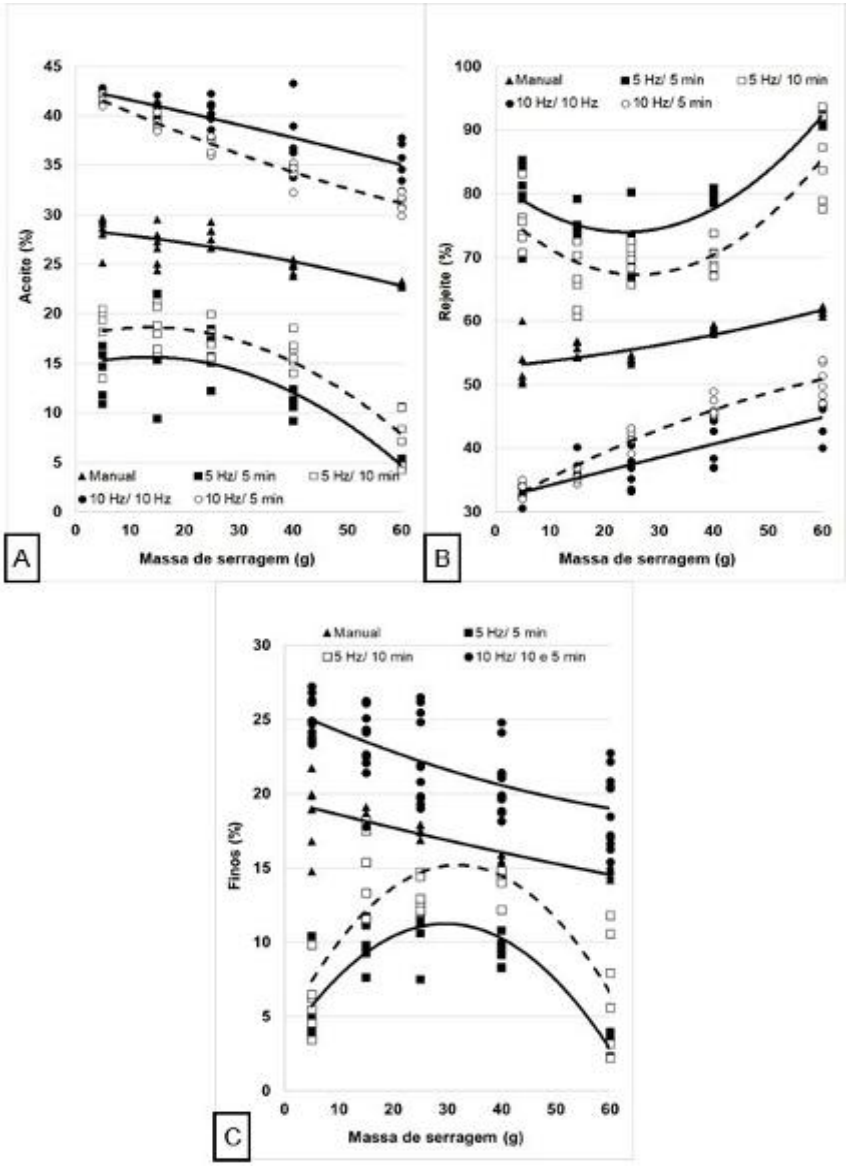


Figura 1 - Percentuais de serragem de eucalipto nos diferentes peneiramentos (manual e padronizado), com diferenças massas de serragem: “aceite – 40 mesh” (A), “rejeito grosso – 60 mesh” (B) e “rejeito finos - fundo da peneira” (C) da serragem de eucalipto

A fração aceite apresentou uma tendência de redução com o aumento da massa de serragem em todos os tratamentos avaliados (Figura 1A). Esse comportamento foi mais evidente nos tratamentos com maior frequência de vibração (10 Hz), independente do tempo (5 ou 10 min), ou seja, o aumento da massa promoveu maior retenção de partículas nas peneiras, devido a maior sobreposição de partículas e ao entupimento da malha da peneira.

Observando com atenção a Figura 1 e com base na metodologia que exige 2 g de amostra (com repetição 4 g), fica evidente que não devem ser peneiradas quantidades superiores a 15 g de serragem visando uma maior fração aceite no peneiramento.

A fração rejeito grosso apresentou um comportamento inverso ao da fração aceite, aumento do percentual de material retido à medida que a massa de serragem aumentou. Os tratamentos realizados com menor frequência de vibração (manual e 5 Hz), independente do tempo, apresentaram maiores percentuais de rejeite, ou seja, menor eficiência na fração granulométrica. (Figura 1B).

A fração de rejeitos finos apresentou uma tendência de redução mesmo nos tratamentos com frequência de 10 Hz, especialmente com o aumento de massa da serragem. Esse comportamento se relaciona a uma maior eficiência vibracional na passagem inicial das partículas finas pela peneira, reduzindo a permanência desse material durante o peneiramento (Figura 1C).

De acordo com o Teste de Identidade de Modelos, a maioria das equações ajustadas diferiu estatisticamente entre os tratamentos, ou seja, as condições operacionais influenciaram diretamente o comportamento da serragem. Entretanto, para a fração finos nos tratamentos 5 min/10 Hz e 10 min/10 Hz, não foram observadas diferenças estatísticas significativas entre os modelos, possibilitando o ajuste de uma equação em comum (Tabela 1). Esse comportamento semelhante entre os dois tratamentos indicou que a frequência de vibração exerceu maior influência que o tempo de peneiramento nessa fração granulométrica.

Os coeficientes de determinação (R^2) variaram entre 0,47 e 0,96, mas grande parte dos modelos tiveram um R^2 acima de 70%, ou seja, os ajustes das equações foram satisfatórios aos dados experimentais (Tabela 1). Os maiores valores de R^2 foram observados nos

tratamentos realizados com uma frequência de 10 Hz, evidenciado uma maior estabilidade e previsibilidade da distribuição granulométrica nessas condições experimentais.

Tabela 1 – Equações ajustadas (modelos) e coeficientes de determinação (R^2) para as frações granulométricas aceite, rejeito grosso e rejeito fino da serragem de eucalipto em diferentes peneiramentos

Tratamento	Fração granulométrica	Modelo	R^2
Manual	Aceite	$y = -0,0007x^2 - 0,0517x + 28,495$	0,6816
	Rejeite	$y = 0,0011x^2 + 0,0819x\ 52,771$	0,7165
	Finos	$y = 0,0002x^2 - 0,0933x + 19,504$	0,6570
5 Hz/5 min	Aceite	$y = -0,005x^2 + 0,1349x + 14,741$	0,7325
	Rejeite	$y = 0,0141x^2 - 0,6712x + 81,997$	0,7843
	Finos	$y = -0,0091x^2 + 0,541x + 3,2304$	0,7318
5 Hz/10 min	Aceite	$y = -0,005x^2 + 0,1362x + 17,721$	0,7901
	Rejeite	$y = 0,0159x^2 - 0,8263x + 52,771$	0,7165
	Finos	$y = -0,0108x^2 + 0,6901x + 4,2126$	0,6099
10 Hz/10 min	Aceite	$y = -0,0002x^2 - 0,1171x + 42,793$	0,6527
	Rejeite	$y = -0,0001x^2 + 0,2223x + 32,03$	0,7170
	Finos	$y = 0,0009x^2 - 0,1651x + 25,775$	0,4721
10 Hz/5 min	Aceite	$y = 0,0009x^2 - 0,2454x + 42,793$	0,9594
	Rejeite	$y= -0,0023x^2 + 0,4704x + 30,889$	0,9234
	Finos	$y = 0,0009x^2 - 0,1651x + 25,775$	0,4721

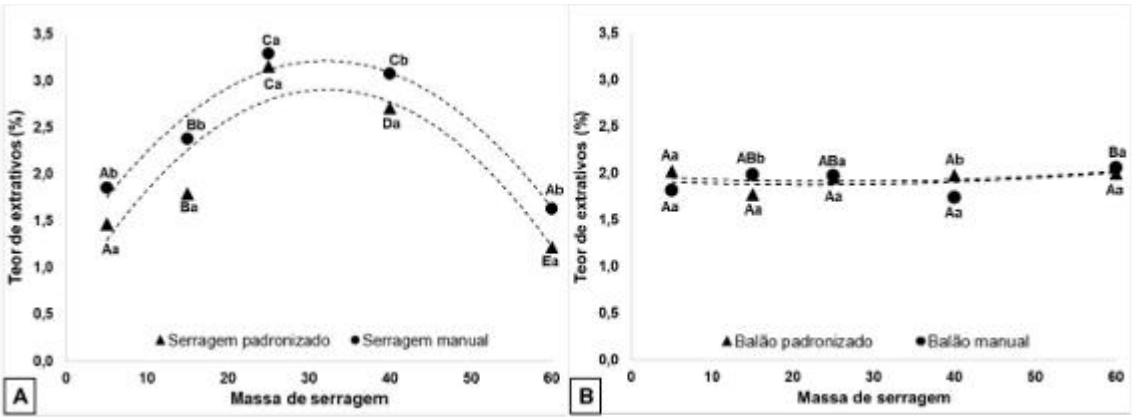
Os resultados obtidos neste estudo corroboram com Silva (2025), que demonstrou que a eficiência do peneiramento está diretamente relacionada à interação entre massa de serragem, tempo e frequência de vibração das peneiras. Segundo o autor, combinações envolvendo maior tempo e maior frequência promoveram melhor uniformização granulométrica do material. Comportamento semelhante foi observado no presente estudo, no qual o tratamento de 10 min/10 Hz apresentou maior eficiência na separação das frações granulométricas, reduzindo interferências operacionais e promovendo maior padronização da serragem.

De modo geral, observou-se que o peneiramento padronizado promoveu maior uniformidade granulométrica em comparação ao método manual e o tratamento 10 min/10 Hz foi escolhido como melhor tratamento. Esse comportamento está associado a maior eficiência do sistema automático (peneira vibratória) na movimentação e na separação das partículas, reduzindo interferências operacionais associadas ao peneiramento manual.

Após a realização de todos os peneiramentos, com a fração aceite obtida a partir de diferentes massas de serragem considerando o peneiramento padronizado (10 min/10 Hz) e manual, foram conduzidas extrações com acetona pelo método do balão e pelo método da serragem para determinação do teor de extrativos (Figura 2).

Para o método da serragem (Figura 2A), houve influência significativa da massa de peneiramento sobre o teor de extrativo obtido, tanto no peneiramento manual quanto no peneiramento padronizado, com aumento dos resultados até a massa de 25 g. Esse comportamento está relacionado a eficiência do peneiramento, sendo que massas elevadas comprometem a separação granulométrica e reduz a eficiência da extração de compostos solúveis.

Em contrapartida, no método do balão (Figura 2B), houve menor influência da massa de peneiramento sobre os teores de extrativos, com valores relativamente constantes entre os tratamentos avaliados. Esse comportamento demonstra que o método balão de pesagem é menos sensível às alterações operacionais do peneiramento.



Letras maiúsculas idênticas significam igualdade estatística das médias entre as diferentes massas. Letras minúsculas idênticas significam igualdade estatística das médias entre os tratamentos, pelo teste Tukey a 95% de probabilidade.

Figura 2 - Teor de extrativos da madeira de eucalipto obtido pelos métodos da serragem (A) e do balão (B), utilizando peneiramento manual e padronizado em diferentes massas de serragem.

Para madeira, a faixa de granulometria da serragem afeta o teor de extrativos e a intepretação dos resultados por várias técnicas espectroscópicas e ótica, como FTIR, MEV e DRX, sendo que serragem composta por partículas mais uniformes favorecem maior homogeneidade da área superficial de contato e interação mais uniformes entre solvente e biomassa, aumentando a repetibilidade das análises químicas (Viera et al., 2023). Essa tendência também foi discutida por Brito et al. (2014), que destacaram que menores

granulometrias aumentam a área de contato e a penetração dos reagentes, favorecendo a dissolução dos compostos químicos extraíveis.

Sendo assim, as alterações granulométricas podem aumentar a variabilidade dos resultados, evidenciando a importância da padronização do peneiramento e da massa de serragem utilizada nas análises químicas da madeira. No contexto industrial, essa padronização torna-se ainda mais importante, uma vez que análises rápidas, reprodutíveis e confiáveis são fundamentais para o controle de processo, monitoramento da qualidade da matéria-prima e tomada de decisão operacional.

4. Conclusões

O peneiramento padronizado utilizando tempo 10 min e tempo de vibração 10 Hz, combinado com massa de serragem de até 25 g proporcionaram maior uniformidade granulométrica da fração aceite.

O método do balão é menos sensível a granulometria da serragem, enquanto o método da serragem se mostrou mais variável aos resultados do teor de extrativos de madeiras de eucalipto.

5. Agradecimentos

A Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia pela infraestrutura para realização da pesquisa. Ao CNPq pelo fomento da bolsa de pesquisa. Ao Grupo de Pesquisa em Tecnologia de Produtos Florestais (Woodtech) pelo suporte científico.

6. Referências bibliográficas

Brito, R. F., Stangerlin, D. M., Calegari, L., Pariz, E., Calegari, C. A.; & Gatto, D. A. (2014). Influência da variação axial, radial e granulométrica da serragem na composição química da madeira de jurema-preta. Ciência da madeira, 5(2), 111-117. https://doi.org/10.12953/2177-6830.v05n02a05

Colodette, J. L.; & Gomes, F. J. B. (2015). Branqueamento de polpa celulósica. Editora UFV.

Gomide, J. L., Neto, H. F.; & Regazzi, A. J. (2010). Análise de critérios de qualidade da madeira de eucalipto para produção de celulose kraft. Revista Árvore, 34(2), 339-344. ISSN 0100-6762

Indústria Brasileira de Árvores. (2025). Relatório IBÁ 2025 ano base 2024. https://iba.org/wp-content/uploads/2025/10/IBA_relatorio_digital_POR.pdf

Silva, B. F. (2025). Estudo da metodologia de determinação do teor de extrativos da madeira de eucalipto (Bacharelado em Engenharia Florestal). Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia.

Silvério, F. O., Barbosa, L. C. A., Gomide, J. L., Reis, F. P.; & Piló-Veloso, D. (2006). Metodologia de extração e determinação do teor de extrativos em madeira de eucalipto. Revista Árvore, 30(9), 1009-1016.

Regazzi, A. J. (1996). Teste para verificar a identidade de modelos de regressão. Pesquisa Agropecuária Brasileira, 31(1), 1996. https://doi.org/10.1590/S1678-3921.pab1996.v31.4446

Technical association of the pulp and paper industry. (2017). TAPPI T 204 cm-17. Solvent extractives of wood and pulp.

Technical association of the pulp and paper industry. (2012). TAPPI T 257 cm-02. Sampling and preparing wood for analysis.

Vieira, R. M., Sanvezzo, P. B., Branciforti, M. C.; & Brienzo, M. (2023). Effects of particle size on the preparation of biomass samples for structural characterization. BioEnergy Research, 16, 2192-2203. https://doi.org/10.1007/s12155-023-10587-6

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Efeitos do Cancro nas Propriedades Físicas e Mecânicas da Madeira de *Khaya ivorensis*

Shoraia Germani Winter[1]; Letícia Benette Gonçalves[2]; Antônio José Vinha Zanuncio[2]; Olivia Pereira Lopes[2]; Amelia Guimarães Carvalho[2]

[1] Instituto de Química, Universidade Federal de Uberlândia; Uberlândia- Minas Gerais
[2] Instituto de Ciências Agrárias, Universidade Federal de Uberlândia; Monte Alegre- Minas Gerais

Resumo: O gênero *Khaya*, que é conhecido como mogno africano, chegou ao Brasil nos anos 70, com uma excelente adaptação edafoclimática, rapidamente se consolidou na produção de madeira nobre, em especial a espécie *K. ivorensis*. O desempenho da espécie vem sendo comprometido em decorrência da doença cancro, principalmente causado pelo fungo *Lasiodiplodia theobromae*, desta forma o presente trabalho teve como objetivo avaliar as propriedades físicas e mecânicas na madeira com e sem cancro. Os testes realizados forma de umidade de equilíbrio higroscópico, densidade básica, deformações nos planos axial, radical e tangencial, variação volumétrica e resistência à flexão estática. A presença do cancro aumentou a densidade básica, aumentou as deformações radial e tangencial, e a variação volumétrica, o que compromete a estabilidade dimensional, porém não levou a diferenças na resistência à flexão. A partir dessas informações é possível desenhar estratégias de manejo para minimizar perdas e melhorar o aproveitamento do mogno africano.

Palavras-chave: Mogno africano; Doenças florestais; Fungos fitopatogênicos.

Effects of Canker on the Physical and Mechanical Properties of *Khaya ivorensis* Wood

Abstract: The genus *Khaya*, known as African mahogany, was introduced to Brazil in the 1970s. Owing to its excellent edaphoclimatic adaptation, it quickly became established in the production of premium timber, particularly the species *K. ivorensis*. However, the species' performance has been increasingly compromised by canker disease, predominantly caused by the fungus *Lasiodiplodia theobromae*. Thus, the present study aimed to evaluate the physical and mechanical properties of wood affected and unaffected by canker. The tests performed included equilibrium moisture content, basic density, deformations in the axial, radial, and tangential planes, volumetric variation, and static bending strength. The presence of canker reduced basic density, increased radial and tangential deformations, and increased volumetric variation, thereby compromising dimensional stability; however, no significant differences were observed in static bending strength. Based on these findings, it is possible to devise management strategies to mitigate losses and improve the utilization of African mahogany.

Keywords: African mahogany; Forest diseases; Phytopathogenic fungi.

1. Introdução

O gênero *Khaya* compreende quatro espécies, *K. grandifolia, K. anthotheca, K. senegalensis* e *K. ivorensis* que são conhecidas como mogno africano, sendo advindas da região

da Savana Africana e que tiveram uma excelente adaptação as condições edafoclimática do Brasil (Pereira et al., 2026). Estudos de zoneamento indicam que cerca de 55% do território brasileiro possui aptidão para o cultivo da espécie (Reis et al., 2019). A madeira do mogno africano apresenta excelentes características físicas e mecânicas, que fazem dela uma madeira nobre e de alto valor agregado, sendo utilizada para móveis, obras civis e navais, laminados e instrumentos musicais (Caldeira et al., 2025).

A madeira de alta qualidade aliada a alta adaptabilidade ao clima brasileiro e alta remuneração, faz com que diversos produtores rurais optem por essa cultura, contando com mais de 50 mil hectares plantados, sendo a maioria em Minas Gerais (Caldeira et al., 2025; Faria et al., 2026). Mesmo apresentando adaptabilidade ao país, bom desenvolvimento, resultados econômicos favoráveis e boa produtividade, os sistemas florestais são ecossistemas complexos e necessitam de estudo sobre as características das espécies produzidas para melhor manejo (Gomes et al., 2024).

A introdução de espécies exóticas, como é o caso do mogno africano, pode levar a interação com pragas e doenças que não estão presentes em seu habitat natural, além de que pequenas alterações climáticas podem levar agravamento de problemas fitossanitários já conhecidos (da Silva et al., 2022). O cancro é uma doença fúngica em que ocorre ao longo do córtex da planta, onde se inicia com lesões e evolui para áreas tumorosas, dilaceradas, com aparência de cancro, sendo observado pela primeira vez na cultura no início dos anos 2000 (Falesi & Bittencourt, 2011)).

Entre os agentes causais do cancro, o fungo *Lasiodiplodia theobromae*, considerado o principal agente causal, foi identificado apenas em 2010 e apenas a partir desta data foi dado o inicia a pesquisa de formas de controle, sem a observação dos impactos a qualidade da madeira (Falesi & Bittencourt, 2011). O fungo *L. theobromae* já está presente em mais de 80% dos plantios de mogno africano, sendo um patógeno oportunista e degradador de matéria orgânica, além de apresentar diversidade de hospedeiros, como a seringueira e o cacaueiro, o que dificulta seu controle(Reis et al., 2019).

A importância e relevância do mogno africano, seja do ponto de vista financeiro ou produtivo, tende a continuar aumentando e se tratando de uma madeira nobre é de suma importância o controle de doenças e o entendimento do impacto das doenças na qualidade da madeira. Desta maneira, o presente estudo teve como objetivo comparar as propriedades físicas e mecânicas da madeira de *Khaya ivorensis* proveniente de árvores com e sem cancro.

2. Material e métodos

O estudo foi conduzido com amostras de madeira da espécie *Khaya ivorensis* (mogno-africano), em árvores matrizes com 14 anos de idade, cultivadas no município de Iraí de Minas (-19,00243778; -47,4065115), no estado de Minas Gerais, em uma propriedade particular com 230 hectares de floresta plantada. A região é classificada como clima Aw, segundo a classificação de Köppen.

A coleta da madeira foi feita a partir do abate de 6 árvores, sendo 3 apresentando sintomas visíveis de cancro e 3 visualmente saudáveis. Após o abate, as toras foram encaminhadas para processamento em serraria, onde foi retirada a primeira tábua do cerne para a confecção dos corpos de prova.

A caracterização física e mecânica foi feita através da metodologia estabelecida pela NBR 7190-3 (ABNT, 2022), que traz sobre métodos de ensaio para madeira em aplicações estruturais e tecnológicas. Os corpos de prova foram feitos seguindo 3 planos estruturais da madeira: Radial, perpendicular aos anéis de crescimento e passando pelo centro da secção transversal; Tangencial, paralelo à tangente dos anéis de crescimento; e Longitudinal, paralelo ao eixo das fibras. Após o corte, os corpos de prova foram acondicionados em ambiente com temperatura e umidade controlada até o momento dos ensaios.

Os corpos de prova foram medidos com paquímetro digital de alta precisão nas 3 direções principais da madeira: radial (R), tangencial (T) e longitudinal (L). A partir desses valores foi calculada as deformações específicas de cada direção (εr, εt, εl) e a variação volumétrica (Δv), parâmetros importantes para avaliar a estabilidade dimensional da madeira frente à variação de umidade.

A umidade de equilíbrio higroscópico (UEH) foi realizada com inicialmente os corpos de prova mantidos em temperatura e umidade constante até atingir massa constante, considerada a massa em equilíbrio higroscópico. Em seguida as amostras foram submetidas a secagem em estuda com circulação forçada de ar a 100 ±2ºC até atingir massa constante, considerada a massa anidra da madeira. A UEH foi calculada através da equação:

$$\text{UEH (\%)} = \frac{massa\,em\,euil\acute{i}brio\,higrosc\acute{o}pico\,(g) - massa\,anidra\,(g)}{massa\,anidra\,(g)}\,x\,100$$

A densidade básica da madeira foi determinada pela NBR 11941 (ABNT, 2003) a partir do método de balança hidrostática. O processo compreende a saturação, onde os corpos foram imersos em água sob vácuo até saturação dos vazios celulares; determinação do volume saturado, em que o volume saturado é obtido pelo princípio de Arquimedes em balança

hidrostática; e secagem, em estufa a 100 ±2ºC por 24 horas. A densidade básica (ρh) foi calculada através da equação:

$$\rho h = \frac{massa\ saturada\ (g)}{volume\ saturado\ (c\,m^3)}$$

Os corpos de prova, após secagem em estufa, foram resfriados em dessecador hermético para evitar reabsorção de água e na sequência realizadas novas medições dimensionais nas direções longitudinal, radial e tangencial, para determinar deformações específicas e variação volumétrica entre a madeira saturada e seca.

Os ensaios de flexão estática foram realizados conforme a NBR 7190-3 (ABNT, 2022), utilizando a máquina universal de ensaios Instron equipada com dispositivo para ensaio de flexão em três pontos. Foram utilizados 10 corpos de prova para cada tratamento, onde as amostras foram posicionadas sobre dois apoios com vão livre de aproximadamente 300 mm e uma carga vertical foi aplicada de forma centralizada em velocidade de 10mm/mim até a ruptura completa do corpo de prova.

As variáveis em distribuição normal serão avaliadas pelo teste t-Student e as variáveis que não atenderem a distribuição normal serão avaliadas pelo teste não paramétrico de Mann-Whitney, adotando nível de significância de 5% ($p<0,05$).

3. Resultados e discussão

Os resultados obtidos permitem observar que a presença do cancro levou a diferenças nas propriedades físicas, sendo que UEH, retração longitudinal e retração tangencial não apresentaram distribuição normal e foi aplicado teste Mann-Whitney e os valores de densidade, retração radial, variação volumétrica e tensão máxima de flexão apresentaram distribuição normal e foi aplicado o teste t-Student.

A Tabela 1 apresenta os resultados médios obtidos para as características físico e mecânicas para a madeira de mogno-africano com e sem a presença de cancro.

Tabela 1 – Propriedades física e mecânica da madeira de *K. ivorensis* com e sem cancro

Propriedade	Sem cancro	Com cancro
Umidade de Equilíbrio Higroscópico (%)	11,64 a*	11,92 a
Densidade básica (g/cm³)	0,411 a**	0,504 b
Retração tangencial (%)	5,72 a	6,27 b

Retração radial (%)	2,77 a	4,52 b
Retração axial (%)	0,45 a	0,53 a
Variação Volumétrica (%)	8,71 a	10,87 b
Flexão estática (MPa)	5,91 a	4,42 a

* Letras iguais em uma mesma linha não tem diferença estatística,

**Letras diferentes em uma mesma linha possuem diferença estatística.

Não houve diferença significativa para a UEH, isso evidencia que o cancro não modificou de forma relevante a capacidade higroscópica da madeira de *Khaya ivorensis*, sugerindo que os sítios de adsorção de água permaneceram funcionalmente preservados. Esse comportamento é compatível com o modo de ação de *Lasiodiplodia theobromae*, que afeta principalmente o câmbio e os tecidos vasculares, diferindo de agentes de podridão capazes de degradar de forma extensa celulose e hemiceluloses, alterando a higroscopicidade.

A densidade básica apresentou diferença estatística significativa entre os tratamentos, com valores superiores para a madeira proveniente de árvores com cancro (0,504 g/cm³) em comparação às árvores sadias (0,411 g/cm³). O mesmo comportamento foi relatado, para *Khaya grandifoliola* onde a presença do cancro promoveu um aumento significativo da densidade da madeira, passando de 0,44 g/cm³ em árvores sadias para 0,54 g/cm³ em árvores afetadas (Webber et al., 2021). Os autores demostraram que o cancro causado por *Lasiodiplodia theobromae* altera de forma significativa a anatomia da madeira de *Khaya grandifoliola*. As árvores afetadas apresentaram fibras com maior espessura de parede, redução na frequência e no diâmetro dos vasos e modificações nas dimensões do lúmen, evidenciando o impacto direto do patógeno sobre o câmbio e a formação dos tecidos condutores, indicando que o estresse provocado pela infecção resulta em uma reorganização estrutural da madeira. Dessa forma causando a alteração na densidade da madeira (Webber et al., 2021).

As deformações tangencial e radial também foram significativamente maiores na madeira com cancro, indicando maior instabilidade dimensional. A retração tangencial aumentou de 5,72% para 6,27%, enquanto a retração radial passou de 2,77% para 4,52%. A maior variação volumétrica observada nas amostras com cancro (10,87%) reforça essa interpretação, evidenciando que a doença compromete a estabilidade dimensional — atributo importante para aplicações industriais que exigem precisão dimensional, como fabricação de móveis e componentes estruturais.

Por outro lado, não houve diferença significativa na retração axial, que apresentou valores baixos e semelhantes entre os tratamentos (0,45% e 0,53%).

A resistência à flexão estática também não apresentou diferença estatística entre os grupos, com valores de 5,91 MPa para madeira sadia e 4,42 MPa para madeira com cancro. O cancro não comprometeu a integridade mecânica da madeira para o esforço de flexão.

De forma geral, os resultados indicam que o cancro promove alterações estruturais suficientes para modificar a densidade e a estabilidade dimensional da madeira, mas não afeta significativamente sua resistência mecânica nem sua capacidade higroscópica. A madeira de árvores com cancro pode ser utilizada em aplicações que não demandem elevada estabilidade dimensional, desde que sejam adotadas estratégias adequadas de secagem e processamento.

4. Conclusões

Os resultados demonstram que a presença do cancro em árvores de *Khaya ivorensis* provoca alterações estruturais capazes de modificar de forma significativa algumas propriedades físicas da madeira, especialmente a densidade, as retrações radial e tangencial e a variação volumétrica.

Por outro lado, propriedades como a umidade de equilíbrio higroscópico e a resistência à flexão estática não foram influenciadas de maneira significativa, sugerindo que o cancro não compromete a capacidade de adsorção de água nem a integridade mecânica da madeira sob esforços de flexão. Assim, embora a doença reduza a estabilidade dimensional, aspecto crítico para usos que exigem precisão, a madeira proveniente de árvores com cancro mantém desempenho mecânico compatível com aplicações menos sensíveis a variações dimensionais.

5. Agradecimentos

Este trabalho foi viabilizado, em parte, pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) - Processo APQ-05311-24; APQ-04599-25; APQ 04100-23 e pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) - Processo n° 444395/2024-5.

6. Referências bibliográficas

Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). (2003). *NBR 11941 Madeira - Determinação da densidade básica*. www.abnt.org.br

Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). (2022). *NBR 7190-3: Projeto de estruturas de madeira Parte 3: Métodos de ensaio para corpos de prova isentos de defeitos para madeiras de florestas nativas*. www.abnt.org.br

Caldeira, M. V. W., Gomes, G. S. L., Momolli, D. R., Gomes, R., Duarte, V. B. R., Faria, J. C. T., Godinho, T. de O., Dias, H. M., Pereira, M. G., & Kulmann, M. S. de S. (2025). Seasonal dynamics of carbon and nutrients in litter in Khaya stands in Southeastern Brazil. *Cerne*, *31*(1). https://doi.org/10.1590/01047760202531013506

da Silva, E. S., Augusti, M. L., de Medeiros, R. D., Lima, A. C. S., de Albuquerque, J. de A. A., Dos Santos, B. R., & Portela, E. C. (2022). Occurrence of Naupactus optatus (Coleoptera: Curculionidae) in african mahogany in Brazil. *Ciencia Florestal*, *32*(2), 1011–1023. https://doi.org/10.5902/1980509843120

Falesi, I. C., & Bittencourt, I. C. F. P. de M. (2011). Pragas e Doenças da Khaya ivorensis A. Chev. – Mogno Africano. *1° Workshop Brasileiro de Mogno Africano*, 12.

Faria, J. C. T., Atala, L. R., dos Santos Azevedo, C., Caldeira, M. V. W., de Oliveira Godinho, T., & Piña-Rodrigues, F. C. M. (2026). Clonal Propagation of Khaya spp.: Epicormic Shoot Emission in Adult African Mahogany Species. *Forest Science*. https://doi.org/10.1007/s44391-026-00073-9

França, T. S. F. A., Arantes, M. D. C., Paes, J. B., Vidaurre, G. B., Oliveira, J. T. D. S., & Baraúna, E. E. P. (2015). Características anatômicas e propriedades físico-mecânicas das madeiras de duas espécies de mogno africano. Cerne, 21, 633-640. https://doi.org/10.1590/01047760201521041877

Gomes, G. S. L., Caldeira, M. V. W., Gomes, R., Duarte, V. B. R., Momolli, D. R., Faria, J. C. T., Godinho, T. de O., Trazzi, P. A., Sobrinho, L. S., Oliveira Neto, S. N. de, & Schumacher, M. V. (2024). Biomass Production and Nutritional Sustainability in Different Species of African Mahogany. *Forests*, *15*(11). https://doi.org/10.3390/f15111951

Pereira, T. de C. A., Devolio, G. A. T., Roque, C. G., Alvarez, R. de C. F., Campos, C. N. S., Cotrim, M. F., Prado, R. de M., Junior, R. A., Vazquez, G. H., Sanches, A. C., & Navarrete, A. A. (2026). Cattle manure and biological fertilizer enhance growth and nutrient accumulation in African mahogany seedlings (Khaya ivorensis). *Frontiers in Soil Science*, *6*. https://doi.org/10.3389/fsoil.2026.1717364

Reis, C. A. F., De Oliveira, E. B., & Santos, A. M. (2019). *Mogno-africano (Khaya spp.): atualidades e perspectivas do cultivo no Brasil*. Embrapa Florestas. www.embrapa.br/fale-conosco/sac/

Webber, T. V., Martins, T. V., Cândida, D. V., Reis, C. A. F., da Cunha, M. G., Sette, C. R., & Dianese, É. de C. (2021). Control techniques and evaluation of pathogen influence on African mahogany (Khaya grandifoliola C. Dc.) infected by Lasiodiplodia theobromae Pat. *European Journal of Plant Pathology*, *159*(2), 427–432. https://doi.org/10.1007/s10658-020-02153-z

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Eficiência do *Cellpose* na automatização da análise de vasos em clones de *Eucalyptus grandis* × *urophylla*

Ana Carolina de Oliveira Cruz[1], William Alves Santana da Silva[1], Gabriel Amado Ferreira Lauria[1], Jordão Cabral Moulin[1]

[1] Departamento de Ciências Florestais e da Madeira, Universidade Federal do Espírito Santo, Jerônimo Monteiro/ES, Brasil;

Resumo: Devido à alta demanda por eucalipto, é necessário intensificar pesquisas sobre a anatomia, especialmente os vasos do xilema. Porém, pesquisas sobre essas estruturas são numerosas e os métodos de análise são normalmente trabalhosos e demorados. Dessa forma, o objetivo do presente trabalho é treinar um modelo no software *Cellpose* para segmentação automatizada e compará-lo ao método de segmentação manual. Para isso, foram utilizadas 275 imagens, que continham 19.250 Regiões de Interesse para o treinamento do modelo criado. Foram analisados e medidos dados sobre a porcentagem da madeira ocupada por vasos, área dos vasos, diâmetro dos vasos e frequência dos vasos. Para os métodos manuais, foi utilizado o software *ImageJ*. Com exceção do diâmetro dos vasos, que apresentou dados superestimados, o modelo treinado no *Cellpose* demonstrou elevada eficiência e concordância com o método de medição manual para a maioria das variáveis analisadas, mostrando-se uma ferramenta promissora para estudos anatômicos da madeira.

Palavras-chave: Anatomia da madeira; Poros; Segmentação de imagens.

Efficiency of *Cellpose* in automating vessel analysis in *Eucalyptus grandis* × *urophylla clones*

Abstract: Due to the high demand for eucalyptus, it is necessary to intensify research on anatomy, especially xylem vessels. However, research on these structures is numerous, and the analysis methods are usually laborious and time-consuming. Thus, the objective of the present study is to train a model in the *Cellpose* software for automated segmentation and compare it with the manual segmentation method. For this purpose, 275 images were used, containing 19,250 Regions of Interest for training the created model. Data on the percentage of wood occupied by vessels, vessel area, vessel diameter, and vessel frequency were analyzed and measured. For manual methods, the *ImageJ* software was used. Except for vessel diameter, which showed overestimated data, the model trained in *Cellpose* demonstrated high efficiency and agreement with the manual measurement method for most of the analyzed variables, proving to be a promising tool for wood anatomical studies.

Keywords: Wood anatomy; Pores; Image segmentation

1. Introdução

O xilema é um tecido complexo responsável principalmente pela pode ser condução de água e sais minerais das raízes para as demais partes da planta, sendo constituído por diferentes

tipos de células, entre as quais se destacam os elementos de vaso, importantes para o transporte de água. Estudos sobre variações estruturais e anatômicas do xilema permitem compreender as diferentes estratégias de adaptação dos indivíduos arbóreos, além de contribuir para a avaliação da qualidade da madeira e para o aprimoramento do manejo florestal de florestas plantadas (Geng et al., 2018; Malavasi; Davis; Malavasi, 2016; Balzano; Merela; De Micco, 2024).

A segmentação e a mensuração manual dos vasos, embora amplamente utilizadas na análise de imagens anatômicas da madeira, são procedimentos demorados e dependentes da experiência do avaliador, podendo resultar em maior variabilidade entre análises. Além disso, o tempo necessário para a identificação e mensuração das estruturas limita a quantidade de imagens que pode ser analisada, dificultando a avaliação de grandes conjuntos de dados (Kotowska; Wright; Westoby, 2020; Pires, 2023).

Ferramentas que possibilitam automatizar o processo de análise apresentam vantagens, como redução do esforço necessário para a segmentação e a possibilidade de ampliar a quantidade de imagens analisadas de forma mais rápida e padronizada. Entre essas ferramentas, destaca-se o *Cellpose*, um software de segmentação baseado em aprendizado profundo (*deep learning*), desenvolvido em *Python* e originalmente destinado à segmentação de células e outras estruturas em imagens. (Stringer et al., 2021).

Assim, o *Cellpose* utiliza redes neurais para gerar mapas de fluxo que auxiliam na identificação e segmentação das regiões de interesse (ROI), ou seja, os vasos presentes nas imagens da madeira. Dessa forma, cada pixel pertencente a um objeto é associado a um vetor de fluxo direcionado em relação ao centro do objeto, permitindo ao modelo identificar seus limites e a determinar sua forma para posterior geração da máscara de segmentação (Saad et al., 2023).

Além disso, o software permite a criação de modelos personalizados, que podem ser treinados e ajustados de acordo com as características específicas das imagens analizadas. Pachitariu e Stringer (2022) avaliaram o desempenho do *Cellpose* 2.0 na segmentação automatizada de imagens, comparando-o aos modelos TissueNet e LiveCell. Utilizando modelos pré-treinados e agrupamento das imagens de acordo com suas características, o *Cellpose* apresentou desempenho superior em diferentes conjuntos de dados, mesmo quando treinado com aproximadamente 500 a 1.000 regiões de interesse (ROIs) por categoria, enquanto os modelos comparativos utilizaram entre 81 mil e 200 mil ROIs.

Portanto, o presente trabalho teve como objetivo o treinar um modelo no software *Cellpose* para a identificação e segmentação automatizada de vasos da madeira de E. *grandis x E. urophylla*, visando determinar a porcentagem da área da madeira ocupada por vasos, a área e

o diâmetro dos vasos e sua frequência, além de comparar os resultados obtidos pelo modelo automatizado com aqueles provenientes da análise manual.

2. Material e métodos

a. Amostragem da madeira

Foi utilizado um mesmo clone de *E. grandis* x *E. urophylla*, aos 6 anos de idade, pertencentes a empresa Suzano S.A. As árvores foram provenientes de plantios localizados em São Paulo, Maranhão e Bahia. Foram coletadas discos de 2,5 cm de espessura de cinco árvores de cada localidade na região do DAP (1,30 m do solo) de cada árvore. Da região do alburno de cada disco foi retirado um corpo-de-prova com dimensões de 2 x 2 x 3 cm (tangencial x radial x longitudinal) para confecções de lâminas histológicas.

b. Preparo das lâminas histológicas

Visando facilitar o corte da madeira, os corpos-de-prova foram fervidos em água por aproximadamente 6 horas. Em seguida, foram submetidos à obtenção de cortes em micrótomo de deslize (Leica SM 2000R), no plano transversal, com 20 µm de espessura. Os cortes foram utilizados para preparação das lâminas histológicas.

Após a obtenção, os cortes obtidos foram acondicionados em placas de Petri, lavados com solução de hipoclorito de sódio comercial diluído a 60% e posteriormente corados com safranina. Em seguida, foram confeccionadas as laminas histológicas temporárias para obtenção das imagens utilizadas nas análises.

c. Delimitação da fotomicrografia da lâmina histológica

Após a preparação das lâminas histológicas, foram obtidas fotomicrografias com o auxílio de um microscópio ótico (Zeiss: Axio Scope.A1), acoplado com uma câmera (Axiocam MRc5), utilizando o software Zeiss Zen 3.10. Com a objetiva de 5× foram obtidas 25 fotomicrografias por lâmina, totalizando 350 imagens.

Do total de imagens obtidas, 275 foram usadas para o treinamento e desenvolvimento do modelo no *Cellpose*, e 75 foram destinadas à avaliação do modelo treinado. Nessas 75 imagens, as mensurações dos vasos foram realizadas tanto pelo *Cellpose* quanto manualmente, utilizando o software *ImageJ*, permitindo a comparação entre os dois métodos.

As imagens apresentaram dimensões de 2580 x 1936 µm e foram subdivididas em quatro quadrantes de 1 mm². Para as análises, foi utilizado um quadrante de cada imagem, no qual foram realizadas, pelos métodos manual e automatizado as mensurações do diâmetro e

da área dos vasos, da porcentagem da área da madeira ocupada por vasos e da frequência dos vasos.

d. Segmentação manual

Os quadrantes de 1 mm² selecionados em cada fotomicrografia foram utilizados para a mensuração manual do diâmetro tangencial, da área e da frequencia dos vasos, além da determinação da porcentagem da área da madeira ocupada por vasos. As análises foram realizadas no software *ImageJ*, seguindo as recomendações da norma IAWA (1989).

Para a determinação da frequência, foram contabilizados os vasos completamente contidos no interior do quadrante, ou seja, aqueles que apresentavam 100% de sua área dentro da área de análise, sendo essa medida denominada “frequência 100%”. Adicionalmente, foram contabilizados os vasos que apresentaram 50% ou mais da sua área inserida no quadrante, conforme recomendado pela IAWA (1989), sendo essa medida denominada “frequência 50%”.

e. Criação e Treinamento do modelo no *Software Cellpose*

Foi desenvolvido um modelo no software *Cellpose* para a segmentação e mensuração automatizada dos vasos da madeira de eucalipto. Para avaliar o desempenho do modelo, as mensurações obtidas pelo *Cellpose* foram comparadas àquelas realizadas manualmente nas mesmas imagens. Ao longo do trabalho esses procedimentos foram denominados método manual e método automatizado (*Cellpose)*.

A segmentação automatizada foi realizada utilizando o Software *Cellpose*, versão 3.1.0, instalado por meio do Anaconda Power Shell Prompt. Para o treinamento do modelo, foi utilizado o método *human-in-the-loop* descrito por Pachitariu e Stringer, (2022), no qual as segmentações inicialmente realizadas pelo modelo são avaliadas e corrigidas pelo usuário, permitindo o seu aprimoramento progressivo (Figura 1).

Assim, foram usadas 275 fotomicrografias, com dimensões de 2584 x 1936 pixels, para o treinamento do modelo, nas quais foram identificadas e segmentadas manualmente 19.250 regiões de interesse (ROIs). Neste estudo, cada ROI correspondeu a um vaso individual previamente delimitado nas imagens e utilizado para o treinamento do modelo.

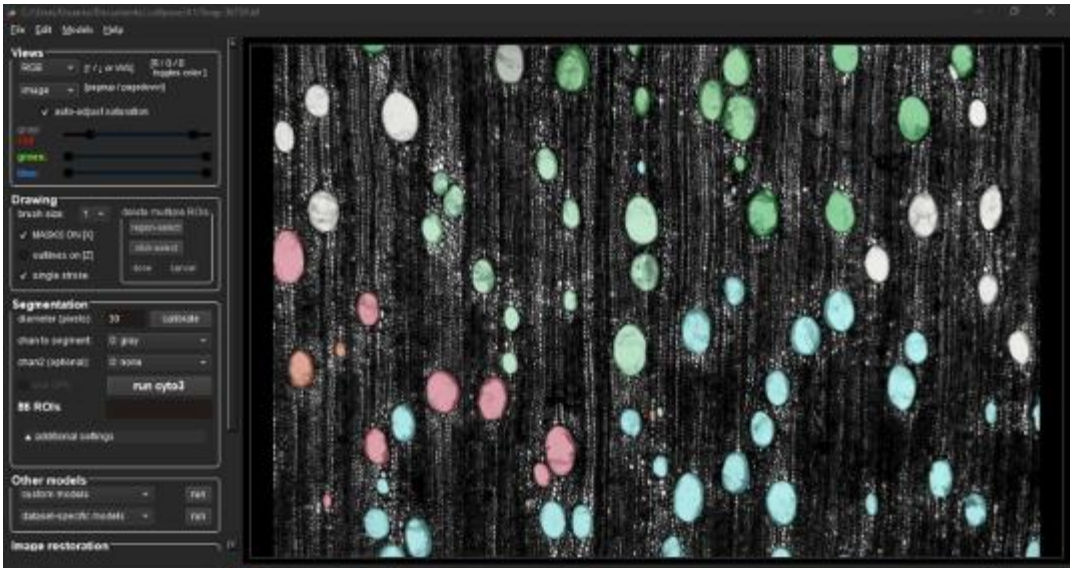


Figura 1 - Fotomicrografia segmentada dentro do Software *Cellpose.*

f. Extração automatizada das características dos vasos

Para a extração automatizada das características dos vasos a partir das segmentações geradas pelo *Cellpose*, foi desenvolvido o aplicativo *CellposeApp*, em linguagem Python. O aplicativo possibilitou a identificação e a mensuração dos vasos, permitindo determinar a frequência dos vasos inteiros (frequência 100%), a frequência dos vasos com 50% ou mais de sua área inserida dentro do quadrante (frequência 50%), a área individual e total dos vasos, a porcentagem da área da madeira ocupada por vasos e o diâmetro dos vasos.

Para a determinação do diâmetro do vaso, o aplicativo utilizou uma bounding box (caixa delimitadora) ao redor de cada vaso segmentado. O comprimento da bounding box no eixo X foi utilizado para determinar a dimensão do vaso nesse eixo, correspondendo ao diâmetro tangencial quando o eixo X estava orientado nessa direção.

g. Análise estatística e validação do modelo

Para comparar as medições realizadas manualmente e as medições a partir do modelo criado no *Cellpose*, foi verificada a distribuição dos dados, quando não apresentou distribuição normal, foi feito o teste não paramétrico de Wilcoxon. Para verificarmos a progressão do treinamento realizado no modelo criado no *Cellpose*, foi realizado um gráfico de perdas.

3. Resultados e discussão

A curva de perda do modelo apresentou redução acentuada nas primeiras épocas, seguida de estabilização dos valores aproximadamente a partir da 20ª época (Figura 2). Esse comportamento indica a redução progressiva dos erros durante o treinamento e a estabilização do modelo nas etapas subsequentes.

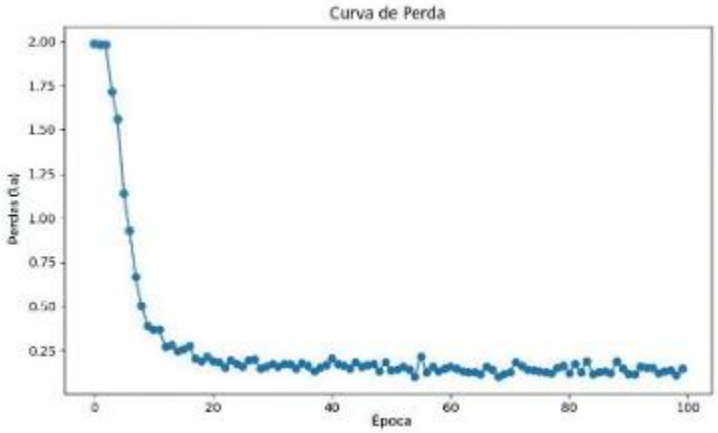


Figura 2 – Curva de perda do modelo durante o treinamento com 275 imagens ao longo de 100 épocas.

Para as frequências de vasos 100% e 50%, os dados apresentavam distribuição normal e não diferiram estatisticamente entre os métodos manual e *Cellpose* (Tabela 1). Na frequência 100%, os valores foram de 9,98 e 10,60 vasos mm², enquanto na frequência 50% foram de 11,93 e 11,68 vasos mm², para os métodos manual e *Cellpose*, respectivamente. A proximidade entre os valores indica que o modelo foi capaz de reproduzir satisfatoriamente a contagem dos vasos nas duas condições avaliadas.

A Figura 3A e B demonstra distribuição semelhante da frequência de vasos entre o método manual e o modelo *Cellpose*. Para os vasos 100% inseridos no quadrante, ambos os métodos apresentaram distribuição entre aproximadamente 6 a 16 vasos/mm², com maior concentração dos valores entre 9 e 11 vasos/mm². Para a frequência de 50%, os valores apresentaram distribuição semelhante, com maior concentração entre 10 e 13 vasos/mm². Esses resultados reforçam a capacidade do modelo em reproduzir a frequência de vasos obtida pelo método manual.

Tabela 1 – Valores médios da frequência de vasos medidos manualmente e no *Cellpose*

Característica	Manual	*Cellpose*
Frequência 100% (n/mm²)	9,98 **a** (2,51)*	10,60 **a** (2,54)
Frequência 50% (n/mm²)	11,93 **a** (2,68)	11,68 **a** (2,66)

Valores seguidos da mesma letra na linha não diferiram estatisticamente pela Anova (p≥0,05). *Valores entre parênteses correspondem ao desvio padrão.

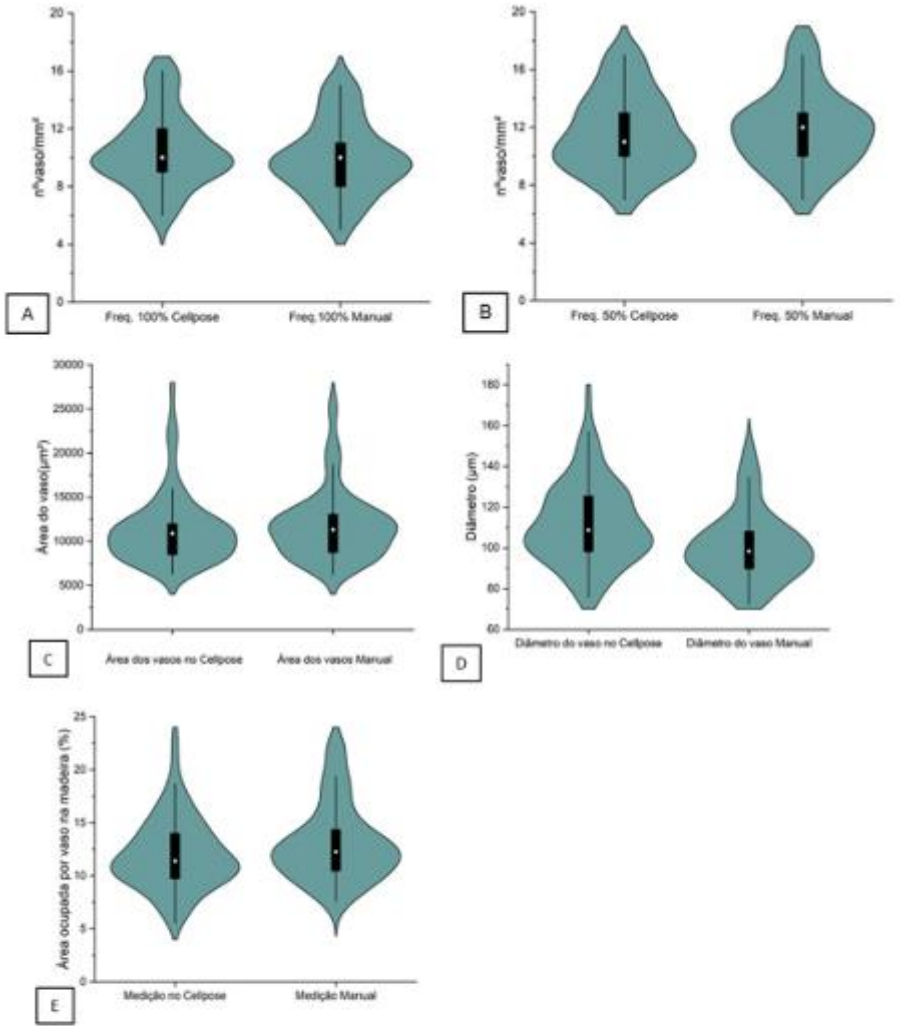


Figura 3 - Distribuição das variáveis de medidas dos vasos obtidas pelo método manual e por segmentação automatizada com *Cellpose*. A: frequência de vasos (100%). B: frequência de

vasos (50%). C: área dos vasos. D: diâmetro dos vasos. E: porcentagem da área da madeira ocupada por vasos.

No que se refere as variáveis de porcentagem da madeira ocupada por vasos, área e diâmetro dos vasos, não apresentaram distribuição normal. Para as duas primeiras variáveis, não foram observadas diferenças estatísticas entre os métodos manual e *Cellpose* (Tabela 2), indicando comportamento semelhante entre as mensurações.

A porcentagem da área ocupada por vasos foi de 12,28% pelo método manual e 11,40% pelo *Cellpose*, enquanto a área média dos vasos foi de 11.325 µm² em ambos os métodos. Para o diâmetro dos vasos, entretanto, houve diferença significativa entre os métodos com valores de 98,39 µm para a análise manual e 108,76 µm para o *Cellpose*, indicando tendência de superestimação dessa característica pelo modelo.

Tabela 2 - Resultados dos testes de normalidade e comparação estatística para porcentagem total de vasos obtidas pelo *Cellpose* e pelo método manual

Característica	Manual		*Cellpose*	
% da madeira ocupada por vasos	12,28	**a**	11,40	**a**
Área dos vasos (µm²)	11325	**a**	11325	**a**
Diâmetro do vaso (µm)	98,39	**a**	108,76	**b**

Valores seguidos da mesma letra na linha não diferiram estatisticamente pelo teste de Wilcoxon ($p \geq 0,05$).

A área dos vasos apresentou distribuição semelhante entre os métodos manual e *Cellpose,* com valores centrais próximos a 10.000–11.000 µm² e maior concentração dos dados entre 8.000 e 12.000 µm² (Figura 3C). A amplitude de distribuição foi semelhante entre os métodos, embora o método manual tenha apresentado maior extensão dos valores. Esses resultados reforçam a similaridade entre as mensurações realizadas pelo modelo automatizado e pelo método manual.

De acordo com a Figura 3D, o diâmetro dos vasos apresentou diferença entre os métodos, com mediana no valor de aproximadamente 100 µm para a análise manual e 110 µm

para o *Cellpose*. O método automatizado também apresentou maior amplitude e dispersão dos dados, evidenciadas pelo maior intervalo interquartil e pela extensão dos limites do boxplot. Esses resultados indicam uma tendência de superestimação do diâmetro pelo *Cellpose* em relação ao método manual.

De acordo com IAWA (1989) o diâmetro dos vasos deve ser mensurado no sentido tangencial. Como os vasos de eucalipto apresentam, em geral, formato ovalado, essa medida corresponde ao menor eixo da estrutura. Entretanto, quando o vaso não está alinhado com a orientação de referência, o método utilizado pelo *Cellpose* para determinação do diâmetro, baseado na *bounding box*, considera a largura do retângulo que delimita o vaso (Figura 4). Essa abordagem pode resultar em valores superiores aos obtidos manualmente, contribuindo para a superestimação do diâmetro observada no modelo automatizado.

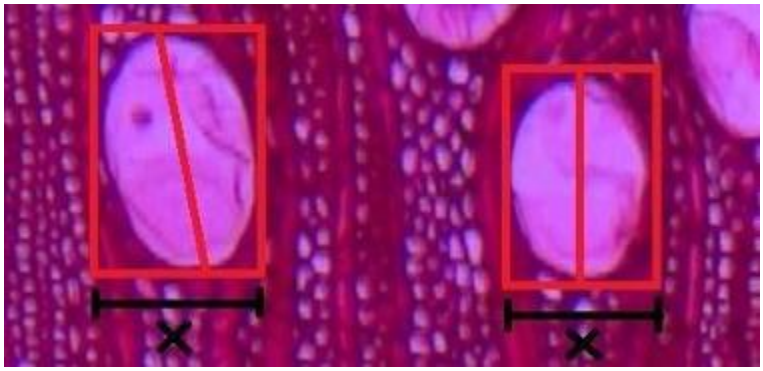


Figura 4 - Representação da *bounding box* envolvendo um vaso orientado a 90° em comparação a outro vaso com orientação diferente do eixo de 90°.

Na porcentagem de área da madeira ocupada por vasos (Figura 3E), os métodos manuais e *Cellpose* apresentam valores centrais semelhantes, com medianas em torno de 11-12%. O terceiro quartil apresentou posição semelhante entre os métodos, enquanto o primeiro quartil foi ligeiramente inferior para o *Cellpose*, indicando maior dispersão dos 50% centrais dos dados. Esses resultados corroboram a similaridade entre os métodos para essa variável.

4. Conclusões

O modelo treinado no Cellpose apresentou desempenho satisfatório na análise automatizada de vasos em clones de *E. grandis* × *E. urophylla*. Os métodos manual e automatizado apresentaram resultados comparáveis para a maioria das variáveis analisadas, uma vez que não foram observadas diferenças estatísticas na frequência, na área dos vasos e na porcentagem de madeira ocupada por vasos. Entretanto, para o diâmetro dos vasos, houve

diferença significativa entre os métodos, com tendência de superestimação pelo Cellpose, indicando uma limitação do modelo para essa variável. De modo geral, os resultados demonstram que o modelo é promissor para a automatização de análises anatômicas da madeira, com potencial para reduzir o tempo e o esforço empregados nas avaliações manuais e ampliar a capacidade de análise de imagens.

5. Agradecimentos

Os autores agradecem ao Departamento de Ciências Florestais e da Madeira da UFES, ao Laboratório de Anatomia da Madeira, a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e a Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação do Espírito Santo (FAPES) pelo apoio financeiro concedido.

6. Referências bibliográficas

Assis, M. R., Protásio, T. de P., Assis, C. O. de, Trugilho, P. F., & Santana, W. M. S. (2012). Qualidade e rendimento do carvão vegetal de um clone híbrido de *Eucalyptus grandis* × *Eucalyptus urophylla*. *Pesquisa Florestal Brasileira*, *32*(71), 291–302. https://doi.org/10.4336/2012.pfb.32.71.291

Balzano, A., Merela, M., & De Micco, V. (2024). Advances in wood anatomy: Cutting-edge techniques for identifying wood and analyzing its structural modifications. *Forests*, *15*(10), 1802. https://doi.org/10.3390/f15101802

Geng, D., Chen, P. X., Shen, X., Zhang, Y., Li, X. W., Jiang, L., Xie, Y. P., Niu, C., Zhang, J., Huang, X., Ma, F., & Guan, Q. (2018). MdMYB88 and MdMYB124 enhance drought tolerance by modulating root vessels and cell walls in apple. *Plant Physiology*, *178*(3), 1296–1309. https://doi.org/10.1104/pp.18.00502

International Association of Wood Anatomists. (1989). IAWA list of microscopic features for hardwood identification. International Association of Wood Anatomists.

Kotowska, M. M., Wright, I. J., & Westoby, M. (2020). Parenchyma abundance in wood of evergreen trees varies independently of nutrients. *Frontiers in Plant Science*, *11*, 86. https://doi.org/10.3389/fpls.2020.00086

Malavasi, U. C., Davis, A. S., & Malavasi, M. de M. (2016). Lignin in woody plants under water stress: A review. *Floresta e Ambiente*, *23*(4), 589–597. https://doi.org/10.1590/2179-8087.143715

Pachitariu, M., & Stringer, C. (2022). Cellpose 2.0: How to train your own model. *Nature Methods*, *19*(12), 1634–1641. https://doi.org/10.1038/s41592-022-01663-4

Stringer, C., Wang, T., Michaelos, M., & Pachitariu, M. (2021). Cellpose: A generalist algorithm for cellular segmentation. *Nature Methods*, *18*(1), 100–106. https://doi.org/10.1038/s41592-020-01018-x

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Elementos de tubo crivado do floema secundário em espécies amazônicas: uma análise anatômica e comparativa

Lidiane Pereira Ferreira[1]; Beatriz Santos Neves[1]; Yohana Barros Silva[1]; Lohana Vieira Souza[2]; Laise de Jesus Santos[3]; Graciene da Silva Mota[3]; Mirtes Emília Almeida Manaças[4]; Luiz Eduardo de Lima Melo[1]

[1] Universidade do Estado do Pará, Campus VIII, Centro de Ciências Naturais e Tecnologia, Xiloteca Joaquim Ivanir Gomes (JIGw), Marabá, Pará, Brasil
[2] Universidade Federal do Pará, Belém, Pará, Brasil
[3] Universidade Federal de Lavras, Lavras, Minas Gerais, Brasil
[4] Ministério Público do Estado do Pará (MP/PA), Brasil

Resumo: A casca do caule desempenha importantes funções fisiológicas, destacando-se o floema secundário pelo transporte de fotoassimilados através dos elementos de tubos crivados associados às células companheiras. O estudo comparou o diâmetro e o comprimento dos elementos de tubo crivado do floema secundário em três espécies arbóreas amazônicas e relacionou essas características aos elementos de vaso do xilema descritos na literatura, discutindo suas implicações morfofuncionais. Foram analisadas cascas de cinco indivíduos por espécie (DAP > 25 cm), com mensuração de 30 elementos de tubo crivado. *Dipteryx odorata* apresentou maior diâmetro (54,8 µm), seguida por *Manilkara elata* (37,6 µm) e *Bertholletia excelsa* (23,3 µm), enquanto os comprimentos médios foram de 96,74, 313,71 e 323,21 µm, respectivamente. A comparação com os elementos de vaso evidenciou diferenças morfofuncionais entre floema e xilema, ampliando o conhecimento sobre a organização dos tecidos condutores em espécies arbóreas amazônicas e subsidiando estudos sobre sua anatomia funcional em espécies.

Palavras-chave: Floema secundário; Células condutoras; Casca.

Secondary Phloem Sieve Tube Elements in Amazonian Tree Species: An Anatomical and Comparative Analysis

Abstract: Stem bark performs important physiological functions, with the secondary phloem playing a key role in the transport of photoassimilates through sieve tube elements associated with companion cells. This study compared the diameter and length of secondary phloem sieve tube elements in three Amazonian tree species and related these characteristics to xylem vessel elements described in the literature, discussing their morphofunctional implications. Bark samples were collected from five individuals per species (DBH > 25 cm), and 30 sieve tube elements were measured for each species. *Dipteryx odorata* exhibited the largest mean diameter (54.8 µm), followed by *Manilkara elata* (37.6 µm) and *Bertholletia excelsa* (23.3 µm), whereas the mean lengths were 96.74, 313.71, and 323.21 µm, respectively. Comparison with xylem vessel elements revealed morphofunctional differences between the phloem and xylem, expanding the understanding of the organization of conducting tissues in Amazonian tree species and providing support for studies on their functional anatomy in tree species.

Keywords: Secondary phloem; Conducting cells; Bark.

1. Introdução

A Amazônia é o maior bioma tropical do mundo, ocupando quase metade do território brasileiro e abrangendo diversos estados, apresentando grande diversidade de formações vegetais, como florestas densas, florestas estacionais, igapós, várzeas, savanas e refúgios montanhosos (Sudam, 2022). Para compreender como as espécies florestais da Amazônia se adaptam as condições do bioma, é necessário, além da anatomia da madeira, analisar como as estruturas anatômicas das cascas influenciam no funcionamento e adaptação dessas espécies (Vergílio, 2019).

Nesse contexto, a casca do caule constitui um tecido de elevada complexidade estrutural com elementos anatômicos como raios, fibras, cristais e demais estruturas que exercem funções defensivas e conferem características distintivas que contribuem para a identificação e diferenciação das espécies (Cahuana, *et al*., 2025; Vangeel *et al*., 2021). Além de ser um importante tecido protetor da planta podendo participar da fotossíntese, possuindo características fisiológica e funcional, participando ativamente do transporte e armazenamento de substâncias orgânicas e de água (Nie *et al*., 2023).

Dessa forma, a casca do caule no desenvolvimento primário é constituída de floema primário, córtex, epiderme, e no secundário, é constituída por floema secundário e periderme (Rosell *et al*., 2014). O floema secundário pode ser classificado em condutor e não condutor, onde a região condutora corresponde às áreas em que os elementos de tubo (E.T) permanecem funcionalmente ativos e vivos em associação com suas células companheiras, realizando efetivamente o transporte de fotoassimilados, hormônios e outros compostos orgânicos entre os órgãos da planta. (Angyalossy *et al*., 2016).

Os elementos de tubo crivados são células especializadas do floema que se dispõem longitudinalmente e se conectam por meio de placas crivadas, constituem o principal sistema de transporte da seiva elaborada nas angiospermas. Associados às suas células companheiras, que garantem seu suporte metabólico e regulam sua atividade fisiológica, juntos desempenham papel necessário na condução de fotoassimilados, hormônios, aminoácidos e outras substâncias orgânicas, atuando como fonte e dreno da planta, sendo fundamental para o crescimento, desenvolvimento, armazenamento de reservas e resposta às demandas metabólicas do vegetal (Srivastava, 1964; Evert, 2006; Angyalossy *et al*., 2016).

Apesar da importância do floema para a condução de nutrientes nas espécies, pouco se conhece sobre as variações estruturais dos elementos de tubo entre espécies arbóreas amazônicas de grande importância econômica e ecológica. Essas diferenças estruturais podem

refletir na capacidade de condução de fotoassimilados e no crescimento das espécies, influenciando seu desempenho funcional (Baptista *et al*., 2013).

Assim, o estudo teve como objetivo comparar o diâmetro e o comprimento dos elementos de tubo crivado do floema secundário em três espécies arbóreas amazônicas e relacionar essas características aos elementos de vaso do xilema descritos na literatura, discutindo suas implicações morfofuncionais.

2. Material e métodos

2.1 Amostragem

A coleta foi realizada em duas áreas distintas pertencentes à mesorregião do Sudeste do Estado do Pará, Brasil. A coleta das cascas das espécies *Manilkara elata* e *Dipiteryx odorata* foi realizada no município de Dom Eliseu, em uma área de floresta natural manejada da Fazenda Gênesis, as cascas de *Bertholletia excelsa* foi realizada no município de Novo Repartimento, em uma área de floresta ombrófila densa da Fazenda 3 Serras.

Foram coletadas cascas de cinco árvores de cada espécie com DAP acima de 25 cm. A remoção ocorreu com o auxílio de facão e machadinha, especialmente quando a casca apresentava maior dureza. No total, coletaram-se 10 amostras, de diferentes posições do lenho de um mesmo indivíduo arbóreo, todas com dimensões de 10 cm de altura por 5 cm de largura. Após a extração, aplicou-se calda bordalesa (sulfato de cobre e cal) para a prevenção de ataques patógenos ao indivíduo.

As cascas foram secas e em seguida, foram encaminhadas ao Laboratório de Ciência e Tecnologia da Madeira (LCTM) da Universidade do Estado do Pará, Brasil (UEPA, VIII) para a realização da anatomia da casca.

2.2 Caracterização Anatômica das cascas

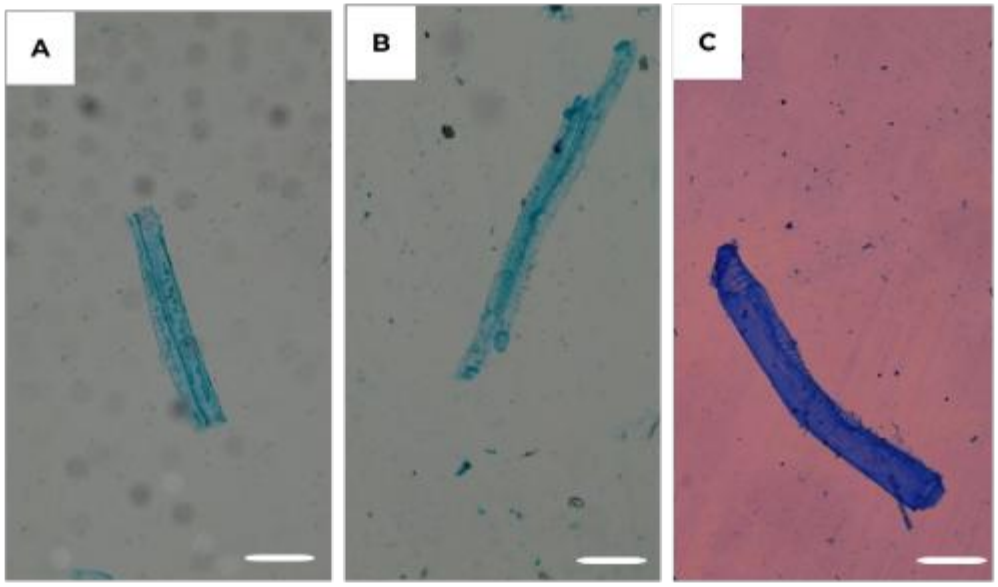
As cascas foram analisadas microscopicamente, onde fragmentos da casca cortados com ajuda de um estilete foram macerados em CH_3COOH/H_2O_2 (1:1) a 60 °C por 24 h, corados com safranina e azul de astra, montados em lâminas e observados para medir o diâmetro e o comprimento dos elementos de tubos (30 elementos por espécie, ImageView). Os elementos de tubo das cascas foram comparados com os elementos de vaso do xilema secundário das espécies correspondidas, os dados foram obtidos no banco de dados do InsideWood (2024–onwards).

2.3 Análise estatística

A análise estatística foi realizada no software R, versão 3.0.1 (R Development core team, 2013).

3. Resultados e discussão

A comparação entre as três espécies oriundas da mesma mesorregião revelou diferenças quanto ao diâmetro e comprimento médio dos elementos de tubos (Figura 1).



Fonte: Autora, 2026

Figura 1- Diâmetro dos elementos de tubos: [A] *Dipteryx odorata*; [B] *Manilkara elata*; [C] *Bertholletia excelsa.* Barra de escala [A-C] = 100 µm.

Os dados anatômicos dos elementos de tubo crivado obtidos experimentalmente (Tabela 1) revelam variações morfológicas significativas entre as três espécies amazônicas. Quando esses parâmetros do floema secundário são comparados aos dados de elementos de vaso do xilema obtidos na base Insidewood, evidenciam-se contrastes funcionais que refletem a especialização de cada tecido condutor.

Espécies	Diâmetro E.T (µm)	Diâmetro E.V/ InsideWood (µm)	Comprimento E.T(µm)	Comprimento E.V/ InsideWood (µm)
Dipteryx odorata	54,8	~145	96,74	300-550
Manilkara elata	37,6	~163	313,71	400-600
Bertholletiaexcelsa	23,3	≥200	323,21	400-650

Tabela 1 - Comparação dos elementos de tubo e elementos de vaso (Diâmetro e comprimento)

No floema secundário, a espécie *Dipteryx odorata* apresentou os elementos de tubo crivado mais curtos (96,74 µm), no xilema, seus vasos também estão entre os menores em comprimento médio dentro do grupo analisado (~300–450 µm). Já a espécie *B. excelsa* apresentou o menor diâmetro de tubo crivado (23,3 µm), enquanto no xilema ela é caracterizada por vasos maiores (≥ 200 µm). A *Manilkara elata* manteve uma posição intermediária em ambos os tecidos, células do floema com comprimento de 313,71 µm e diâmetro de 37,6 µm, enquanto nos elementos de vaso possui um diâmetro de ~163 µm e 400–600 µm de comprimento.

A diferença encontrada entre as células de condução do floema secundário e do xilema secundário ocorre devido ao tipo de transporte de cada elemento condutor. Conforme Aloni (1987), o transporte de seiva bruta no xilema opera sob tensão, exigindo lúmens mais expandidos para mitigar a resistência friccional e otimizar o fluxo hídrico ascendente. Por outro lado, a translocação de fotoassimilados no floema ocorre por fluxo de massa sob pressão positiva. Como a seiva elaborada é altamente viscosa, o controlar a velocidade do fluxo, resultados em lúmens mais conservados e estreitos (Bass, *et al*., 1983).

A análise comparativa revelou que as três espécies apresentam variações na morfologia dos elementos de tubo crivado do floema secundário, as quais não acompanham, necessariamente, os padrões descritos para os elementos de vaso do xilema. Esses resultados evidenciam que cada tecido condutor possui organização anatômica própria, compatível com suas funções fisiológicas, contribuindo para o entendimento das diferenças morfofuncionais do sistema vascular em espécies arbóreas amazônicas.

4. Conclusões

A comparação das características anatômicas dos elementos de tubo crivado do floema secundário entre as espécies estudadas, associada às informações disponíveis para os elementos de vaso do xilema secundário, permitiu ampliar o conhecimento sobre a organização morfofuncional dos tecidos condutores em espécies arbóreas amazônicas. Além disso, este estudo fornece subsídios para futuras pesquisas sobre elementos de tubo crivado, um componente do sistema vascular ainda pouco explorado na literatura anatômica.

5. Agradecimentos

Os autores agradecem a Fundação Casa da Cultura de Marabá (FCCM) pela concessão de bolsas de iniciação científica, ao Programa de Pós-Graduação em Tecnologia, Recursos Naturais e Sustentabilidade na Amazônia (PPGTEC/UEPA) pelo apoio acadêmico e institucional e à Chamada Pública MCTI/FINEP/FNDCT/Identidade Brasil – Recuperação e Preservação de Acervos 2024 (Ref. 3103/24), projeto nº 5827, convênio nº 0125.0186.00, pelo apoio financeiro à pesquisa.

6. Referências bibliográficas

Angyalossy, V., Pace, M. R., Evert, R. F., Marcati, C. R., Oskolski, A. A., Terazas, T., Kotina, E., Lens, F., Mazzoni-Viveiros, S. C., Angeles, G., Machado, S. R., Crivellaro, A., Rao, K. S., Junikka, L., Nikolaeva, N., Baas, P. (2016). *IAWA list of microscopic bark features*. *IAWA Journal*, *37*(4), 517–615. DOI: 10.1163/22941932 20160151

Aloni, R. (1987). Differentiation of vascular tissues. *Annual Review of Plant Physiology*, *38*(1), 179–204. https://doi.org/10.1104/pp.70.6.1631

Baas, P., Werker, E., Fahn, A. (1983). Some ecological trends in vessel characters.*IAWA Bulletin*, *4*(2), 141–159. https://www.cabidigitallibrary.org/doi/full/10.5555/19830687391

Baptista, I., Miranda, I., Quilhó, T., Gominho, J., Pereira, H. (2013). Characterisation and fractioning of Tectona grandis bark in view of its valorisation as a biorefinery raw-material. Ind. Crops Prod. 50, 166–175. http://dx.doi.org/10.1016/j.indcrop.2013.07.004

Cahuana, L. A.; Mamani, M, N. (2025). Anatomical and physical analysis of the bark of three Amazonian tree species as a tool for species identification. Revista Árvore, v. 49. https://doi.org/10.53661/18069088202549263890

Evert, R. F., Eichhorn, S.E. (2014). Raven Biology of Plants, 8th edn. W.H. Freeman/Palgrave Macmillan. https://doi.org/10.1093/aob/mcu090

IAWA Committee. (2016). *IAWA list of microscopic features of bark for hardwood identification*. *IAWA Journal*, *37*(2), 141–274. https://doi.org/10.1163/22941932-20160151

Rosell, J. A., Zavala, C. F., Álvarez, A. L., Olson, M. E. (2014). Bark functional ecology: Evidence for tradeoffs, functional coordination, and environment producing bark diversity. *New Phytologist*, *201*(2), 486–497. https://doi.org/10.1111/nph.12541

Srivastava, L. M. (1964). Anatomy, chemistry and physiology of bark. International Review of Forestry Research 1: 203--277. doi: 10.1016/B978-1-4831-9975-7.50010-7

SUDAM – Superintendência do Desenvolvimento da Amazônia. (2022). *Amazônia Legal: Dados e estatísticas*. https://www.gov.br/sudam

Vangeel, T., Neiva, D.M., Quilhó, T., Costa, R.A., Sousa, V., Sels, B.F., Pereira, H. (2021). Tree bark characterization envisioning an integrated use in a biorefinery. Biomass Convers. Biorefin. https://doi.org/10.1007/s13399-021-01362-8

Vergílio, P. C. B. (2019.) Relações entre estrutura, química e densidade da casca com sua função em caules e raízes de espécies do cerrado paulista. 2019. 118 f. Tese (Doutorado em Ciências Biológicas). Universidade Estadual Paulista, São Paulo. http://hdl.handle.net/11449/181310

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Equivalência Entre Ensaios de Impacto na Flexão e Flexão Estática Para Determinação da Tenacidade

Maria Fernanda Souza Palhavam[1]; José Ricardo Gabriel Kuniyoshi[2]; Francisco Antonio Rocco Lahr[3]

[1] Laboratório de Madeiras e de Estruturas de Madeira (LaMEM), do Departamento de Engenharia de Estruturas (SET), da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo (EESC-USP)
[2] Laboratório de Madeiras e de Estruturas de Madeira (LaMEM), do Departamento de Engenharia de Estruturas (SET), da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo (EESC-USP)
[3] Laboratório de Madeiras e de Estruturas de Madeira (LaMEM), do Departamento de Engenharia de Estruturas (SET), da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo (EESC-USP)

Resumo: Estudos anteriores mostraram que o ensaio de flexão estática pode ser utilizado como substituição do ensaio em máquinas de pêndulo para a determinação da tenacidade em lotes de Cambará Rosa. Como sequência, o presente trabalho tem como objetivo avaliar se essa alternativa para determinação da tenacidade é válida para lotes de outras três espécies de madeira tropical brasileira: Cedrinho (*Erisma uncinatum*), Sucupira (*Bowdichia nitida*) e Jatobá (*Hymenaea courbaril*). Para tanto, foram extraídos pares de corpos de prova adjacentes de várias peças, de forma a serem considerados, para fins práticos, como gêmeos. Para cada par, um corpo de prova foi ensaiado à flexão estática em máquina universal de ensaios EMIC e o outro foi ensaiado em máquina de pêndulo de Charpy. O teste *t* pareado mostrou que não há diferenças estatísticas entre as medições da tenacidade pelos dois métodos. Conclui-se, portanto, que é possível simplificar a caracterização de um lote, dispensando o uso de máquinas de pêndulo.

Palavras-chave: Propriedades Mecânicas; Madeiras Tropicais; Caracterização de Lotes de Madeira.

Equivalence Between Impact Bending and Static Bending Tests for the Determination of Toughness

Abstract: Previous studies have shown that the static bending test can be used as a substitute for the pendulum machine test for the determination of toughness in batches of Cambará Rosa. As a follow-up, the present work aims to evaluate whether this alternative for determining toughness is valid for batches of three other Brazilian tropical wood species: Cedrinho (*Erisma uncinatum*), Sucupira (*Bowdichia nitida*), and Jatobá (*Hymenaea courbaril*). To this end, pairs of adjacent specimens were extracted from several beams, so that they could be considered, for practical purposes, as twins. For each pair, one specimen was tested in static bending in an EMIC universal testing machine, and the other was tested in a Charpy pendulum machine. The paired t-test showed that there are no statistically differences between the toughness measurements by the two methods. Therefore, it is concluded that it is possible to simplify the characterization of a batch, dispensing with the use of pendulum machines.

Keywords: Mechanical Properties; Tropical Woods; Characterization of Wood Batches.

1. Introdução

A madeira destaca-se como um material amplamente empregado na construção civil devido à sua renovabilidade, baixo impacto ambiental e excelente relação entre resistência e peso, características que a tornam competitiva em relação a materiais como o aço e o concreto (Asdrubali et al., 2017). No contexto do dimensionamento de estruturas sujeitas a esforços dinâmicos e impactos, como pontes, a tenacidade constitui uma propriedade mecânica fundamental, definida como a capacidade do material de absorver energia antes da ruptura e quantificada pela área sob a curva tensão-deformação até o ponto de fratura (Callister & Rethwisch, 2014).

Atualmente, as principais diretrizes normativas, como a NBR 7190-3 (ABNT, 2022), a ASTM D143-23 (ASTM International, 2023) e a ISO 13061-10 (ISO, 2017), prescrevem que a tenacidade seja determinada por meio do ensaio de impacto na flexão utilizando máquinas de pêndulo. Entretanto, a limitada disponibilidade desse equipamento em laboratórios brasileiros faz com que essa propriedade seja pouco utilizada na caracterização das madeiras comercializadas no país (Molina, 2017). Em função dessa limitação, diversos estudos buscaram estimar a tenacidade por meio da correlação com outras propriedades mecânicas, como a densidade e a resistência à compressão paralela às fibras (Christoforo et al., 2020).

O avanço dos sistemas digitais de aquisição de dados tornou viável determinar a energia absorvida por meio da integral da curva força-deflexão obtida em ensaios de flexão estática. Embora essa abordagem tenha sido investigada por Kubojima et al. (2000) e Teixeira et al. (2012), seus resultados ainda não apresentavam fundamentação estatística suficiente para justificar a substituição do ensaio de impacto.

Este trabalho dá continuidade às pesquisas desenvolvidas no Laboratório de Madeiras e de Estruturas de Madeira (LaMEM/SET/EESC-USP), fundamentando-se nos resultados de Kuniyoshi et al. (2025), que demonstraram não haver diferença estatisticamente significativa entre os valores de tenacidade obtidos pelos ensaios de impacto na flexão e de flexão estática para a madeira de Cambará Rosa (Erisma sp.). Assim, o objetivo desta pesquisa é avaliar se essa equivalência também é observada para outras três espécies tropicais brasileiras: Cedrinho (Erisma uncinatum), Sucupira (Bowdichia nitida) e Jatobá (Hymenaea courbaril). Caso essa equivalência seja confirmada, será possível simplificar a caracterização mecânica da madeira, reduzindo custos, tempo de ensaio e consumo de material ao dispensar o uso de máquinas de pêndulo.

2. Material e métodos

1082. 2.1. Materiais

Para a realização dos ensaios, foram utilizadas madeiras das seguintes espécies: Cedrinho (*Erisma uncinatum*), Sucupira (*Bowdichia nitida*) e Jatobá (*Hymenaea courbaril*). As peças de madeira empregadas na confecção dos corpos de prova apresentavam teor de umidade próximo a 12%. Foram confeccionados 24 corpos de prova para cada espécie, com dimensões nominais de 20 × 20 × 300 mm³, isentos de defeitos visíveis. Desse total, 12 corpos de prova foram destinados aos ensaios de impacto na flexão e os 12 restantes aos ensaios de flexão estática.

Conforme recomendado pela ABNT NBR 7190-3 (2022), a tenacidade da madeira deve ser avaliada separadamente nas direções radial e tangencial. Dessa forma, para cada espécie e para cada tipo de ensaio, foram ensaiados 6 corpos de prova na direção radial e 6 na direção tangencial, permitindo a análise da influência da orientação anatômica nas propriedades mecânicas avaliadas. Os corpos de prova foram extraídos de forma adjacente, gerando pares gêmeos para uma mesma direção (radial e tangencial).

1083. 2.2. Métodos

2.2.1. Ensaio de impacto na flexão

O ensaio de impacto na flexão foi realizado utilizando uma máquina de pêndulo desenvolvida por Siqueira (1986) e presente no Laboratório de Madeiras e Estruturas de Madeira da Escola de Engenharia de São Carlos (EESC/USP). Este equipamento é baseado no princípio do Pêndulo de Charpy, em que é mensurada a energia necessária para fraturar o corpo de prova de madeira (tenacidade) a partir do impacto causado por uma corrente ao liberar o pêndulo de seu ângulo inicial.

Para a determinação da tenacidade neste trabalho, o equipamento foi ajustado ao ângulo de 60º, um dos ângulos iniciais disponíveis (30°, 45° ou 60°). Este valor foi escolhido a partir de testes iniciais que mostraram que ângulos inferiores não seriam capazes de fornecer a energia suficiente para a ruptura de forma adequada.

Antes de mensurar a tenacidade dos corpos de prova dos lotes ensaiados, realizou-se um ensaio sem a presença do corpo de prova, registrando-se o ângulo máximo atingido pelo pêndulo em relação à posição vertical (θ_i). Esse procedimento permitiu determinar a energia

dissipada por atrito durante o movimento do equipamento, que deve ser considerada no cálculo da tenacidade.

Na sequência, os corpos de prova foram posicionados sobre os apoios e conectados ao pêndulo por meio de uma corrente. O pêndulo foi então elevado novamente até o ângulo inicial previamente estabelecido (Figura 1) e liberado para provocar a ruptura da amostra. Após a estabilização do movimento, registrou-se o ângulo final (θ_a) atingido pelo pêndulo. A tenacidade corresponde ao trabalho necessário para promover a fratura da madeira sob a ação de uma carga de impacto e foi determinada por meio da Equação (1):

$$T = PL\left(\cos\theta_a - \cos\theta_i\right) \quad (1)$$

Onde:

T: tenacidade (J);

P: peso do Pêndulo (N);

L: distância do centro de rotação ao centro de gravidade do pêndulo (m);

θ_a: ângulo final após a ruptura do corpo de prova (º);

θ_i: ângulo inicial (º).



Figura 1 – Ensaio de impacto na flexão na máquina de pêndulo.

2.2.2. Ensaio de flexão estática

O ensaio de flexão estática foi realizado em uma máquina universal de ensaios EMIC, modelo DL 3000, utilizando a configuração de flexão em três pontos (Figura 2), com aplicação da carga no centro do vão. Durante o ensaio, foram registrados simultaneamente a força aplicada e o deslocamento correspondente, permitindo a obtenção da curva força × deflexão de cada corpo de prova.

A tenacidade à flexão estática foi determinada por meio da integral da curva obtida, representando a área total sob o gráfico, que equivale ao trabalho mecânico absorvido pelo material até o instante de sua ruptura (Equação 2).

$$T = \int F \, d\delta \tag{2}$$

Onde:

T: tenacidade (J);

F: força aplicada (N);

δ: deflexão (m).



Figura 2 – Ensaio de flexão estática em três pontos realizado na EMIC DL 3000.

2.2.3. Padronização da tenacidade

Uma vez que a tenacidade é influenciada pelas dimensões da seção transversal dos corpos de prova, os valores obtidos experimentalmente foram corrigidos para uma área nominal, de modo a permitir a comparação entre as amostras. Para essa correção, adotou-se o procedimento proposto por Siqueira (1986), apresentado na Equação (3).

$$T_{corrigida} = \frac{A_{CP}}{A_{nominal}} T_{ensaio} \quad (3)$$

Onde:

$T_{corrigida}$: tenacidade corrigida para a área nominal (J);

T_{ensaio}: tenacidade obtida experimentalmente (J);

A_{CP}: área da seção transversal do corpo de prova (mm²);

$A_{nominal}$: área nominal da seção transversal (mm²).

2.2.4. Análise estatística

A extração de pares adjacentes garantiu o pareamento físico das amostras, viabilizando a comparação direta dos métodos de ensaio. Com base nisso, a diferença entre os valores de tenacidade obtidos pelos ensaios de impacto na flexão (pêndulo) e de flexão estática (EMIC) foi avaliada por meio do teste *t* pareado, adotando-se um nível de confiança de 95%. A análise baseou-se no cálculo do intervalo de confiança da média das diferenças entre os resultados individuais obtidos pelos dois métodos de ensaio, considerando-se ausência de diferença estatisticamente significativa quando o valor zero esteve contido no intervalo de confiança.

Como pressuposto do teste t pareado, é necessário verificar se há aderência à normalidade das diferenças. Para tanto, foi utilizado o teste de aderência de Shapiro-Wilk, em que, caso o valor-p seja superior ao nível de significância adotado (5%), assume-se que a distribuição das diferenças pode ser considerada como normal, e o teste t pareado é validado.

3. Resultados e discussão

A Figura 3 apresenta as médias e os intervalos de confiança (nível de confiança de 95%) da tenacidade para cada espécie, método de ensaio (pêndulo ou flexão estática) e direção (radial e tangencial). O Cedrinho apresentou valores médios de tenacidade próximos a 5 J, abaixo do constatado para o Jatobá e para a Sucupira, que apresentaram valores médios entre 25 e 40 J, a depender do ensaio e da direção. Os valores obtidos para o Cedrinho foram próximos aos obtidos no estudo anterior sobre o Cambará Rosa (Kuniyoshi et al., 2025).

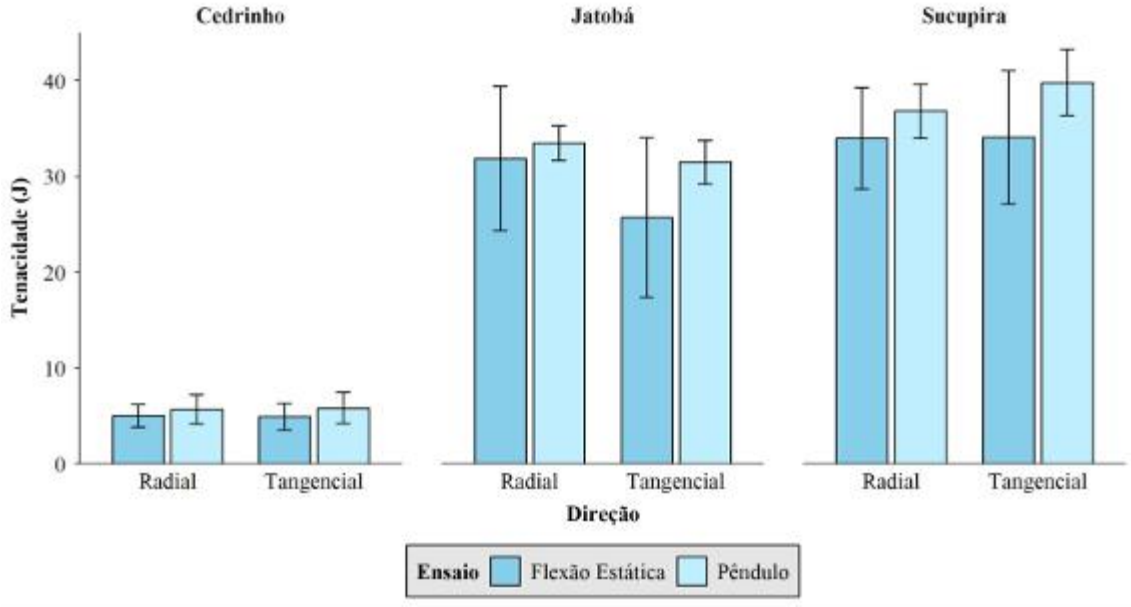


Figura 3 – Valores médios de tenacidade e respectivos intervalos de confiança (95%) para as madeiras de Cedrinho, Jatobá e Sucupira, de acordo com a direção anatômica e o método de ensaio.

A Tabela 1 apresenta os resultados do teste *t* pareado e do teste de Shapiro-Wilk. Como os p-valores para o teste *t* resultaram iguais ou acima do nível de significância de 5%, admite-se que a hipótese nula (H_0) não pode ser rejeitada, isto é, não é verificada a diferença estatística entre as médias dos pares. Ou seja, o ensaio de flexão estática pode ser usado como substituição ao ensaio em máquinas de pêndulo para a determinação da tenacidade da madeira, tanto para ensaios na direção radial como na tangencial. Além disso, como os p-valores correspondentes ao teste de Shapiro-Wilk resultaram acima do nível de significância, a normalidade das diferenças é constatada e, consequentemente, o teste t é validado para todos os casos.

Tabela 1 – Valor p do teste t pareado e do teste de normalidade das diferenças de Shapiro-Wilk

Teste estatístico	**Cedrinho**		**Sucupira**		**Jatobá**	
	Radial	**Tangencial**	**Radial**	**Tangencial**	**Radial**	**Tangencial**
Teste t	0,39	0,39	0,06	0,19	0,53	0,10
Shapiro-Wilk	0,05	0,08	0,81	0,07	0,92	0,11

Tendo em vista a não rejeição da hipótese nula no teste t pareado e, consequentemente, a viabilidade da medição da tenacidade por meio do ensaio de flexão estática, há a possibilidade de uma simplificação do método de caracterização previsto pela NBR 7190-3 (ABNT, 2022), corroborando os achados de estudos prévios (Kuniyoshi et al., 2025). Em vez de serem necessários corpos de prova distintos para a determinação da resistência e do módulo de elasticidade na flexão estática e para tenacidade no ensaio de impacto na flexão, é possível determinar todas essas propriedades em um único ensaio. Nesse sentido, até mesmo laboratórios que não disponham de máquinas de pêndulo podem determinar a tenacidade caso possuam máquinas universais de ensaio em que o ensaio de flexão seja possível de ser realizado.

4. Conclusões

Este trabalho proporcionou um avanço em relação à verificação da viabilidade de se determinar a tenacidade por meio do ensaio de flexão estática em substituição ao ensaio de impacto na flexão realizado em máquinas de pêndulo. A partir da constatação de que essa alternativa possui respaldo estatístico para mais três espécies tropicais brasileiras, além do Cambará Rosa, alvo de estudos preliminares, concluiu-se que a determinação da tenacidade via ensaio de flexão estática pode reduzir o tempo despendido bem como gerar economia de material, ao simplificar a caracterização de um lote. Em estudos futuros, será realizada a análise separada por classe de resistência, a fim de averiguar se a tendência permanece a mesma independentemente da classe em que o lote se enquadra.

5. Agradecimentos

Os autores agradecem ao Laboratório de Madeiras e de Estruturas de Madeira (LaMEM), do Departamento de Engenharia de Estruturas (SET), da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo (EESC-USP), pelo suporte técnico e pela infraestrutura disponibilizada para a realização desta pesquisa; ao CNPq pelo suporte financeiro (Processos: 313198/2023-3 e 141049/2024-3).

6. Referências bibliográficas

American Society for Testing and Materials. (2023). ASTM D143-23: Standard test methods for small clear specimens of timber. ASTM International.

Asdrubali, F., Ferracuti, B., Lombardi, L., Guattari, C., Evangelisti, L., & Grazieschi, G. (2017). A review of structural, thermo-physical, acoustical, and environmental properties of wooden materials for building applications. Building and Environment, 114, 307–332. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.12.033.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2022). NBR 7190-3: Projeto de estruturas de madeira – Parte 3: Métodos de ensaio para corpos de prova isentos de defeitos para madeiras de florestas nativas. ABNT.

Callister, W. D., & Rethwisch, D. G. (2014). Materials Science and Engineering: An Introduction. Wiley.

Christoforo, A. L., Almeida, D. H. de, Varanda, L. D., Panzera, T. H., & Lahr, F. A. R. (2020). Estimation of wood toughness in Brazilian tropical tree species. Engenharia Agrícola, 40(2), 232-237. https://doi.org/10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v40n2p232-237/2020.

International Organization for Standardization. (2017). ISO 13061-10: Physical and mechanical properties of wood — Test methods for small clear wood specimens — Part 10: Determination of impact bending strength. ISO.

Kubojima, Y., Okano, T., & Ohta, M. (2000). Bending strength and toughness of heat-treated wood. Journal of Wood Science, 46(1), 8-15. https://doi.org/10.1007/BF00779547.

Kuniyoshi, J. R. G., Souza, C. G. F. de, & Lahr, F. A. R. (2025). Ensaio de flexão estática como alternativa ao ensaio de impacto na flexão para medição da tenacidade na madeira de cambará rosa. Em Anais do XVIII Encontro Brasileiro em Madeiras e em Estruturas de Madeira (pp. 1-8).

Molina, J. C. (2017). A Madeira na Engenharia - Teoria, Experimentação e Simulação. Novas Edições Acadêmicas.

Siqueira, M. L. (1986). Projeto e construção de máquina para determinação da tenacidade de madeira (Dissertação de mestrado). Universidade de São Paulo.

Teixeira, R. S. et al. (2012). Extruded cement based composites reinforced with sugar cane bagasse fibres. Key Engineering Materials, 517, 450-457. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.517.450.

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Estimativa da densidade básica da madeira de *Eucalyptus* utilizando espectroscopia NIR de bancada e portátil

Caio Cesar Nemer Martins[1]; Vinícius Resende de Castro[1]; Paulo Ricardo Gherardi Hein[2]; Angélica de Cássia Oliveira Carneiro[1]; Adriano Reis Prazeres Mascarenhas[3]; Lina Bufalino[4]; Dayane Targino de Medeiros[2]; Maria Eduarda de Castro Flores[1]

[1] Universidade Federal de Viçosa
[2] Universidade Federal de Lavras
[3] Universidade Federal de Rondônia
[4] Universidade Federal Rural da Amazônia

Resumo: O objetivo deste estudo foi predizer a densidade básica da madeira de *Eucalyptus* utilizando instrumentos NIR de bancada e portátil. Foram avaliadas duas árvores de 11 clones, com 84 meses de idade. Discos de madeira (10 cm) foram coletados ao diâmetro altura do peito (DAP), moídos e transformados em amostras compostas. Em cada amostra, foram coletados 20 espectros, totalizando 440 espectros por instrumento. O modelo de regressão por mínimos quadrados parciais (PLS-R) com NIR de bancada apresentou maior precisão (coeficiente de determinação na predição – R^2p = 0,93; razão entre o desempenho e o desvio padrão – RPDp = 3,76), enquanto o NIR portátil teve desempenho moderado (R^2p = 0,75; RPDp = 1,93). Ambos são promissores para estimar propriedades da madeira, mas o modelo gerado pelo instrumento de bancada apresentou maior acurácia. Deste modo, as duas abordagens podem ser usadas para predizer a densidade básica da madeira de *Eucalyptus*, auxiliando na seleção de clones superiores em programas de melhoramento genético.

Palavras-chave: Controle de qualidade; Estatística multivariada; Técnica não-destrutiva.

Estimation of the basic wood density of *Eucalyptus* using benchtop and portable NIR spectroscopy

Abstract: The objective of this study was to predict the basic density of *Eucalyptus* wood using benchtop and portable near-infrared spectroscopy (NIR) instruments. Two trees from each of 11 clones, aged 84 months, were evaluated. Wood discs (10 cm) were collected Diameter at Breast Height (DBH), ground, and transformed into composite samples. For each sample, 20 spectra were collected, totaling 440 spectra per instrument. The partial least squares regression (PLS-R) model using the benchtop NIR showed higher accuracy (coefficient of determination in prediction – R^2p = 0.93; ratio of performance to deviation – RPDp = 3.76), while the portable NIR showed moderate performance (R^2p = 0.75; RPDp = 1.93). Both approaches are promising for estimating wood properties, but the model generated by the benchtop instrument showed greater accuracy. Thus, both approaches can be used to predict the basic density of *Eucalyptus* wood, assisting in the selection of superior clones in genetic breeding programs.

Keywords: Quality control; Multivariate statistics; Non-destructive techniques.

1. Introdução

A crescente demanda por biomassa florestal para a produção de celulose e papel, carvão vegetal, painéis de madeira e madeira serrada tem intensificado a necessidade de métodos rápidos, precisos e de baixo custo para a avaliação da qualidade da madeira (Martins et al. 2026). Nesse cenário, destaca-se a importância da adoção de ferramentas eficientes que permitam análises confiáveis, capazes de atender às exigências industriais e otimizar a utilização dos recursos florestais.

Entre as propriedades mais relevantes, a densidade básica se destaca por influenciar diretamente o rendimento industrial, a eficiência dos processos de conversão e a qualidade dos produtos finais. Além disso, está intimamente relacionada às propriedades físicas e mecânicas da madeira, sendo amplamente utilizada como um indicador-chave de desempenho tecnológico (Medeiros et al. 2025). Assim, a seleção de materiais genéticos superiores com base em estimativas confiáveis dessa propriedade torna-se essencial para o avanço dos programas de melhoramento florestal.

Comumente, a densidade básica da madeira é determinada por métodos laboratoriais convencionais destrutivos, demandando tempo, mão de obra e elevados custos. Como alternativa, a espectroscopia no infravermelho próximo (NIR) tem se consolidado como uma técnica promissora, por permitir análises rápidas, não destrutivas e com mínima preparação de amostras (Lima et al. 2022). Além disso, o uso de modelos multivariados, como a regressão por mínimos quadrados parciais (PLS-R), possibilita a correlação entre dados espectrais e propriedades físico-químicas da madeira, ampliando o potencial dessa abordagem (Hein et al. 2010).

Os estudos no setor florestal que utilizaram espectroscopia NIR concentraram-se, predominantemente, no uso de instrumentos de bancada. No entanto, com os avanços tecnológicos observados a partir de 2010, surgiram diversos instrumentos NIR portáteis, apresentando vantagens como menor custo, maior portabilidade e a possibilidade de realização de análises diretamente em campo (Hao et al. 2021; Sandak et al. 2021; Toscano et al. 2022). Como desvantagem, os instrumentos NIR portáteis apresentam faixa espectral reduzida (11.000–6.000 cm^{-1}) em comparação com a maioria dos instrumentos de bancada (12.500–3.500 cm^{-1}), o que pode influenciar seu desempenho analítico e a precisão dos modelos gerados (Martins et al. 2025).

Nesse sentido, torna-se relevante investigar a precisão dos instrumentos portáteis em relação aos de bancada na predição da densidade básica da madeira, especialmente em materiais oriundos de plantações de rápido crescimento, como espécies do gênero *Eucalyptus*,

amplamente utilizadas em escala industrial. Assim, o presente estudo teve como objetivo predizer a densidade básica da madeira de *Eucalyptus* utilizando instrumentos NIR de bancada e portátil, avaliando o desempenho dos modelos gerados e seu potencial de aplicação na seleção de clones superiores em programas de melhoramento genético.

2. Material e métodos

2.1 Obtenção do material e determinação da densidade básica da madeira

Foram avaliados onze clones comerciais dos gêneros *Eucalyptus* spp., com 84 meses de idade, implantados em espaçamento de 3 × 3 m. Para cada clone, selecionaram-se duas árvores com diâmetro médio, das quais foram retirados discos de 10 cm de espessura a 1,30 m do solo. Para a obtenção dos valores, calculou-se a média da densidade básica de duas cunhas opostas contendo o centro do disco, com espessura de 2,5 cm, conforme a norma ABNT NBR 11941. Os resultados da densidade básica de madeira de *Eucalyptus* podem ser observados na Tabela 1.

Tabela 1 – Valores de densidade básica da madeira de *Eucalyptus*.

Clone	**Densidade básica (kg/m^3)**
E1	519,0 ± 10,0
E2	546,0 ± 20,0
E3	472,0 ± 0,0
E4	517,0 ± 40,0
E5	551,0 ± 20,0
E6	522,0 ± 0,0
E7	438,0 ± 0,0
E8	483,0 ± 0,0
E9	486,0 ± 60,0
E10	534,0 ± 10,0
E11	492,0 ± 10,0

*E = *Eucalyptus.*

2.2 Preparo das amostras e aquisição dos espectros

Discos de madeira com 10 cm de espessura, coletados na altura do DAP, foram acondicionados em laboratório até atingirem equilíbrio higroscópico com o ambiente. Posteriormente, os discos foram moídos e amostras compostas foram preparadas para cada árvore/clone. Em seguida, as amostras foram peneiradas em malhas de 40 e 60 *mesh*, utilizando-se o material retido na peneira de 60 *mesh*.

As amostras de madeira moída foram acondicionadas em ambiente climatizado até atingirem teor de umidade de equilíbrio entre 10 e 12% (base seca). Em seguida, os espectros NIR foram obtidos utilizando equipamentos de bancada e portátil. O espectrômetro de bancada FT-NIR MPA, da Bruker Optik GmbH, operou na faixa de 12.500–3.500 cm^{-1}, com resolução de 8 cm^{-1} e 16 varreduras por espectro, sendo utilizada para análise a faixa de 9.000–4.000 cm^{-1}. O equipamento portátil MicroNIR OnSite, da Viavi Solutions Inc., adquiriu espectros na faixa de 11.000–6.000 cm^{-1}, com resolução de 5,6 nm e 125 variáveis espectrais. Para ambos os instrumentos, foram realizadas 20 leituras por amostra, totalizando 440 espectros por equipamento.

2.3 Análise estatística multivariada

Modelos de regressão por mínimos quadrados parciais (PLS-R) foram ajustados com base nos espectros NIR utilizando o *software* Chemoface versão 1.63. Os modelos foram desenvolvidos para predizer a densidade básica da madeira a partir dos espectros obtidos. A validação foi realizada por meio de validação cruzada *leave-one-out*. O número de variáveis latentes foi definido com base na minimização do erro padrão e maximização do coeficiente de determinação durante a validação.

Espectros originais e pré-processados por primeira derivada (filtro de 13 pontos e polinômio de 2ª ordem), normalização e variação normal padrão (SNV) foram avaliados na construção dos modelos, buscando melhorar o desempenho preditivo. A seleção dos melhores modelos foi baseada em parâmetros estatísticos, como coeficientes de determinação para calibração e validação cruzada (R^2c e R^2cv), erros quadráticos médios (RMSEc, RMSEcv e RMSEp), razão de desempenho de desvio (RPDcv e RPD) e número de variáveis latentes (LV).

3. Resultados e discussão

3.1 Assinaturas espectrais

As assinaturas espectrais da madeira de clones de *Eucalyptus* obtidas com instrumento NIR de bancada (a) e portátil (b) podem ser vistas na Figura 1.

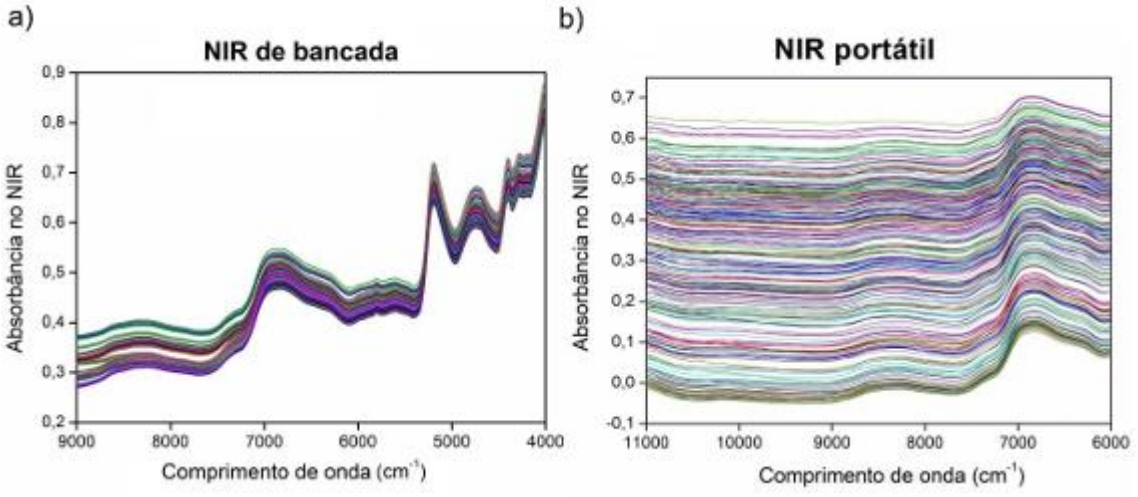


Figura 1 – Assinaturas espectrais da madeira de clones de *Eucalyptus* obtidas com instrumentos NIR de bancada e portátil.

Os valores de absorbância variaram entre 0,3 e 0,9 para o espectrômetro NIR de bancada e 0,0 e 0,7 para o NIR portátil, em ambas as espécies. Essa diferença é esperada e está relacionada às limitações do equipamento portátil, como menor intensidade da fonte de luz e menor abrangência espectral (Medeiros et al. 2024). Apesar disso, essas características não comprometem a capacidade do NIR portátil em fornecer informações suficientes para as análises estatísticas multivariadas.

Conforme descrito por Pasquini (2003), a radiação na região do infravermelho próximo (NIR) interage principalmente com as ligações químicas C–H, N–H, O–H e S–H presentes em materiais de origem biológica. A faixa espectral compreendida entre 7000 e 6287 cm^{-1} está associada às vibrações das regiões amorfa e cristalina da celulose (Schwanninger et al. 2011). A elevada intensidade dos picos observados nessa região pode ser atribuída à alta reatividade dos grupos hidroxila presentes nas cadeias de celulose, favorecendo a retenção de umidade. Como consequência, ocorre uma maior interação da radiação NIR com as vibrações desses grupos funcionais, aumentando a absorbância e a quantidade de informações espectrais obtidas sobre o material.

A região entre 8750 e 8540 cm^{-1} está relacionada às vibrações das ligações dos grupos aromáticos que compõem a lignina (Schwanninger et al. 2011). Por sua vez, a faixa de 6000 a 5970 cm^{-1} foi detectada exclusivamente pelo espectrômetro NIR de bancada, em razão de sua

maior abrangência espectral, sendo atribuída às vibrações das ligações presentes nas hemiceluloses e em compostos extrativos (Medeiros et al. 2023). Da mesma forma, a região entre 4808 e 4739 cm^{-1}, também registrada apenas pelo equipamento de bancada, corresponde às vibrações das ligações da celulose (Martins et al. 2026).

3.2 Análise de regressão por mínimos quadrados parciais (PLS-R)

A Figura 2 ilustra os modelos de validação cruzada de melhor desempenho para os clones de *Eucalyptus*. Para o desenvolvimento dos modelos, os espectros NIR foram avaliados com diferentes pré-processamentos matemáticos (primeira derivada, normalização e SNV), além dos espectros originais, sendo selecionados aqueles que apresentaram o melhor desempenho preditivo.

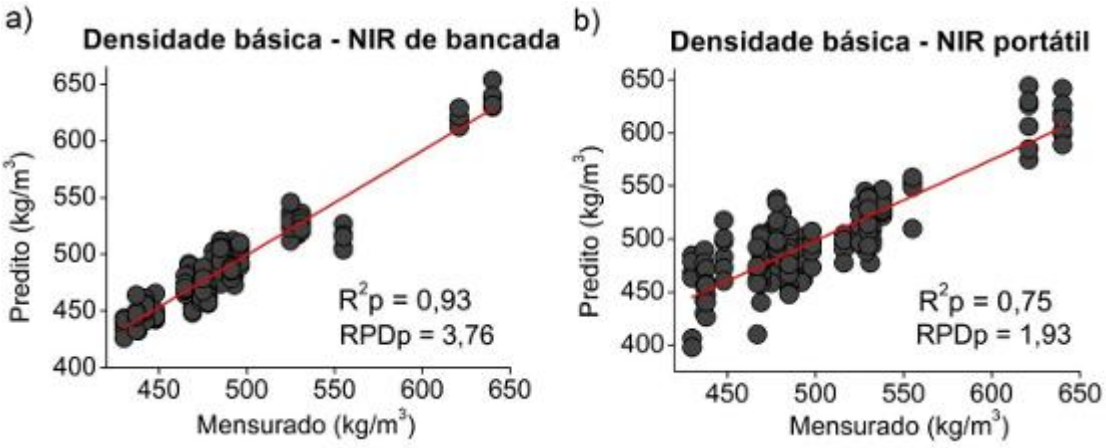


Figura 2 – Validação cruzada de modelos PLS-R para prever a densidade básica da madeira de clones de *Eucalyptus* com instrumentos NIR de bancada e portátil.

Os melhores modelos para os clones de *Eucalyptus* apresentaram R^2p de 0,93 e RPD de 3,76 com o NIR de bancada e R^2p de 0,75 e RPD de 1,93 com o NIR portátil, utilizando espectros sem pré-processamento. Tais resultados corroboram com os estudos reportados na literatura.

Costa et al. (2018), ao estimarem a densidade da madeira de *Eucalyptus* por meio de modelos PLS-R, obtiveram R^2p de 0,87 e RPD de 3,0 utilizando um espectrômetro NIR de bancada com esfera integradora, enquanto a aquisição dos espectros por fibra óptica resultou em R^2p de 0,78 e RPD de 2,10. Da mesma forma, Medeiros et al. (2024) verificaram bom desempenho de equipamentos NIR de bancada e portátil na predição da densidade básica de

cavacos de *Eucalyptus grandis*, ambos apresentando R^2cv de 0,82 e RMSEcv de 0,038 para espectros coletados na superfície radial sem aplicação de pré-processamentos matemáticos.

Os modelos desenvolvidos com o NIR portátil apresentaram desempenho inferior ao do equipamento de bancada, o que pode ser explicado pela menor área de aquisição dos espectros, pela faixa espectral mais limitada e pela menor intensidade da radiação emitida (Martins et al. 2025). Ainda assim, os resultados obtidos indicam que o equipamento portátil possui potencial para aplicações na indústria de bioenergia.

Cabe destacar que os modelos foram desenvolvidos em condições controladas de laboratório. Em situações de campo, fatores como exposição da madeira às condições climáticas, ataque de organismos xilófagos, variabilidade entre clones, posição longitudinal no tronco e práticas de manejo silvicultural podem alterar a resposta espectral da madeira e influenciar a precisão das predições, evidenciando a necessidade de estudos complementares.

4. Conclusões

A espectroscopia NIR mostrou-se uma ferramenta eficiente na predição da densidade básica da madeira de *Eucalyptus* utilizando instrumentos de bancada e portátil. O modelo PLS-R desenvolvido com o NIR de bancada apresentou maior desempenho preditivo, com R^2p de 0,93 e RPDp de 3,76, indicando elevada precisão e acurácia. Já o modelo obtido com o NIR portátil apresentou desempenho moderado, com R^2p de 0,75 e RPDp de 1,93. Assim, ambos os instrumentos podem ser utilizados na estimativa da densidade básica da madeira de *Eucalyptus* avaliada neste estudo, destacando-se o instrumento de bancada pela maior confiabilidade dos resultados e o portátil pela praticidade de aplicação, contribuindo para a seleção de clones superiores em programas de melhoramento genético florestal.

5. Agradecimentos

Este trabalho contou com o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001. Os autores agradecem também à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo suporte concedido.

6. Referências bibliográficas

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 11941: Wood – Determination of Basic Density, 2003. Rio de Janeiro, Brasil.

Costa, E. V. S., Rocha, M. F. V., Hein, P. R. G., Amaral, E. A., Santos, L. M. D., Brandão, L. E. V. D. S., & Trugilho, P. F. (2018a). Influence of spectral acquisition technique and wood anisotropy on the statistics of predictive near infrared–based models for wood density. Journal of Near Infrared Spectroscopy, 26, 106–116. https://doi.org/10.1177/0967033518757070

Hao, Y., Wang, Q., & Zhang, S. (2021). Rapid identification of wood species based on portable near-infrared spectrometry and chemometrics methods. International Journal of Spectroscopy, 37, 7–13.

Hein PRG, Lima JT, Chaix G (2010) Effects of sample preparation on NIR spectroscopic estimation of chemical properties of *Eucalyptus urophylla* S.T. Blake wood. Holzforschung 64:45–54. https://doi.org/10.1515/hf.2010.011

Lima, M. D. R., Ramalho, F. M. G., Trugilho, P. F., Bufalino, L., Júnior, A. F. D., Protásio, T. de Paula, & Hein, P. R. G. (2022). Classifying waste wood from Amazonian species by near-infrared spectroscopy (NIRS) to improve charcoal production. Renewable Energy, 193, 584–594. https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.05.048

Martins, C. C. N., Castro, V. R., Hein, P. R. G., Carneiro, A. D. C. O., Mascarenhas, A. R. P., Bufalino, L., Medeiros, D. T., Scatolino, M. V., Lima, M. D. R., Cunha, J. S., Andressa, I., Cardoso, R. S. G., & Demuner, I. F. (2025). Prediction of the energy properties of charcoal obtained from *Eucalyptus* and *Corymbia* biomass using portable and benchtop NIR spectrometers. BioEnergy Research, 18, 81. https://doi.org/10.1007/s12155-025-10882-4

Martins, C. C. N., Castro, V. R., Hein, P. R. G., Carneiro, A. D. C. O., Mascarenhas, A. R. P., Bufalino, L., Medeiros, D. T., Scatolino, M. V., Lima, M. D. R., Cardoso, R. S. G., Demuner, I. F., & Carvalho, A. M. M. L. (2026). Comparison of benchtop and handheld near-infrared spectroscopy for predicting wood properties in fast-growing plantations for bioenergy applications. Biomass and Bioenergy, 204, 108468. https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2025.108468

Medeiros, D. T. de, Gomes, J. N. N., Batista, F. G., Mascarenhas, A. R. P., Pimenta, E. M., Chaix, G., & Hein, P. R. G. (2024). Estimation of the basic density of Eucalyptus grandis wood chips at different moisture levels using benchtop and handheld NIR instruments. Industrial Crops and Products, 209, 117921. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2024.117921

Pasquini, C. (2003). Near infrared spectroscopy: Fundamentals, practical aspects and analytical applications. Journal of the Brazilian Chemical Society, 14, 198–219. https://doi.org/10.1590/S0103-50532003000200006

Sandak, J., Niemz, P., Hänsel, A., Mai, J., & Sandak, A. (2021). Feasibility of portable NIR spectrometer for quality assurance in glue-laminated timber production. Construction and Building Materials, 308, 125026. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125026

Schwanninger, M., Rodrigues, J. C., & Fackler, K. (2011). A review of band assignments in near infrared spectra of wood and wood components. Journal of Near Infrared Spectroscopy, 19, 287–308. https://doi.org/10.1255/jnirs.955

Toscano, G., Leoni, E., Gasperini, T., & Picchi, G. (2022). Performance of a portable NIR spectrometer for the determination of moisture content of industrial wood chips fuel. Fuel, 320, 123948. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.123948

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Estimativa da umidade de toras de *Eucalyptus sp*. em campo a partir de espectrômetros no nir portáteis

Caio Palmeira Goulart[1]; Thalles Loiola Dias[1]; Luíza Mendonça Bonfim Tavares[1]; Valdenia Medeiros de Araújo[1]; Paulo Ricardo Gherardi Hein[1]

Resumo: A umidade influencia os procedimentos operacionais no processamento da madeira. O método gravimétrico é utilizado para sua determinação, porém é moroso. A espectroscopia no infravermelho próximo (NIR) surge como alternativa rápida e precisa para estimar propriedades físicas e químicas da madeira. Este estudo visou desenvolver uma metodologia para monitorar a variação de umidade em toras empilhadas no campo utilizando espectrômetros portáteis. Amostras de serragem foram coletadas de toras de Eucalyptus sp. recém-abatidas por meio de furadeira portátil com diferentes brocas, sendo classificadas por granulometria e analisadas em laboratório para coleta de espectros e determinação da umidade. Discos retirados das toras também foram seccionados em cunhas para medição da umidade real e coleta espectral. Os dados subsidiaram a calibração e validação de modelos preditivos via regressão por mínimos quadrados parciais (PLS-R). A secagem das toras foi acompanhada por coletas espectrais e determinação da umidade da madeira em intervalos de 15 dias até o equilíbrio higroscópico. Espectros foram obtidos com os dispositivos MicroNIR e TrinamiX, da condição saturada até a de equilíbrio. Os modelos apresentaram alto desempenho: $R^2cv = 0,9370$ (MicroNIR) e $R^2cv = 0,8735$ (TrinamiX). Observou-se forte correlação entre a umidade da cunha e da serragem, validando esses materiais como indicadores confiáveis. Os espectros NIR demonstraram eficácia na estimativa da umidade da madeira em tempo real, com potencial para otimizar processos industriais em larga escala e garantir maior qualidade dos produtos por meio do monitoramento prévio da umidade.

Palavras-chave: Indústria madeireira; Umidade da madeira; Espectroscopia NIR.

Field estimation of moisture content in Eucalyptus sp. logs using portable near-infrared (NIR) spectrometers

Abstract: Wood moisture content directly influences industrial processing operations, affecting production efficiency and product quality. Although the gravimetric method is the standard procedure for moisture determination, it is time-consuming and unsuitable for real-time monitoring. Near-infrared (NIR) spectroscopy has emerged as a rapid, non-destructive, and reliable technique for estimating wood properties. This study aimed to develop a methodology for monitoring the moisture variation of stacked Eucalyptus sp. logs in the field using portable NIR spectrometers. Sawdust samples were collected from freshly harvested logs using a portable drill equipped with different drill bits, classified by particle size, and analyzed for spectral acquisition and moisture determination. Wood discs were also removed from the logs and sectioned into wedges for gravimetric moisture determination and spectral acquisition. The resulting dataset was used to calibrate and validate predictive models based on Partial Least Squares Regression (PLS-R). Log drying was monitored at 15-day intervals, from the saturated condition to hygroscopic equilibrium, through spectral measurements and moisture determination. Spectra were acquired using the portable MicroNIR and TrinamiX spectrometers. The developed models showed high predictive performance, with cross-

validation coefficients of determination (R^2cv) of 0.9370 for MicroNIR and 0.8735 for TrinamiX. A strong correlation was observed between wedge and sawdust moisture content, confirming the reliability of both sampling methods. These results demonstrate the potential of portable NIR spectroscopy for real-time field estimation of wood moisture content, providing a practical tool for industrial monitoring and process optimization.

Keywords: Wood industry; Wood moisture content; Near-infrared spectroscopy.

1. Introdução

A umidade da madeira influencia diretamente seu comportamento durante o processamento, a secagem e a preservação, além de afetar propriedades como a estabilidade dimensional. Na indústria madeireira, o monitoramento da umidade durante a secagem é essencial para garantir a qualidade dos produtos, uma vez que a madeira permanece empilhada e exposta às variações climáticas, resultando em diferenças significativas de umidade em função da posição das toras e do tempo de exposição (Baliza et al., 2022). Dessa forma, métodos precisos para monitoramento e controle da umidade são fundamentais para otimizar processos industriais e assegurar a qualidade da matéria-prima (Baliza et al., 2022).

Nesse contexto, a espectroscopia na região do infravermelho próximo (Near-Infrared Spectroscopy – NIR) destaca-se como uma técnica rápida, não destrutiva e de preparo mínimo de amostras, permitindo elevada penetração da radiação no material (Su et al., 2022). Os espectros NIR contêm informações relacionadas aos constituintes químicos e às propriedades da madeira que, associadas a métodos de análise multivariada, possibilitam o desenvolvimento de modelos preditivos para diferentes parâmetros de interesse (Amaral et al., 2020). Entre essas ferramentas, a Análise de Componentes Principais (PCA) é amplamente empregada na avaliação qualitativa dos espectros, enquanto a Regressão por Mínimos Quadrados Parciais (PLS-R) é a técnica mais utilizada para análises quantitativas (Sandak et al., 2016).

O princípio da espectroscopia NIR consiste na interação da radiação na região do infravermelho próximo com o material, produzindo espectros que refletem sua composição química. Quando correlacionados com métodos convencionais de análise, esses espectros permitem a construção de modelos estatísticos capazes de estimar diferentes propriedades de materiais biológicos, incluindo a madeira (Price et al., 2001; Pavia et al., 2010; Pasquini, 2018; Dahlbacka e Lillhonga, 2010; Tyson et al., 2012; Tsuchikawa e Schwanninger, 2013; Tsuchikawa e Kobori, 2015; Arriel et al., 2019).

Diversos estudos demonstraram o potencial da espectroscopia NIR para estimar a umidade da madeira. Entre eles destacam-se o desenvolvimento de modelos para madeira de eucalipto (Santos et al., 2020), a avaliação do desempenho de equipamentos NIR portáteis adaptados para uso em linha (Leoni et al., 2024), o monitoramento do comportamento hidromecânico da madeira durante a secagem por meio de espectroscopia NIR associada à análise de imagens (Amaral et al., 2023) e o acompanhamento da dessorção de água em polpa de celulose utilizando espectroscopia NIR (Medeiros et al., 2023).

Embora esses estudos evidenciem o potencial da técnica para caracterização da madeira em condições laboratoriais, ainda são escassas as metodologias voltadas à aplicação prática de espectrômetros NIR portáteis em condições de campo. As abordagens disponíveis concentram-se, em sua maioria, em ambientes controlados, permanecendo pouco compreendido o potencial da aquisição espectral em serragem obtida de toras recém-abatidas ou em processo de secagem por meio de furadeira ou motosserra para o monitoramento em tempo real. Nesse contexto, este trabalho teve como objetivo desenvolver uma metodologia para monitorar a umidade de toras de madeira empilhadas em campo por meio de espectroscopia NIR utilizando amostras de serragem obtidas diretamente das toras.

2. Material e métodos

Foram utilizadas árvores de Eucalyptus sp. com idade de 22 anos provenientes do plantio florestal experimental da Universidade Federal de Lavras – UFLA, Minas Gerais, que foram abatidas e levadas ao pátio de secagem da Unidade experimental de processamento da madeira.

Foram utilizadas três brocas de pré-teste (1/2” x 11”, 5/16” x 11”, e 3/4” x 11”) para retirada da serragem em cinco posições do fuste, a cada 5 m a 30 cm das bordas.

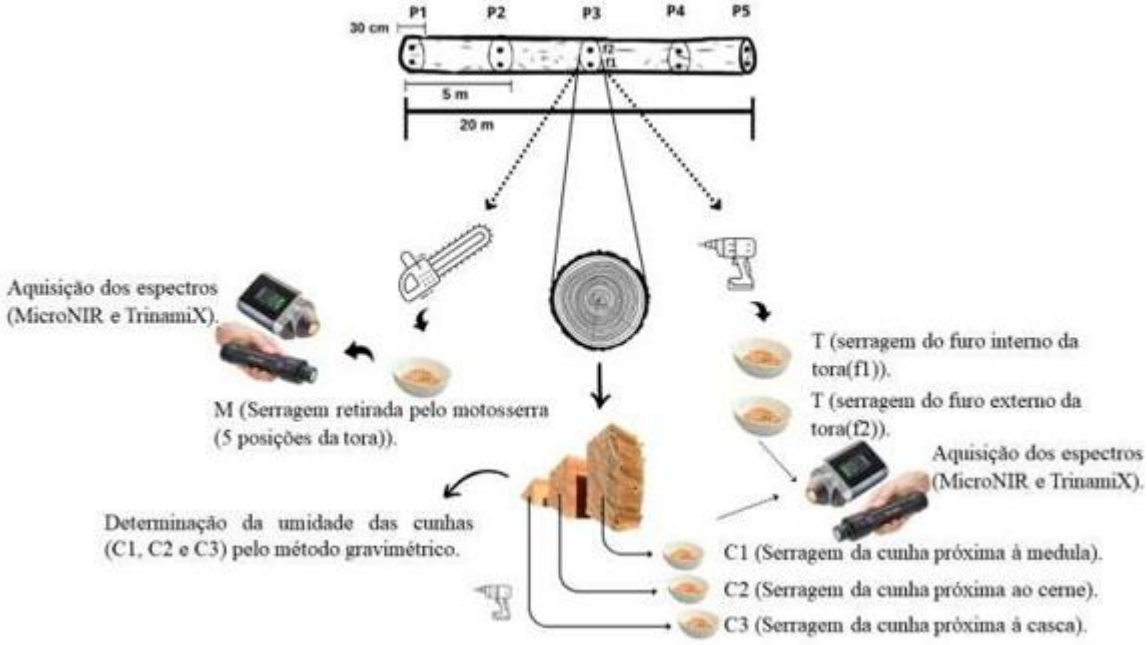


Figura 1 – Esquema metodológico para o desenvolvimento do trabalho. P (posição); f (furo interno (próximo à medula) (furo externo próximo à casca)); M (motosserra); C (cunha) T (tora).

As diferentes brocas foram utilizadas a fim de avaliar a melhor granulometria e a praticidade da coleta e assim foi escolhida a de granulometria (5/16). Em seguida foram retirados discos de 7 cm das mesmas extremidades de coleta de serragem, com auxílio de motosserra (Figura 1). Cada árvore gerou 5 discos que foram subdivididos em 3 partes (próximo a casca, próximo a medula e próximo ao cerne) a fim de observar a variação de umidade no sentido medula-casca.

Os espectros NIR foram registrados a partir de dois equipamentos portáteis: MicroNIR e TrinamiX de acordo registros realizados também por Gomes et al. (2025) e Medeiros et al. (2024). Foram coletados dados espectrais da serragem coletada.

O processamento dos dados foi realizado no Chemoface versão 1.71 (Nunes et al., 2012). A análises de componentes principais (PCA) foi aplicada a fim de explorar os dados bem como avaliar a dependência deles por meio de agrupamentos. Os espectros coletados foram analisados pela estatística multivariada na sua forma original e tratada com primeira derivada (15 pontos de alisamento, polinômio de 2º grau e derivada de 1° ordem).

Para ajustar os modelos preditivos foi realizada a análise de regressão por mínimos quadrados parciais (PLS-R), associando as informações espectrais obtidas com a umidade determinada em laboratório pelo método gravimétrico, com o objetivo de gerar modelo global para cada tratamento avaliado. A validação cruzada e independente foi realizada para fins de comparação.

As transformações matemáticas espectrais propostas por Savitzky e Golay (1964) também foram testadas usando os seguintes esquemas: 25.2.1 (25 pontos de suavização, polinômio de segunda ordem, primeira derivada); 15.2.2 (15 pontos de suavização, polinômio de segunda ordem, segunda derivada) conforme descrito em Novaes et al. (2023) Tratamentos de padronização de Variável Normal Padrão (SNV) (Barnes et al. 1989) e o Método de Espalhamento Multiplicativo (MSC) também foram testados (Geladi et al. 1985). Para a transformação MSC, o espectro médio do conjunto de calibração foi usado como espectro de referência. De um ponto de vista prático, usar apenas a primeira ou a segunda derivada seria preferível.

Amostras que apresentaram grande variação residual ou ruído espectral foram previamente detectadas em análises visuais e tiveram seus espectros imediatamente remensurados. Assim, o banco de dados não continha nenhuma amostra anômala e nenhuma leitura foi considerada outlier. Neste delineamento, o ponto de partida foi considerado o comprimento de onda de 11013 cm-1 para o equipamento de bancada, que corresponde ao mesmo ponto de partida dos espectros do sensor portátil.

Para a calibração e validação as amostras em que foram colhidos dados das análises convencionais feitas em laboratório foram analisadas também pelos espectrômetros portáteis. Posteriormente, os valores de absorbância obtidos pelo equipamento, bem como os valores convencionais obtidos em laboratório foram utilizados para calcular os parâmetros de calibração do modelo estatístico. Sendo assim, o modelo foi validado e usado na etapa de previsão, no qual os valores convencionais de amostras desconhecidas foram estimados após a mensuração dos valores de absorbância dessas amostras.

Os parâmetros adotados para selecionar os melhores modelos preditivos foram R^2c (coeficiente de determinação da calibração); RMSEc (raiz do erro quadrático médio na calibração); R^2cv (coeficiente de determinação da validação cruzada) e RMSEcv (raiz do erro quadrático médio na validação cruzada).

Foi utilizado também ajuste de regressão com 95% de probabilidade para verificar o grau da relação existentes entre os valores de umidade obtidos na cunha, tora e furo.

3. Resultados e discussão

A dispersão dos valores previstos pelo MicroNIR e TrinamiX, em que o modelo global com os dados brutos pelo MicroNIR apresentou R^2cv de 0,9370, MSC com R^2cv de 0,9127 e primeira derivada com R^2cv de 0,9276 (Tabela 1). Para o TrinamiX, o modelo global com os dados brutos apresentou R^2cv de 0,8735, o modelo realizado a partir dos espectros tratados por correção multiplicativa de espalhamento (MSC) com R^2cv de 0,7817 e primeira derivada R^2cv de 0,7911. Visto isso, todos os modelos se apresentaram eficientes na estimativa de umidade, com destaque para o modelo global gerado a partir do MicroNIR.

Tabela 1 – Calibrações e validações cruzadas para estimar a umidade da madeira com base em espectros NIR.

Modelo	Trat	Aquisição	R^2c	RMSEc	R^2cv	RMSEcv	LV	RPD
1	Dados brutos	MicroNIR	0,9662	3,1470	0,9370	4,2989	10	4,0643
2	MSC	MicroNIR	0,9413	4,1461	0,9127	5,0635	8	3,4371
3	1ª derivada	MicroNIR	0,9510	3,7958	0,9276	4,6097	7	3,7851
4	Dados brutos	TrinamiX	0,9045	5,3002	0,8735	6,0925	6	2,8740
5	MSC	TrinamiX	0,8292	7,0761	0,7817	8,0231	5	2,1880
6	1ª derivada	TrinamiX	0,8374	6,9566	0,7911	7,8402	4	2,2452

Diante disso, observa-se nesse estudo, correlação adequada, evidenciando que os modelos preditivos para avaliar a umidade de madeira de *Eucalyptus* apresentados nesse estudo, podem ser utilizados para avaliar a umidade da madeira em tempo real utilizando um espectrômetro portátil em empresas que utilizam a madeira como matéria-prima por exemplo, na indústria moveleira. Dessa forma, facilita a medição da umidade da madeira no seu ponto ideal para a fabricação dos produtos (Amaral et al., 2020).

Adicionalmente, a Figura 2 apresenta a regressão de cada tratamento (serragem do furo na cunha, serragem do motosserra e serragem da tora). A partir dele é possível observar que caso seja utilizado apenas uma metodologia na coleta da serragem, o espectro NIR também se mostra efetivo, apresentando R^2 elevados com forte correlação entre as variáveis.

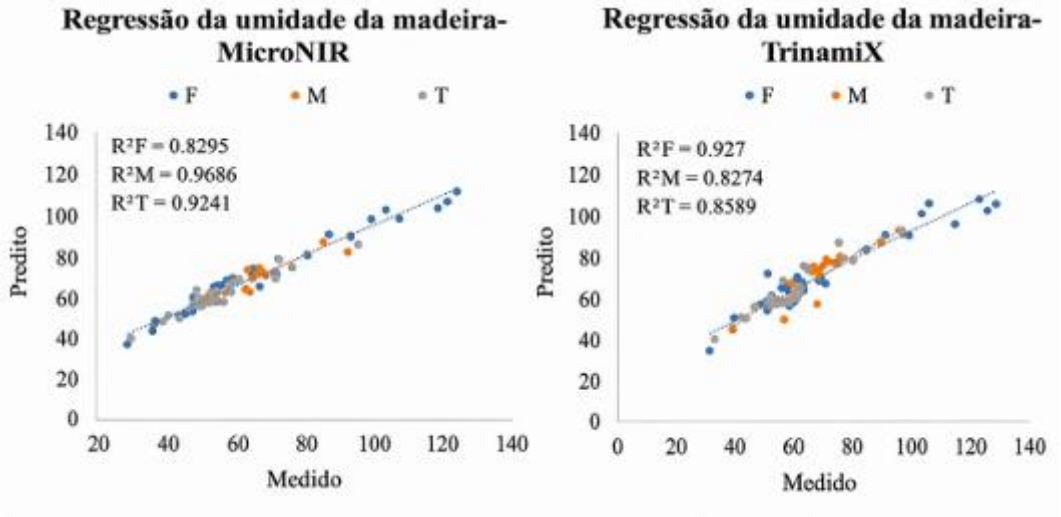


Figura 2 – Regressão dos valores de umidade obtidos por MicroNIR (A) e TrinamiX. (B). F (serragem pelo furo na cunha) M (serragem por motosserra) e T (serragem da tora).

4. Conclusão

Os resultados obtidos neste estudo demonstram a viabilidade do uso de espectrômetros portáteis na região do infravermelho próximo (NIR) para estimar a umidade da madeira de toras de Eucalyptus sp. Observou-se forte correlação entre a umidade obtida pelas cunhas e pela serragem extraída com furadeira e motosserra, indicando que a serragem pode ser utilizada como indicador confiável da umidade da tora.

Os modelos preditivos ajustados com espectros coletados pelos equipamentos MicroNIR e TrinamiX apresentaram desempenho satisfatório. O modelo global com o MicroNIR alcançou R^2cv de 0,9370 e RMSE de 4,3%, enquanto o TrinamiX apresentou R^2cv de 0,8735 e RMSE de 6,1%. A validação cruzada dos modelos PLS-R confirmou a precisão dos espectros para aferir a umidade, com o MicroNIR mostrando os melhores resultados.

Com isso, a metodologia desenvolvida neste trabalho representa alternativa viável, rápida e não destrutiva para o monitoramento da umidade da madeira em pátios de secagem. A aplicação prática desse método pode otimizar o controle do teor de água antes do processamento industrial, contribuindo para a eficiência produtiva e qualidade dos produtos madeireiros. Além disso, os resultados obtidos reforçam o potencial dos espectrômetros NIR portáteis como ferramentas tecnológicas aplicáveis em larga escala, alinhadas às demandas por sustentabilidade e inovação na indústria florestal

5. Agradecimentos

Este trabalho foi financiado pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) – Código de Financiamento 001; pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq; processo nº 409701/2024-6); pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG; APQ-00742-23); e pelo programa INOV@ÇÃO UFLA (TO 032/2026 – Processo nº 23090.000734/2026-70). P.R.G. Hein recebeu apoio do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq; processo nº 304353/2024-8).

6. Referências bibliográficas

AMARAL, E. A.; BALIZA, L. F.; SILVA, C. H.; RAMALHO, F. M. G.; TRUGILHO, P. F.;SOL, H.; HEIN, P. R. G. Estimation of moisture in wood chips by Near Infrared Spectroscopy. Maderas, Cienc. tecnol., Concepción, v. 22, n. 3, p. 291-302, 2020.

ARRIEL, T. G.; RAMALHO, F. M. G.; LIMA, R. A. B.; SOUSA, K. I. D.; HEIN, P. R. G.;TRUGILHO, P. F. Developing near-infrared spectroscopic models for predicting the density of Eucalyptus wood based on indirect measurements. Cerne, v. 25, n. 3, p. 294-300, 2019. DOI: 10.1590/01047760201925032646.

BARNES, R. J.; DHANOA, M. S.; AND LISTER, S. J. Standard normal variate transformation and de-trending of near-infrared diffuse reflectance spectra. Applied Spectroscopy 43: 772-777,1989. https://doi.org/10.1366/0003702894202201

CARMO, A. P. T. Avaliação de algumas propriedades da madeira de seis espécies de eucalipto. 74 f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) — Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1996.

CHAUDHRY, Muhammad Mudassir Arif. Innovative and non-destructive technologies to evaluate quality of rocket leaves for ready to eat salads. 2019. Doctoral Thesis (PhD in Management of Innovation in the Agricultural and Food Systems of the Mediterranean Region) — Università di Foggia, Dipartimento di Scienze Agrarie, degli Alimenti e dell'Ambiente, Foggia, 2019.

COSTA, E. V. S.; ROCHA, M. F. V.; HEIN, P. R. G.; AMARAL, E. A.; SANTOS, L. M. D.; BRANDÃO, L. E. V. S.; TRUGILHO, P. F. Influence of spectral acquisition technique and wood anisotropy on the statistics of predictive near-infrared–based models for

wood density. Journal of Infrared Spectroscopy, v. 26, n. 2, p. 106-116, 2018. DOI: 10.1177/0967033518757070.

FANG, L.; ZENG, J.; ZHANG, X.; WANG, D. Effect of veneer initial moisture content on the performance of polyethylene film reinforced decorative veneer. Forests, v. 12, n. 1, p. 102, 2021.

FENG, X.; CHEN, J.; YU, S.; WU, Z.; HUANG, Q. Mild hydrothermal modification of beech wood (Zelkova schneideriana Hand-Mzt): Its physical, structural, and mechanical properties. European Journal of Wood and Wood Products, v. 80, n. 4, p. 933-945, 2022.

GELADI, P., MACDOUGALL, D., AND MARTENS, H. Linearization and scatter-correction for near-infrared reflectance spectra of meat. Applied Spectroscopy 39(3): 491-500. 1985. https://doi.org/10.1366/0003702854248656

GOMES, J. N. N, MEDEIROS, D. T, VIANA, L. C, & HEIN, P. R. G. Influência da umidade na identificação de espécies lenhosas tropicais por espectroscopia NIR. Holzforschung, 79 (4- 5), 188-201. 2025.

HEIN, P. R. G.; LIMA, J. T.; CHAIX, G. Robustness of models based on near infrared spectra to predict the basic density in Eucalyptus urophylla wood. Journal of Near Infrared Spectroscopy, v. 17, n. 3, p. 141-150, 2009.

HERRERA-DÍAZ, R. et al. Effect of wood drying and heat modification on some physical and mechanical properties of radiata pine. Drying Technology, v. 36, n. 5, p. 537-544, 2018.

KAPOOR, R.; MALVANDI, A.; FENG, H.; KAMRUZZAMAN, M. Real-time moisture monitoring of coated edible apple chips during hot air drying using miniature NIR spectroscopy and chemometrics. LWT, v. 154, p. 112602, 2022. DOI: https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.112602.

KASK, R.; LILLE, H.; KIVISTE, M.; KRUUS, S.; LÄÄNE, J. O. Effect of soaking/oven-drying on mechanical and physical properties of birch (Betula spp.) plywood. Drvna Industrija, v. 72, n. 2, p. 121-129, 2021.

KLEMENT, I.; VILKOVSKÁ, T.; BARANSKI, J.; KONOPKA, A. The impact of drying and steaming processes on surface color changes of tension and normal beech wood. Drying Technology, v. 37, n. 12, p. 1490-1497, 2019.

LIMA, M. D. R.; RAMALHO, F. M. G.; TRUGILHO, P. F.; BUFALINO, L.; JÚNIOR, A. F. D.; DE PAULA PROTÁSIO, T.; HEIN, P. R. G. Classifying waste wood

from Amazonian species by near-infrared spectroscopy (NIRS) to improve charcoal production. Renewable Energy, v. 193, p. 584-594, 2022b.

LIMA, M. D. R.; TRUGILHO, P. F.; BUFALINO, L.; JÚNIOR, A. F. D.; RAMALHO, F. M.G.; DE PAULA PROTÁSIO, T.; HEIN, P. R. G. Efficiency of near-infrared spectroscopy in classifying Amazonian wood wastes for bioenergy generation. Biomass and Bioenergy, v.166, p. 106617, 2022a.

LIU, H.; ZHANG, J.; JIANG, W.; CAI, Y. Characteristics of commercial-scale radio-frequency/vacuum (RF/V) drying for hardwood lumber. BioResources, v. 14, n. 3, p. 6923-6935, 2019.

MA, L.; PENG, Y.; PEI, Y.; ZENG, J.; SHEN, H.; CAO, J.; WU, Z. Systematic discovery about NIR spectral assignment from chemical structural property to natural chemical compounds. Scientific Reports, v. 9, n. 1, p. 9503, 2019.

MEDEIROS, D. T. de; GOMES, J. N. N.; BATISTA, F. G.; MASCARENHAS, A. R. P.; PIMENTA, E. M.; CHAIX, G.; HEIN, P. R. G. Estimation of the basic density of Eucalyptus grandis wood chips at different moisture levels using benchtop and handheld NIR instruments. Industrial Crops and Products, v. 209, p. 117921, 2024.

NISHIYAMA, Y. Retrieving structural information from scattering and attenuation data of transparent wood and (Nano) paper. Journal of Bioresources and Bioproducts, v. 6, n. 3, p. 187-194, 2021.

NOVAES, T. V.; RAMALHO, F. M. G.; DA SILVA ARAUJO, E.; LIMA, M. D. R.; DA SILVA, M. G.; FERREIRA, G. C.; HEIN, P. R. G. Discrimination of Amazonian Forest species by NIR spectroscopy: wood surface effects. European Journal of Wood and Wood Products, v. 81, n. 1, p. 159-172, 2023.

NOVAES, T. V.; RAMALHO, F. M. G.; SILVA, E.; LIMA, M. D. R.; SILVA, M. G.; FERREIRA, G. C. E. HEIN, P. R. G. Discriminação de espécies florestais amazônicas por espectroscopia NIR: efeitos na superfície da madeira. EUR. J. Madeira Madeira Prod. 81: 159–172, 2023. https://doi.org/10.1007/s00107-022-01862-y.

OZAKI, Y.; HUCK, C.; TSUCHIKAWA, S.; ENGELSEN, S. B. (Eds.). Near-infrared spectroscopy: theory, spectral analysis, instrumentation, and applications. Springer Nature, 2020.

PASSARINI, L.; HERNÁNDEZ, R. E. Effect of the desorption rate on the dimensional changes of Eucalyptus saligna wood. Wood Science and Technology, v. 50, n. 5, p. 941-951, 2016.

ROSSO, S.; MUNIZ, G. I. B. D.; MATOS, J. L. M. D.; HASELEIN, C. R.; HEIN, P. R. G.; LOPES, M. D. C. Predição da massa específica de Eucalyptus grandis W. Hill ex Maiden por espectroscopia no infravermelho próximo. Cerne, v. 19, p. 647-652, 2013.

SAVITZKY, A.; AND GOLAY, M. J. Smoothing and differentiation of data by simplified least squares procedures. Analytical Chemistry 36: 1627-1639. 1964.

SHEN, Y.; GAO, Z.; HOU, X.; CHEN, Z.; JIANG, J.; SUN, J. Spectral and thermal analysis of Eucalyptus wood drying at different temperature and methods. Drying Technology, [S. l.], 2020.

TOSCANO, G.; LEONI, E.; GASPERINI, T.; PICCHI, G. Performance of a portable NIR spectrometer for the determination of moisture content of industrial wood chips fuel. Fuel, 320, 123948, 2022.

YANG, Y. Q.; XU, W.; LIU, X.; WANG, X. D. Study on permeability of cunninghamia lanceolata based on steam treatment and freeze treatment. Wood Research, v. 66, p. 721-731, 2021.

YIN, Q.; LIU, H. H. Drying stress and strain of wood: a review. Applied Sciences, v. 11, n. 11, p. 5023, 2021.

ZAHIR, S. A. D. M.; OMAR, A. F.; JAMLOS, M. F.; AZMI, M. A. M.; MUNCAN, J. A review of visible and near-infrared (Vis-NIR) spectroscopy application in plant stress detection. Sensors and Actuators A: Physical, v. 338, p. 113468, 2022.

ZEN, L. R.; NASCIMENTO, T. M.; SANTOS, J. H.; KLITZKE, R. J.; ROCHA, M. P.; MONTEIRO, T. C. Drying methods to evaluate the quality of Eucalyptus sawn timber. Australian Journal of Basic and Applied Sciences, v. 14, n. 2, p. 22-30, fev. 2020. DOI: 10.22587/ajbas.2020.14.2.4.

ZHANG, X.; DUAN, Z.; MAO, H.; GAO, H.; ZUO, Z. A lettuce moisture detection method based on terahertz time-domain spectroscopy. Ciência Rural, v. 52, n. 6, p. e20210002, 2021.

ZHOU, T.; LIU, H. Research progress of wood cell wall modification and functional improvement: A review. Materials, v. 15, n. 4, p. 1598, 2022.

ZHOU, X.; SUN, J.; MAO, H.; WU, X.; ZHANG, X.; YANG, N. Visualization research of moisture content in leaf lettuce leaves based on WT-PLSR and hyperspectral imaging technology. Journal of Food Process Engineering, v. 41, n. 2, p. e12647, 2018.

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Estimativa do teor de carbono fixo do carvão vegetal de *Eucalyptus* utilizando espectroscopia NIR

Caio Cesar Nemer Martins[1]; Vinícius Resende de Castro[1]; Paulo Ricardo Gherardi Hein[2]; Angélica de Cássia Oliveira Carneiro[1]; Adriano Reis Prazeres Mascarenhas[3]; Lina Bufalino[4]; Dayane Targino de Medeiros[2]; Maria Eduarda de Castro Flores[1]

[1] Universidade Federal de Viçosa
[2] Universidade Federal de Lavras
[3] Universidade Federal de Rondônia
[4] Universidade Federal Rural da Amazônia

Resumo: O controle da qualidade do carvão vegetal é essencial para o setor siderúrgico. A espectroscopia no infravermelho próximo (NIR) permite a previsão rápida, precisa e de baixo custo de propriedades-chave da madeira e de seus produtos. Este estudo teve como objetivo avaliar o uso de instrumentos NIR de bancada e portátil na predição do teor de carbono fixo do carvão vegetal produzido a partir da biomassa lenhosa de 11 clones comerciais de *Eucalyptus*. Duas árvores por clone foram amostradas em seis posições ao longo do tronco, resultando em 22 amostras compostas de madeira. Após a carbonização e moagem, os dados espectrais foram coletados, totalizando 440 espectros por instrumento. O modelo de regressão por mínimos quadrados parciais (PLS-R) utilizando o NIR de bancada apresentou coeficiente de determinação na predição (R^2p) de 0,63 e razão entre o desempenho e o desvio padrão (RPDp) de 1,64, enquanto o NIR portátil apresentou desempenho semelhante (R^2p = 0,63; RPDp = 1,71). De modo geral, os instrumentos NIR de bancada e portátil apresentaram desempenho similar na estimativa do teor de carbono fixo do carvão vegetal, demonstrando potencial como ferramentas úteis para o controle de qualidade no setor florestal e siderúrgico.

Palavras-chave: Biomassa florestal; Bionergia; Estatística multivariada.

Estimation of the fixed carbon content of *Eucalyptus* charcoal using NIR spectroscopy

Abstract: Quality control of charcoal is essential for the steel industry. Near-infrared spectroscopy (NIR) enables rapid, accurate, and low-cost prediction of key properties of wood and its products. This study aimed to evaluate the use of benchtop and portable NIR instruments in predicting the fixed carbon content of charcoal produced from the woody biomass of 11 commercial *Eucalyptus clones*. Two trees per clone were sampled at six positions along the stem, resulting in 22 composite wood samples. After carbonization and grinding, spectral data were collected, totaling 440 spectra per instrument. The partial least squares regression (PLS-R) model using the benchtop NIR instrument showed a coefficient of determination for prediction (R^2p) of 0.63 and a ratio of performance to deviation (RPDp) of 1.64, while the portable NIR instrument showed similar performance (R^2p = 0.63; RPDp = 1.71). Overall, the benchtop and portable NIR instruments showed similar performance in estimating the fixed carbon content of charcoal, demonstrating potential as useful tools for quality control in the forestry and steel sectors.

Keywords: Forest biomass; Bioenergy; Multivariate statistics.

1. Introdução

O Brasil se destaca como o maior produtor e consumidor mundial de carvão vegetal, cuja produção é destinada principalmente ao setor siderúrgico (Ibá, 2025). Nesse segmento, o carvão vegetal exerce papel fundamental como fonte de energia e agente biorredutor, contribuindo para uma produção de aço mais limpa devido aos menores teores de enxofre e cinzas em comparação ao carvão mineral (Lima et al. 2022).

Para garantir a qualidade do carvão vegetal, é essencial monitorar propriedades como teor de carbono fixo, uma vez que essa característica influencia diretamente a eficiência industrial e a qualidade dos produtos obtidos. Entretanto, as análises laboratoriais convencionais são, em geral, demoradas, custosas e pouco compatíveis com a dinâmica operacional da produção industrial (Medeiros et al. 2024).

Nesse contexto, a espectroscopia no infravermelho próximo (NIR) surge como uma alternativa rápida e confiável para a caracterização de materiais lignocelulósicos e seus produtos. Estudos anteriores demonstraram o potencial de instrumentos NIR de bancada na avaliação qualitativa e quantitativa das propriedades do carvão vegetal (Ramalho et al. 2017; Costa et al. 2018).

Contudo, o uso de instrumentos NIR portáteis para a caracterização desse material ainda é pouco explorado, especialmente para carvões produzidos a partir de clones de *Eucalyptus*. Os instrumentos portáteis apresentam vantagens como menor custo, maior flexibilidade operacional e possibilidade de análises em campo, o que pode otimizar os processos de controle de qualidade em ambientes industriais (Martins et al. 2025; Martins et al. 2026).

Dessa forma, baseado na hipótese de precisão comparável entre os equipamentos, este estudo teve como objetivo avaliar o potencial de instrumentos NIR de bancada e portátil na predição do teor de carbono fixo do carvão vegetal produzido a partir de clones de *Eucalyptus*.

2. Material e métodos

2.1 Obtenção e preparação do material vegetal

Foram avaliados 11 clones comerciais de Eucalyptus, com 84 meses de idade, cultivados em espaçamento de 3 × 3 m em Itamarandiba, Minas Gerais. Os fustes foram seccionados para

coleta de discos em seis posições longitudinais (0, DAP, 25, 50, 75 e 100%), formando uma amostra composta por clone. Em seguida, o material foi destinado a carbonização.

2.2 Carbonização da madeira

Após a obtenção das amostras de cada clone, a madeira foi seccionada e seca em estufa a 103 ± 2°C por 72 h, até massa constante. A carbonização foi realizada individualmente para cada clone em mufla elétrica, utilizando cerca de 400 g de madeira por ciclo. As amostras foram acondicionadas em recipiente metálico acoplado à mufla, com aquecimento controlado manualmente e taxa média de 4,17°C/min. A temperatura variou de 150 a 450°C, permanecendo estabilizada na temperatura final por 60 min, totalizando 7 h e 30 min de carbonização. Após o processo, o resfriamento ocorreu por convecção natural durante 16 h.

2.3 Características do carvão vegetal

As amostras de carvão vegetal foram trituradas manualmente e classificadas em peneiras de 0,42 e 0,25 mm, sendo utilizado o material retido na peneira de 0,25 mm. A composição química imediata foi determinada conforme a norma ABNT NBR 8112. O teor de materiais voláteis foi obtido em mufla a 950 °C, enquanto o teor de cinzas foi determinado após combustão completa a 600 °C por 6 h. O teor de carbono fixo foi calculado por diferença em relação aos teores de materiais voláteis e cinzas.

2.4 Preparo das amostras para a coleta dos espectros

As amostras de carvão vegetal moído de cada clone, provenientes das posições 0, DAP, 25, 50, 75 e 100%, foram classificadas em peneiras de 0,42 e 0,25 mm, sendo utilizado o material retido na peneira de 0,25 mm. Em seguida, permaneceram em ambiente climatizado a 20 °C e 65% de umidade relativa até atingirem aproximadamente 6% de umidade de equilíbrio (base seca). Após o condicionamento das amostras, as análises espectrais foram realizadas em espectrômetros NIR de bancada e portátil. No equipamento de bancada, as amostras foram analisadas em cubetas específicas, enquanto no portátil as medições ocorreram diretamente em recipientes translúcidos, utilizando placas de Petri.

2.5 Aquisição dos espectros

Os espectros NIR foram obtidos com instrumentos de bancada e portátil. O equipamento de bancada (Bruker MPA) operou por reflectância difusa na faixa de 12.500–3.500 cm^{-1},

utilizando 16 varreduras por espectro e seleção de bandas entre 9.000–4.000 cm^{-1}. O portátil MicroNIR On-site operou na faixa de 11.000–6.000 cm^{-1}, também com 16 varreduras por leitura. Foram realizadas 20 leituras por amostra, totalizando 440 espectros, posteriormente utilizados no desenvolvimento de modelos multivariados.

2.6 Estatística multivariada

A análise multivariada foi realizada no *software* Chemoface 1.63. Modelos PLS-R foram ajustados com espectros do instrumento de bancada e portátil para predizer o teor de carbono fixo. Os modelos foram validados por validação cruzada *leave-one-out*. Considerando a obtenção de múltiplas leituras espectrais por amostra, essa estratégia foi adotada para reduzir a superestimação da capacidade preditiva dos modelos, garantindo maior independência entre os conjuntos de dados e proporcionando uma avaliação mais robusta e representativa do desempenho dos modelos desenvolvidos.

Foram aplicados tratamentos matemáticos aos espectros, como derivada de primeira ordem, normalização e SNV, visando melhorar o desempenho preditivo dos modelos. A seleção dos melhores modelos foi baseada em parâmetros estatísticos, como coeficientes de determinação para calibração e validação cruzada (R^2c e R^2cv), erros quadráticos médios (RMSEc, RMSEcv e RMSEp), razão de desempenho de desvio (RPDcv e RPD) e número de variáveis latentes (LV).

3. Resultados e discussão

3.1 Assinaturas espectrais

A Figura 1 mostra as assinaturas espectrais originais para o conjunto de dados de carvão vegetal de clones de *Eucalyptus*.

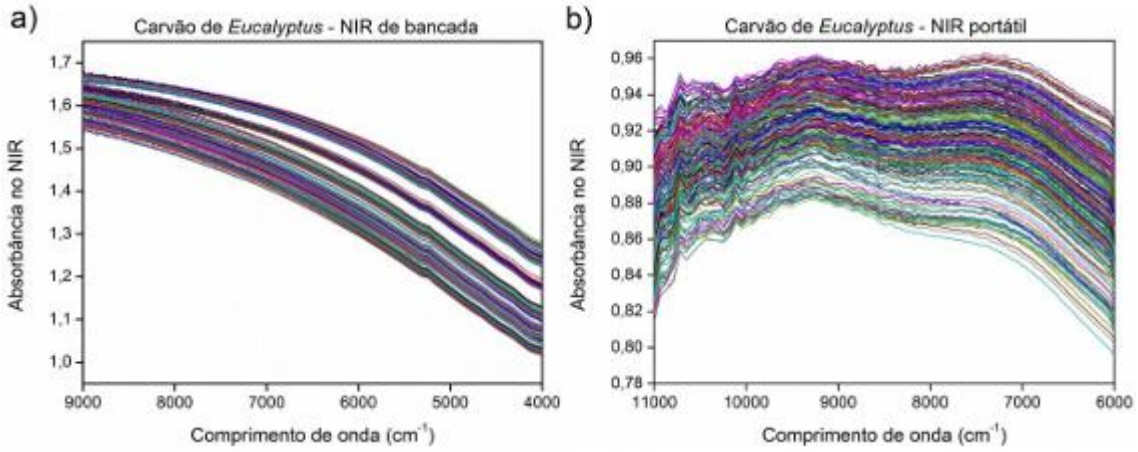


Figura 1 – Assinaturas espectrais do carvão vegetal de clones de *Eucalyptus* obtidas com instrumentos NIR de bancada (a) e portátil (b).

As bandas de absorção apresentam maior intensidade em números de onda específicos, variando conforme a composição química do material, conforme observado na Figura 1. Neste estudo, o carvão vegetal apresentou menor intensidade de absorbância no NIR, resultando em espectros mais homogêneos e com redução de picos informativos. Resultados semelhantes foram observados por Martins et al. (2025) em carvão vegetal de *Eucalyptus* carbonizado a 450 °C.

Apesar da maior homogeneidade das assinaturas espectrais do carvão vegetal, foram observadas interações em algumas bandas de absorção. Além disso, mesmo com diferentes faixas espectrais entre os equipamentos NIR de bancada e portátil, ambos permitiram identificar picos característicos de constituintes químicos orgânicos, possibilitando a obtenção de informações por meio de análises estatísticas multivariadas.

Os espectros NIR de bancada apresentaram picos entre 7.200 e 5.300 cm^{-1}, associados às vibrações de OH (Abreu Neto et al. 2020). Já os espectros do equipamento portátil evidenciaram pico em torno de 9.800 cm^{-1}, relacionado às ligações C-H e N-H (Ramalho et al. 2017).

3.2 Análise de regressão por mínimos quadrados parciais (PLS-R)

A Figura 2 apresenta os melhores modelos de validação cruzada para o carvão vegetal dos clones de *Eucalyptus*. Para o ajuste dos modelos, foram avaliados espectros originais e tratados matematicamente por primeira derivada, normalização e SNV, sendo os melhores resultados obtidos com os espectros originais.

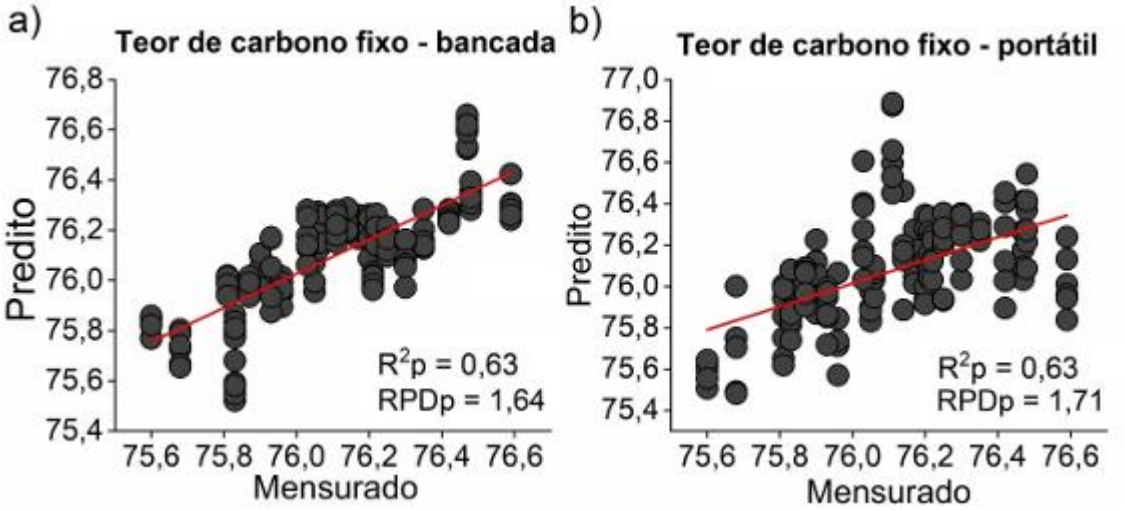


Figura 2 – Validação cruzada de modelos PLS-R para prever o teor de carbono fixo do carvão vegetal de clones de *Eucalyptus* com instrumentos NIR de bancada (a) e portátil (b).

Os melhores modelos de predição do TCF apresentaram desempenho semelhante para os equipamentos NIR de bancada e portátil, com R^2p de 0,63 e valores de RPD entre 1,64 e 1,71, utilizando espectros sem tratamento matemático.

Quando comparados a estudos anteriores envolvendo espectroscopia NIR aplicada ao carvão vegetal, os resultados observados neste trabalho foram semelhantes aos observados por Ramalho et al. (2019), que obtiveram valores de R^2cv de 0,60 e RMSEcv de 1,402 para carvões retidos na peneira de 0,25 mm. No entanto, os resultados deste estudo foram inferiores aos relatados por Costa et al. (2018), que encontraram R^2cv de 0,97 para estimar o teor de carbono fixo. Este fato pode estar associado à menor quantidade de amostras disponíveis, o que pode ter limitado a acurácia dos modelos.

Apesar da escassez de estudos envolvendo carvão vegetal e da inexistência de pesquisas com NIR portátil, os modelos gerados para ambos os instrumentos foram considerados adequados para aplicação em triagens iniciais relacionadas à qualidade do carvão vegetal. O uso de instrumentos portáteis pode ampliar significativamente a aplicação da técnica em campo, permitindo avaliações em tempo real durante processos produtivos e operações logísticas.

Entretanto, o estudo apresenta limitações relacionadas às condições controladas de laboratório e ao uso de carvão moído e peneirado, diferindo das condições reais das unidades produtoras e do carvão comercializado. Além disso, a robustez dos modelos ainda depende da ampliação da variabilidade amostral, incluindo diferentes espécies, condições de carbonização, granulometrias e ambientes de coleta. Dessa forma, novos estudos são necessários para ampliar

o conhecimento sobre a aplicação da técnica em condições práticas, incluindo validações externas e avaliações em escala industrial, visando aumentar a confiabilidade e aplicabilidade dos modelos preditivos.

4. Conclusões

Os instrumentos NIR de bancada e portátil apresentaram desempenho semelhante na predição do teor de carbono fixo do carvão vegetal produzido a partir de clones comerciais de *Eucalyptus*. Os modelos PLS-R obtiveram coeficientes de determinação de 0,63 para ambos os instrumentos, demonstrando o potencial da espectroscopia NIR como uma técnica rápida e de baixo custo para o controle de qualidade do carvão vegetal. Assim, os equipamentos portáteis se destacam como uma alternativa promissora para aplicações industriais e análises em campo.

5. Agradecimentos

Este trabalho contou com o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001. Os autores agradecem também à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo suporte concedido.

6. Referências bibliográficas

Abreu Neto, R., de Assis, A. A., Ballarin, A. W., & Hein, P. R. G. (2020). Effect of final temperature on charcoal stiffness and its correlation with wood density and hardness. SN Applied Sciences, 2(6), 1020. https://doi.org/10.1007/s42452-020-2822-0

Costa, L. R., Trugilho, P. F., & Hein, P. R. G. (2018). Evaluation and classification of eucalypt charcoal quality by near infrared spectroscopy. Biomass and Bioenergy, 112, 85–92. https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2018.02.017

Indústria Brasileira de Árvores. (2025). Relatório IBÁ 2025. https://iba.org/iba-%7C-relatorio-anual-2025

Lima, M. D. R., Ramalho, F. M. G., Trugilho, P. F., Bufalino, L., Júnior, A. F. D., Protásio, T. de Paula, & Hein, P. R. G. (2022). Classifying waste wood from Amazonian species by near-infrared spectroscopy (NIRS) to improve charcoal production. Renewable Energy, 193, 584–594. https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.05.048

Martins, C. C. N., Castro, V. R., Hein, P. R. G., Carneiro, A. D. C. O., Mascarenhas, A. R. P., Bufalino, L., Medeiros, D. T., Scatolino, M. V., Lima, M. D. R., Cunha, J. S., Andressa, I., Cardoso, R. S. G., & Demuner, I. F. (2025). Prediction of the energy properties of charcoal obtained from *Eucalyptus* and *Corymbia* biomass using portable and benchtop NIR spectrometers. BioEnergy Research, 18, 81. https://doi.org/10.1007/s12155-025-10882-4

Martins, C. C. N., Castro, V. R., Hein, P. R. G., Carneiro, A. D. C. O., Mascarenhas, A. R. P., Bufalino, L., Medeiros, D. T., Scatolino, M. V., Lima, M. D. R., Cardoso, R. S. G., Demuner, I. F., & Carvalho, A. M. M. L. (2026). Comparison of benchtop and handheld near-infrared spectroscopy for predicting wood properties in fast-growing plantations for bioenergy applications. Biomass and Bioenergy, 204, 108468. https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2025.108468

Medeiros, D. T. de, Gomes, J. N. N., Batista, F. G., Mascarenhas, A. R. P., Pimenta, E. M., Chaix, G., & Hein, P. R. G. (2024). Estimation of the basic density of Eucalyptus grandis wood chips at different moisture levels using benchtop and handheld NIR instruments. Industrial Crops and Products, 209, 117921. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2024.117921

Ramalho, F. M. G., Hein, P. R. G., Andrade, J. M., & Napoli, A. (2017). Potential of near-infrared spectroscopy for distinguishing charcoal produced from planted and native wood for energy purpose. Energy & Fuels, 31(2), 1593–1599. https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.6b02446

Ramalho, F. M. G., Simetti, R., Arriel, T. G., et al. (2019). Influence of particles size on NIR spectroscopic estimations of charcoal properties. Floresta e Ambiente, 26, e20180397. https://doi.org/10.1590/2179-8087.039718

Teixeira, V., Carneiro, A., Leite, H., Trugilho, P., Carvalho, A., & Castro, R. (2024). Selection of eucalyptus genotypes for charcoal production based on using multivariate analysis. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 179, 106444. https://doi.org/10.1016/j.jaap.2024.106444

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Estimativa do teor de extrativos de madeiras nativas reflorestadas por espectroscopia no infravermelho próximo

Maria Eduarda de Castro Flores[1]; Caio Cesar Nemer Martins[1]; Iara Fontes Demuner[1]; Edna Lopes Mendes Rosado[1]; Carolina Maria Filardi Cimino Silva[1]; Priscila Moreira da Silva Xavier[1]; Evanderson Luis Capelete Evangelista[1]; Vinícius Resende de Castro[1]

[1] Universidade Federal de Viçosa

Resumo: A determinação do teor de extrativos da madeira por métodos convencionais é lenta, destrutiva e demanda procedimentos laboratoriais que dificultam sua aplicação em programas de caracterização tecnológica e controle de qualidade. Este estudo desenvolveu um modelo baseado em espectroscopia no infravermelho próximo (NIR) e regressão por mínimos quadrados parciais (PLS-R) para estimar o teor de extrativos de cinco espécies nativas comerciais da Mata Atlântica. Foram analisadas 50 amostras compostas, obtidas de dez árvores por espécie. O melhor modelo apresentou coeficiente de determinação de validação cruzada (R^2cv) de 79,02% e razão de desempenho em relação ao desvio (RPD) de 2,18, indicando capacidade preditiva satisfatória. Os resultados demonstram que a espectroscopia NIR é uma alternativa rápida, não destrutiva e promissora para estimar o teor de extrativos em madeiras nativas comerciais.

Palavras-chave: Biomassa florestal; Estatística multivariada; Manejo florestal.

Estimation of extractive content in reforested native woods using near-infrared spectroscopy

Abstract: Determining wood extractive content using conventional methods is time-consuming, destructive, and requires laboratory procedures that limit its application in technological characterization and quality-control programs. This study developed a model based on near-infrared spectroscopy (NIR) and partial least squares regression (PLS-R) to estimate the extractive content of five commercial native Atlantic Forest species. Fifty composite samples obtained from ten trees per species were analyzed. The best model achieved a cross-validation coefficient of determination (R^2cv) of 79.02% and a ratio of performance to deviation (RPD) of 2.18, indicating satisfactory predictive ability. The results demonstrate that NIR spectroscopy is a rapid, non-destructive, and promising alternative for estimating extractive content in commercial native woods.

Keywords: Forest biomass; Multivariate statistics; Forest management.

1. Introdução

As madeiras nativas brasileiras apresentam elevada diversidade de características anatômicas, físicas, mecânicas e químicas, conferindo-lhes potencial para aplicações nos setores madeireiro, moveleiro, da construção civil e de produtos florestais (Martins et al., 2025). Além do valor madeireiro direto, o cultivo comercial dessas espécies em sistemas de produção

florestal tem-se destacado como estratégia para conciliar geração de renda e a provisão de serviços ambientais, como restauração de áreas degradadas e sequestro de carbono, cuja valoração econômica tem sido cada vez mais reconhecida como componente relevante desses sistemas produtivos (Nogueira Junior, 2023). Assim, a caracterização tecnológica dessas espécies é fundamental para subsidiar seu uso racional e agregar valor à cadeia produtiva da madeira.

Entre as propriedades químicas, o teor de extrativos destaca-se por influenciar diretamente a durabilidade natural, a resistência à degradação biológica, a coloração, a permeabilidade, a estabilidade dimensional e o desempenho da madeira em processos como secagem, usinagem, colagem, produção de celulose e carbonização (Sjöström, 1993), sendo seu conhecimento indispensável para a classificação tecnológica de madeiras nativas com potencial comercial, permitindo selecionar espécies adequadas para diferentes aplicações industriais e prever seu comportamento durante o processamento e a utilização (Rowell, 2014). Entretanto, os métodos convencionais de determinação do teor de extrativos baseiam-se em procedimentos de extração química que demandam elevado consumo de solventes, longos tempos de análise, mão de obra especializada e destruição das amostras, tornando sua aplicação limitada em programas de caracterização tecnológica e controle de qualidade em larga escala (Martins et al., 2026).

Nesse contexto, a espectroscopia no infravermelho próximo (NIR) tem se consolidado como uma alternativa rápida, não destrutiva e ambientalmente sustentável para a avaliação das propriedades químicas e físicas da madeira (Medeiros et al., 2024). Associada a métodos quimiométricos, essa técnica permite estimar diferentes atributos tecnológicos a partir da resposta espectral do material, reduzindo significativamente o tempo de análise e os custos operacionais. Estudos demonstraram o potencial da espectroscopia NIR na predição da composição química da madeira, incluindo lignina, celulose, hemiceluloses, umidade, densidade e teor de extrativos (Hein et al., 2010; Tsuchikawa & Kobori 2015; Schimleck et al., 2023).

Apesar dos avanços observados, a aplicação da espectroscopia NIR para a estimativa do teor de extrativos em madeiras nativas comerciais brasileiras ainda é pouco explorada. Considerando a elevada diversidade de espécies e a ampla variabilidade química inerente às madeiras tropicais, torna-se necessário desenvolver modelos preditivos robustos que possibilitem a determinação rápida e confiável dessa propriedade, contribuindo para a

classificação tecnológica, o manejo sustentável dos recursos florestais e a agregação de valor às espécies nativas de interesse comercial.

Dessa forma, com base na hipótese de que a espectroscopia NIR é capaz de estimar com elevada precisão o teor de extrativos em madeiras nativas comerciais, este estudo teve como objetivo estimar o teor de extrativos de madeiras nativas comerciais utilizando espectroscopia NIR.

2. Material e métodos

2.1 Origem do material vegetal

O estudo foi conduzido na Universidade Federal de Viçosa (UFV), utilizando madeira proveniente de povoamentos comerciais localizados nos municípios de Porto Seguro e Trancoso, Bahia. Foram avaliadas cinco espécies nativas da Mata Atlântica (*Joannesia princeps*, *Zeyheria tuberculosa*, *Dalbergia nigra*, *Genipa americana* e *Cariniana legalis*), representadas por dez árvores por espécie, totalizando cinquenta indivíduos com aproximadamente 14 anos de idade. As árvores foram selecionadas por apresentarem condições fitossanitárias adequadas e desenvolvimento compatível com o padrão dos respectivos povoamentos.

2.2 Determinação do teor de extrativos

Discos de madeira foram coletados em quatro posições longitudinais ao longo do fuste comercial (0, 25, 50 e 75% da altura), sendo posteriormente transformados em serragem. Para cada árvore foi preparada uma amostra composta representativa, utilizando a fração granulométrica entre 40 e 60 *mesh*. Antes das análises espectrais, as amostras permaneceram em ambiente climatizado até atingirem teor de umidade de equilíbrio entre 10 e 12%.

O teor de extrativos totais foi determinado de acordo com o método TAPPI T 204 om-88, utilizando como sistema de extração a mistura etanol/tolueno em substituição à mistura etanol/benzeno prevista na norma.

2.3 Preparo das amostras e aquisição dos espectros NIR

Discos de madeira com 10 cm de espessura foram coletados a alturas comerciais ao longo do fuste (0, 25, 50 e 75%) e acondicionados em laboratório até atingirem equilíbrio higroscópico com o ambiente. Posteriormente, os discos foram transformados em serragem, sendo preparadas amostras compostas representativas de cada árvore. Em seguida, o material foi peneirado em malhas de 40 e 60 *mesh*, utilizando-se para as análises a fração retida na peneira de 60 *mesh*.

As amostras de madeira moída foram mantidas em ambiente climatizado até atingirem teor de umidade de equilíbrio entre 10 e 12% (base seca). Após o condicionamento, os espectros no infravermelho próximo (NIR) foram adquiridos por meio do espectrômetro de bancada. As leituras no equipamento de bancada FT-NIR MPA II (Bruker Optik GmbH) foram realizadas na faixa espectral de 12.000 a 4.000 cm^{-1}, com resolução espectral de 16 cm^{-1} e 64 varreduras por espectro.

Para o desenvolvimento dos modelos estatísticos multivariados, empregou-se a ferramenta de otimização de faixas espectrais do software OPUS, que permitiu identificar a região espectral mais informativa para a variável de interesse. Dessa forma, a faixa compreendida entre 4.600 e 4.248 cm^{-1} foi selecionada para a construção dos modelos, por apresentar maior conteúdo informacional e melhor desempenho preditivo.

Foram realizadas 5 leituras por amostra, totalizando 250 espectros, sendo posteriormente calculado o espectro médio de cada amostra para a construção dos modelos estatísticos.

2.4 Análise estatística multivariada

Modelos de regressão por mínimos quadrados parciais (PLS-R) foram ajustados a partir dos espectros NIR utilizando o software OPUS versão 8.1, com o objetivo de predizer o teor de extrativos da madeira. A capacidade preditiva dos modelos foi avaliada por validação cruzada do tipo *leave-one-out*. O número ideal do rank do modelo foi determinado com base na minimização do erro padrão de validação e na maximização do coeficiente de determinação (R^2), visando obter modelos mais robustos e com maior desempenho preditivo.

A seleção do modelo com melhor desempenho foi realizada com base em parâmetros estatísticos de calibração e validação, incluindo o coeficiente de determinação da validação cruzada (R^2cv), o erro quadrático médio da validação cruzada (RMSEcv) e a razão de desempenho em relação ao desvio (RPD). O modelo mais adequado foi aquele que apresentou maior valor de R^2 e RPD, associado ao menor valor de RMSEcv, priorizando maior capacidade preditiva e robustez.

3. Resultados e discussão

3.1 Assinaturas espectrais

A Figura 1 mostra as assinaturas espectrais originais para o conjunto de dados da madeira de espécies nativas comerciais.

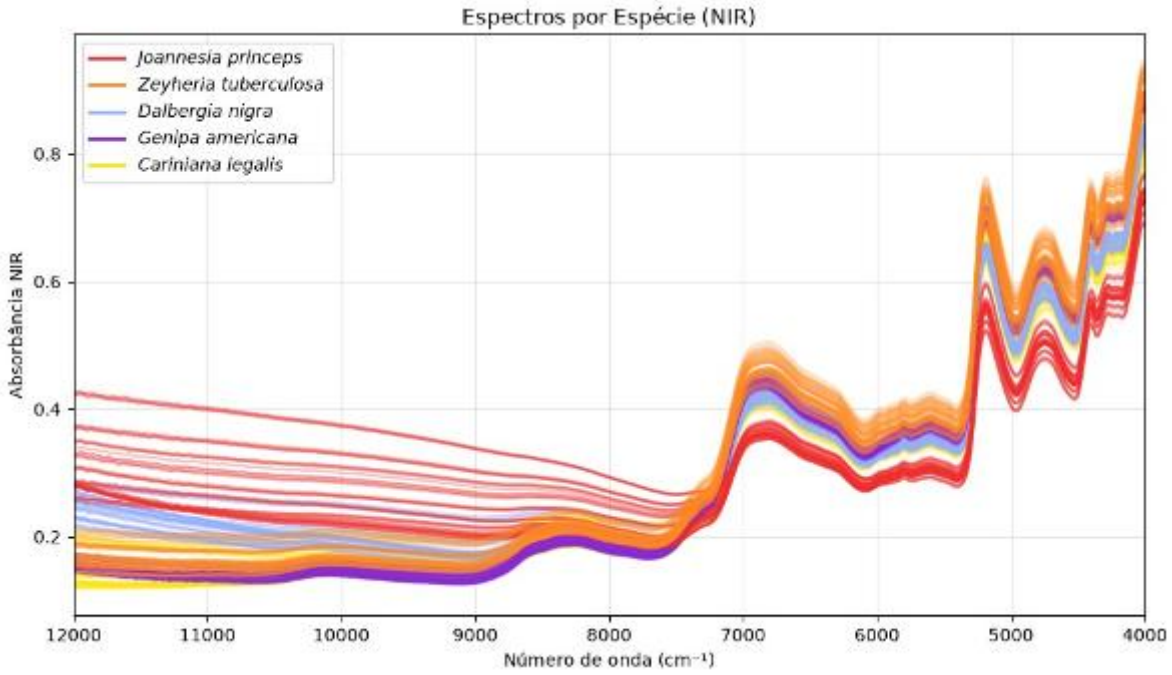


Figura 1 – Assinaturas espectrais da madeira de espécies nativas comerciais obtidas com o instrumento NIR de bancada.

Observou-se que as cinco espécies nativas exibiram comportamento espectral semelhante ao longo da faixa de 12.000 a 4.000 cm^{-1}, refletindo a composição química comum da madeira, constituída predominantemente por celulose, hemiceluloses, lignina e extrativos (Hein et al. 2010). Essa similaridade era esperada, uma vez que os principais componentes estruturais da parede celular vegetal apresentam bandas de absorção características em regiões próximas do infravermelho, resultando em perfis espectrais com o mesmo padrão geral.

Apesar da elevada semelhança entre os espectros, verificou-se diferenças na intensidade de absorbância entre as espécies, principalmente na região compreendida entre aproximadamente 7.200 e 4.000 cm^{-1}. A espécie *Zeyheria tuberculosa* apresentou, de forma consistente, as maiores intensidades de absorbância, enquanto *Joannesia princeps* exibiu os menores valores. As demais espécies (*Dalbergia nigra*, *Genipa americana* e *Cariniana legalis*) apresentaram comportamento intermediário. Essas diferenças sugerem variações na concentração relativa dos constituintes químicos da madeira, especialmente lignina, extrativos e polissacarídeos, além de possíveis diferenças na organização estrutural da parede celular.

Na região entre aproximadamente 7.100 e 6.700 cm^{-1} observou-se um aumento acentuado da absorbância para todas as espécies. Essa faixa está associada principalmente ao primeiro sobretom das vibrações de estiramento das ligações O–H, relacionadas à água adsorvida e aos grupos hidroxila presentes nos polissacarídeos da parede celular (Pasquini, 2003; Schwanninger et al. 2011). Como todas as amostras foram previamente condicionadas ao mesmo teor de umidade, as diferenças observadas nessa região tendem a refletir principalmente características intrínsecas da composição química das espécies, e não variações de umidade.

Entre aproximadamente 6.100 e 5.400 cm^{-1} foram observadas bandas relacionadas às combinações vibracionais das ligações C–H e O–H presentes na celulose, hemiceluloses e lignina (Medeiros et al. 2023; Martins et al. 2026). Nessa região também foram encontradas absorções atribuídas a grupos funcionais presentes em compostos fenólicos e extrativos, os quais variam consideravelmente entre espécies florestais. A maior intensidade observada em algumas espécies pode indicar maior concentração desses compostos.

As bandas mais intensas situadas entre aproximadamente 5.300 e 4.000 cm^{-1} correspondem às combinações vibracionais envolvendo ligações C–H, O–H e C–O dos principais constituintes químicos da madeira (Schwanninger et al. 2011). Essas regiões são amplamente utilizadas em estudos quimiométricos por apresentarem elevada sensibilidade às variações químicas entre amostras, justificando sua frequente seleção para o desenvolvimento de modelos de calibração baseados em regressão por mínimos quadrados parciais (PLS-R).

Outro aspecto importante é a baixa dispersão dos espectros dentro de cada espécie, evidenciada pela elevada sobreposição das curvas individuais. Esse comportamento indica boa homogeneidade espectral entre as árvores pertencentes à mesma espécie, sugerindo baixa variabilidade química e elevada reprodutibilidade das medições. Por outro lado, a separação observada entre as espécies demonstra que, embora os perfis espectrais sejam semelhantes, existem diferenças suficientes para permitir sua discriminação por técnicas de análise estatística multivariada.

3.2 Análise de regressão por mínimos quadrados parciais (PLS-R)

A Figura 2 apresenta o melhor modelo de validação cruzada para as madeiras nativas comerciais. Para o ajuste dos modelos, foram avaliados espectros originais e tratados matematicamente por primeira derivada, segunda derivada, variação normal padrão (SNV) e a combinação de tratamentos, sendo o melhor resultado obtido com os espectros tratados com SNV.

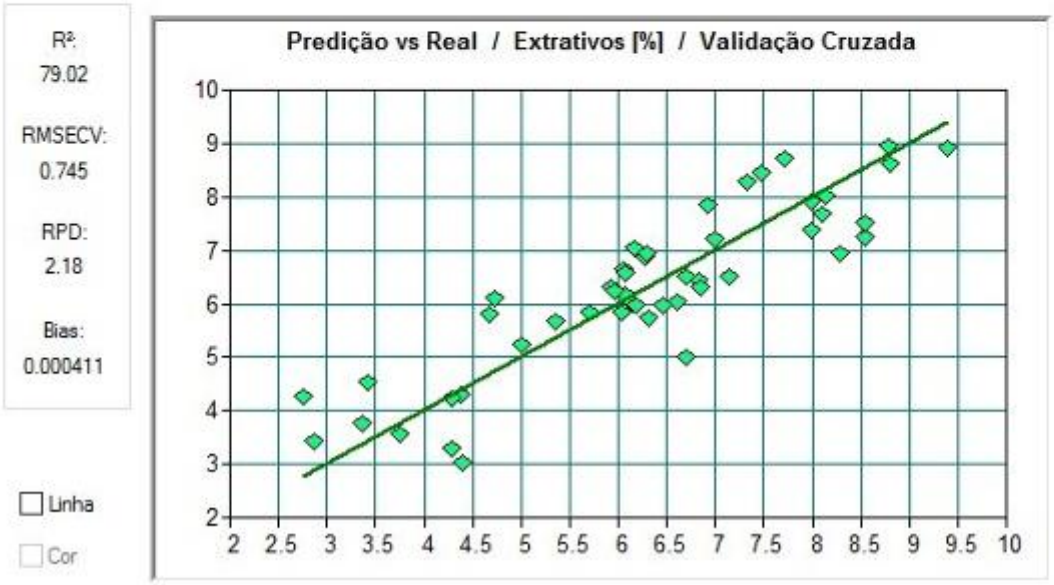


Figura 2 – Validação cruzada de modelos PLS-R para prever o teor de extrativos da madeira de espécies nativas comerciais com instrumentos NIR de bancada.

O coeficiente de determinação da validação cruzada (R^2cv = 79,02%) indicou que aproximadamente 79% da variabilidade do teor de extrativos foi explicada pelo modelo. Esse resultado demonstrou uma forte relação entre os espectros NIR e os valores de referência obtidos pelo método laboratorial, evidenciando que as informações espectrais contêm sinais suficientemente sensíveis às variações na concentração de extrativos. De forma semelhante, Martins et al. (2026) também observaram bom desempenho na estimativa do teor de extrativos em madeira de *Eucalyptus*, obtendo um modelo com coeficiente de determinação na validação cruzada (R^2cv) de 85% e RPD de 2,55.

O erro quadrático médio da validação cruzada (RMSEcv = 0,745) demonstrou que as diferenças entre os valores preditos e os observados foram relativamente pequenas. Considerando que o teor de extrativos das espécies avaliadas variou de aproximadamente 9% a 2%, o erro inferior a 1% pode ser considerado baixo, indicando boa precisão das estimativas fornecidas pelo modelo.

A razão de desempenho em relação ao desvio (RPD = 2,18) indicou um bom desempenho do modelo. Segundo as classificações propostas na literatura, modelos com valores de RPD superiores a 2,0 são considerados excelentes para aplicações quantitativas, apresentando elevada confiabilidade para a predição de propriedades químicas (Martins et al. 2025). Assim, o modelo desenvolvido pode ser classificado como um modelo de classe A,

demonstrando elevado potencial para utilização em programas de caracterização tecnológica e controle de qualidade da madeira.

O gráfico de dispersão entre os valores preditos e observados confirma o bom desempenho estatístico do modelo. Observou-se que a maior parte das amostras se encontrava distribuída próxima à reta de regressão, indicando elevada concordância entre os valores experimentais e aqueles estimados pelo modelo PLS-R. Pequenos desvios são observados principalmente nas extremidades da faixa de concentração, comportamento frequentemente relatado em modelos quimiométricos devido ao menor número de amostras representando esses intervalos e à maior influência de variações espectrais locais.

Além disso, o valor de Bias praticamente nulo (0,000411) evidencia a ausência de erro sistemático nas predições. Isso significa que o modelo não apresentou tendência consistente de superestimar ou subestimar o teor de extrativos, característica desejável em modelos destinados à predição quantitativa.

Por fim, o Rank utilizado no modelo (Rank = 8) indicou que foi necessária uma quantidade moderada de fatores para descrever a relação entre os espectros NIR e o teor de extrativos. Considerando a elevada complexidade química da madeira, cuja fração de extrativos é composta por diferentes grupos de compostos, como fenóis, taninos, resinas, óleos e ceras. Esse número é compatível com a natureza da variável analisada, permitindo capturar as principais informações espectrais sem indícios de sobreajuste.

4. Conclusões

O espectrômetro NIR de bancada apresentou desempenho satisfatório na predição do teor de extrativos de madeiras nativas comerciais. O modelo PLS-R desenvolvido alcançou coeficiente de determinação na predição (R^2cv) de 79,02% e razão de desempenho em relação ao desvio (RPD) de 2,18, evidenciando o potencial da espectroscopia NIR como uma técnica rápida, não destrutiva e de baixo custo para a estimativa dessa propriedade química. Sob o ponto de vista tecnológico, os resultados demonstram que a espectroscopia NIR representa uma alternativa viável aos métodos convencionais de determinação do teor de extrativos, reduzindo significativamente o tempo de análise, o consumo de solventes e os custos laboratoriais. Essa abordagem amplia as possibilidades de aplicação da espectroscopia em programas de caracterização tecnológica, melhoramento genético, controle de qualidade e rastreabilidade da madeira, especialmente em espécies nativas brasileiras cuja variabilidade química tradicionalmente dificulta avaliações rápidas e em larga escala.

5. Agradecimentos

Os autores agradecem aos órgãos financiadores CAPES, CNPq e FAPEMIG. Além disso, gostaríamos de agradecer ao Laboratório de Propriedades da Madeira (UFV), ao Laboratório de Painéis e Energia da Madeira (UFV), ao Laboratório de Celulose e Papel (UFV) pelo fornecimento de equipamentos, pela realização de análises químicas laboratoriais e pelo suporte técnico envolvendo a espectroscopia NIR.

6. Referências bibliográficas

Hein PRG, Lima JT, Chaix G (2010) Effects of sample preparation on NIR spectroscopic estimation of chemical properties of *Eucalyptus urophylla* S.T. Blake wood. Holzforschung 64:45–54. https://doi.org/10.1515/hf.2010.011

Martins, C. C. N., Castro, V. R., Hein, P. R. G., Carneiro, A. D. C. O., Mascarenhas, A. R. P., Bufalino, L., Medeiros, D. T., Scatolino, M. V., Lima, M. D. R., Cunha, J. S., Andressa, I., Cardoso, R. S. G., & Demuner, I. F. (2025). Prediction of the energy properties of charcoal obtained from *Eucalyptus* and *Corymbia* biomass using portable and benchtop NIR spectrometers. *BioEnergy Research, 18*, 81. https://doi.org/10.1007/s12155-025-10882-4

Martins, C. C. N., Castro, V. R., Hein, P. R. G., Carneiro, A. D. C. O., Mascarenhas, A. R. P., Bufalino, L., Medeiros, D. T., Scatolino, M. V., Lima, M. D. R., Cardoso, R. S. G., Demuner, I. F., & Carvalho, A. M. M. L. (2026). Comparison of benchtop and handheld near-infrared spectroscopy for predicting wood properties in fast-growing plantations for bioenergy applications. *Biomass and Bioenergy, 204*, 108468. https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2025.108468

Medeiros, D. T., Ramalho, F. M. G., Batista, F. G., Mascarenhas, A. R. P., Chaix, G., & Hein, P. R. G. (2023). Water desorption monitoring of cellulose pulps by NIR spectroscopy. *Industrial Crops and Products, 192*, 115989. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2022.115989

Medeiros, D. T. de, Gomes, J. N. N., Batista, F. G., Mascarenhas, A. R. P., Pimenta, E. M., Chaix, G., & Hein, P. R. G. (2024). Estimation of the basic density of *Eucalyptus grandis* wood chips at different moisture levels using benchtop and handheld NIR instruments. *Industrial Crops and Products, 209*, 117921. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2024.117921

Nogueira Junior, L. R. (2023). Estoque e sequestro de carbono em florestas e sistemas de produção agrícola – Software InVEST. In E. D. Assad et al. (Eds.), *Serviços ambientais em sistemas agrícolas e florestais do Bioma Mata Atlântica*. Embrapa.

Pasquini, C. (2003). Near infrared spectroscopy: Fundamentals, practical aspects and analytical applications. *Journal of the Brazilian Chemical Society, 14*, 198–219. https://doi.org/10.1590/S0103-50532003000200006

Rowell, R. M. (2014). Acetylation of wood—A review. *International Journal of Lignocellulosic Products, 1*(1), 1–27. https://doi.org/10.22069/ijlp.2014.1920

Schwanninger, M., Rodrigues, J. C., & Fackler, K. (2011). A review of band assignments in near infrared spectra of wood and wood components. *Journal of Near Infrared Spectroscopy, 19*, 287–308. https://doi.org/10.1255/jnirs.955

Schimleck, L., Ma, T., Inagaki, T., & Tsuchikawa, S. (2023). Review of near infrared hyperspectral imaging applications related to wood and wood products. *Applied Spectroscopy Reviews, 58*, 585–609. https://doi.org/10.1080/05704928.2022.2098759

Sjöström, E. (1993). Wood chemistry: Fundamentals and applications (2nd ed.). Academic Press. https://doi.org/10.1016/C2009-0-03289-9

Technical Association of the Pulp and Paper Industry. (1996). TAPPI Test Methods T 204 om-88: Solvent extractives of wood and pulp. TAPPI Press, Atlanta, GA.

Tsuchikawa, S., & Kobori, H. (2015). A review of recent application of near infrared spectroscopy to wood science and technology. *Journal of Wood Science, 61*(3), 213–220. https://doi.org/10.1007/s10086-015-1467-x

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Estoque energético da biomassa em áreas de caatinga sob manejo florestal sustentável

Ava Brenda Batista[1], Rosimeire Cavalcante dos Santos[2], Hyverson Matheus da S. Batista[3], Thainá Isabelle dos S. Silva[4], Wilkally Críslian Laynne de Moura[5]

[1] Departamento de Ciências Florestais. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Macaíba/RN, Brasil.

Resumo: A biomassa florestal da Caatinga representa uma importante fonte de energia renovável no Semiárido brasileiro, especialmente quando manejada sob princípios do Manejo Florestal Sustentável. Este estudo quantificou o estoque energético da biomassa lenhosa e avaliou a variação da produção de biomassa entre áreas com diferentes idades pós-corte em Tangará, Rio Grande do Norte. Foram avaliados dois talhões manejados (8 e 9 anos pós-corte) e uma Reserva Legal, totalizando 30 parcelas amostrais. Foram obtidos dados dendrométricos, fitossociológicos e energéticos, incluindo volume, biomassa seca, densidade básica e poder calorífico superior das espécies presentes nas áreas estudadas. O talhão com nove anos apresentou maiores valores de volume, biomassa e estoque energético, evidenciando maior recuperação da vegetação após o manejo e melhor capacidade produtiva. Jurema Preta, Pereiro e Catingueira destacaram-se pelo maior potencial energético. Os resultados subsidiam o planejamento do Manejo Florestal Sustentável e reforçam o potencial da biomassa da Caatinga como fonte renovável de energia.

Palavras-chave: Energia renovável; Biomassa lenhosa; Regeneração florestal.

Energy stock of biomass in caatinga areas under sustainable forest management

Abstract: Caatinga forest biomass represents an important source of renewable energy in the Brazilian Semiarid region, especially when managed under Sustainable Forest Management principles. This study quantified the energy stock of woody biomass and evaluated biomass production variation among areas with different post-harvest ages in Tangará, Rio Grande do Norte, Brazil. Two managed stands (8 and 9 years after cutting) and a Legal Reserve were evaluated, totaling 30 sampling plots. Dendrometric, phytosociological, and energetic data were obtained, including volume, dry biomass, basic density, and higher heating value of the species present in the studied areas. The nine-year-old stand presented higher values of volume, biomass, and energy stock, indicating greater vegetation recovery after management and improved productive capacity. Jurema Preta, Pereiro, and Catingueira stood out due to their higher energy potential. The results support Sustainable Forest Management planning and reinforce the potential of Caatinga biomass as a renewable energy source.

Keywords: Renewable energy; Woody biomass; Forest regeneration.

1. Introdução

A Caatinga é o único bioma exclusivamente brasileiro, ocupando aproximadamente 10% do território nacional e abrangendo grande parte da região Semiárida. Caracteriza-se por elevada diversidade florística, com espécies adaptadas às condições de deficiência hídrica, altas temperaturas e marcante sazonalidade climática (Brasil, 2022**)**. Além de sua importância ecológica, esse bioma desempenha papel estratégico no fornecimento de produtos florestais madeireiros e não madeireiros, constituindo uma importante fonte de renda para populações locais e contribuindo significativamente para a matriz energética regional por meio da produção de lenha e carvão vegetal (Brasil, 2022; INSA, 2024).

Durante décadas, a exploração dos recursos florestais da Caatinga ocorreu predominantemente de forma extrativista, resultando na redução da cobertura vegetal, perda da biodiversidade e diminuição dos estoques de biomassa. Como alternativa a esse cenário, o Manejo Florestal Sustentável (MFS) tem sido amplamente adotado como estratégia para compatibilizar a utilização econômica da vegetação com a conservação dos recursos naturais, permitindo a exploração planejada da biomassa e favorecendo a regeneração da vegetação ao longo dos ciclos de corte (Pareyn, 2008; Brasil, 2024).

Estudos realizados em áreas manejadas demonstram que a vegetação da Caatinga apresenta elevada capacidade de regeneração após a exploração, principalmente em função da intensa brotação de cepas e do recrutamento de novos indivíduos (Brasil, 2024; Carvalho *et al*., 2020). Entretanto, a definição da idade ideal para realização de novos cortes permanece como um dos principais desafios do manejo florestal sustentável, uma vez que essa decisão influencia diretamente a produtividade da floresta, o estoque de biomassa disponível e o potencial energético da madeira produzida. A determinação desse intervalo deve considerar não apenas o crescimento da vegetação, mas também a qualidade energética da biomassa e a manutenção da capacidade de regeneração do ecossistema (Dias Júnior *et al*., 2018; Santos *et al*., 2020).

Embora existam diversos estudos sobre crescimento da vegetação e propriedades energéticas de espécies da Caatinga, ainda são limitadas as pesquisas que integram parâmetros estruturais da vegetação, estoque volumétrico, biomassa e propriedades energéticas para subsidiar a definição de ciclos de corte mais eficientes em áreas sob Manejo Florestal Sustentável (Carvalho *et al*., 2020; Santos *et al*., 2020). Essa integração é fundamental para o planejamento florestal, permitindo conciliar produção de energia renovável, eficiência produtiva e conservação ambiental.

Nesse contexto, o presente estudo teve como objetivo quantificar o estoque energético da biomassa lenhosa e avaliar a influência da idade pós-corte sobre a produção de biomassa em áreas submetidas ao Manejo Florestal Sustentável no município de Tangará, Rio Grande do Norte, buscando fornecer subsídios para o planejamento de futuros ciclos de corte e para o uso sustentável da biomassa florestal.

2. Material e métodos

2.1 Área de estudo

O estudo foi conduzido em áreas de Caatinga submetidas ao Manejo Florestal Sustentável (MFS), localizadas no município de Tangará, Rio Grande do Norte, durante as atividades da Expedição Caatinga. Foram avaliados dois talhões manejados com diferentes idades pós-corte (8 e 9 anos) e uma área de Reserva Legal (RL), utilizada como referência da vegetação sem exploração recente. O delineamento amostral buscou comparar a estrutura da vegetação, o estoque volumétrico e o potencial energético entre as diferentes condições de manejo.

2.2 Inventário Florestal

O inventário florestal foi realizado por meio da instalação sistemática de 30 parcelas amostrais distribuídas entre os dois talhões manejados e a área de Reserva Legal. Nos talhões manejados foram utilizadas parcelas retangulares de 20 × 40 m (800 m²), estabelecidas de forma a representar a variabilidade estrutural da vegetação.

Foram mensurados todos os indivíduos arbóreos e arbustivos com diâmetro à altura do peito (DAP) igual ou superior a 6 cm. Para cada indivíduo foram registrados o DAP, a altura total, a identificação botânica e as condições fitossanitárias. Quando necessário, procedeu-se à coleta de material botânico para confirmação taxonômica. As parcelas foram georreferenciadas com receptor GPS, permitindo o controle espacial da amostragem.

2.3 Processamento dos dados

a. Os dados do inventário foram organizados em planilhas eletrônicas para o cálculo dos parâmetros dendrométricos e energéticos. O diâmetro à altura do peito (DAP) foi obtido a partir da circunferência à altura do peito (CAP), conforme $DAP = CAP/\pi$. A área basal (AB) foi calculada por $AB = (\pi D^2)/4$, e o volume real da madeira (VR) estimado pela expressão $VR = AB \times H \times ff$, considerando fator de forma (ff = 0,91). A biomassa seca (PS) foi obtida por $PS = VR \times DB$, enquanto a densidade energética (DE) foi determinada por $DE = DB \times PCS$, utilizando a densidade básica da madeira (DB) e o poder calorífico superior (PCS).

b. 2.4 Análise fitossociológica

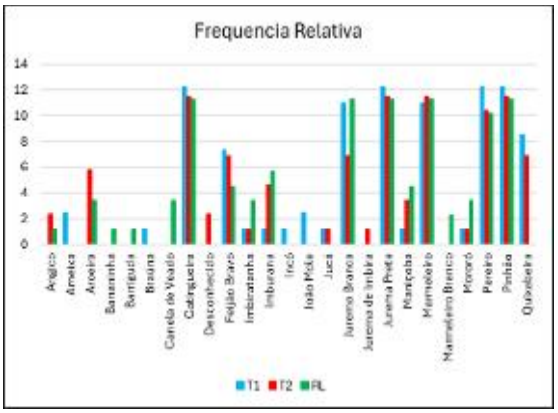
A estrutura horizontal da vegetação foi avaliada por meio dos parâmetros fitossociológicos de densidade relativa (DR), frequência relativa (FR), dominância relativa (DoR) e Índice de Valor de Importância (IVI), conforme Mueller-Dombois e Ellenberg (1974). A DR foi calculada por $DR = N_i/N \times 100$, a FR por $FR = F\,A_i/\sum F\,A \times 100$, e a DoR por $DoR = Do\,A_i/\sum Do A \times 100$. O IVI foi obtido pela soma desses parâmetros ($IVI = DR + FR + DoR$), sendo utilizado para comparar a estrutura e a importância ecológica das espécies entre os talhões manejados e a Reserva Legal.

3. Resultados e discussão

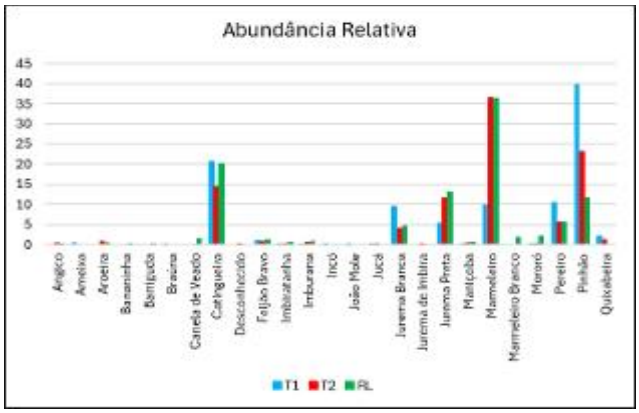
3.1 Estrutura fitossociológica da vegetação

A estrutura fitossociológica apresentou diferenças entre os talhões manejados (T1 e T2) e a Reserva Legal (RL), refletindo alterações na composição e organização da vegetação após o manejo florestal (Figura 1). As espécies: catingueira (*Poincianella pyramidalis*), jurema-branca (*Piptadenia stipulacea*), jurema-preta (*Mimosa tenuiflora*), marmeleiro (*Croton sonderianus*), pinhão (*Jatropha mollissima*) e quixabeira (*Sideroxylon obtusifolium*) apresentaram maior frequência relativa, indicando ampla distribuição nas áreas avaliadas, comportamento também observado por Carvalho et al. (2020) em áreas de Caatinga sob Manejo Florestal Sustentável. O pinhão (*Jatropha mollissima*) destacou-se pela maior densidade no T1, enquanto o marmeleiro (*Croton sonderianus*) apresentou maior abundância no T2 e na RL, evidenciando a capacidade de regeneração dessas espécies após a exploração, conforme destacado por Brasil (2024).

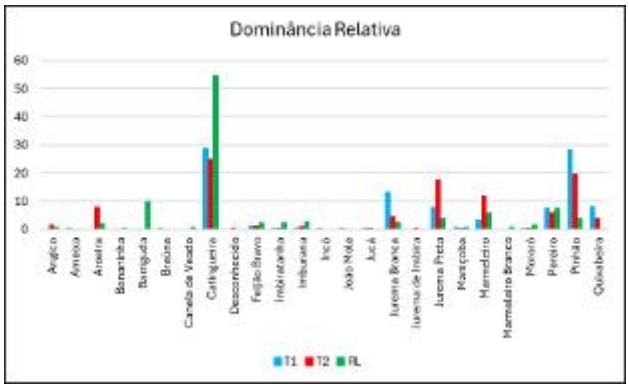
A dominância relativa indicou maior contribuição da catingueira (*Poincianella pyramidalis*) para a área basal, especialmente na Reserva Legal, demonstrando sua importância no estoque volumétrico e de biomassa. Esses resultados reforçam que a estrutura da vegetação é determinada tanto pela abundância quanto pelo desenvolvimento diamétrico das espécies, destacando aquelas com maior relevância ecológica e energética nas áreas manejadas.



(A)



(B)



(C)

Figura 30 – (A) Distribuição da Frequência Relativa das espécies lenhosas amostradas nos talhões avaliados (T1 e T2) e na área de Reserva Legal (RL); **(B)** Valores de Abundância Relativa das espécies nos três sítios de estudo; **(C)** Dominância Relativa da vegetação, com destaque para a superioridade em área basal da espécie Catingueira na Reserva Legal em comparação aos talhões em regeneração.

3.2 Relação entre idade e biomassa seca

Após a projeção temporal, a biomassa seca apresentou tendência de aumento em função da idade pós-corte (Figura 2). Nas áreas avaliadas aos 8–9 anos, os valores concentraram-se entre aproximadamente 2 e 8 Mg ha^{-1}, enquanto a projeção para 40 anos indicou valores entre aproximadamente 4 e 26 Mg ha^{-1}. O ajuste linear apresentou $R^2 = 0,7908$, indicando que aproximadamente 79,08% da variação estimada na biomassa seca foi explicada pela idade. Esse comportamento sugere uma relação positiva entre o avanço da idade pós-corte e o acúmulo de biomassa lenhosa, associado ao crescimento dos indivíduos e à recuperação da vegetação ao longo do processo de regeneração.

Entretanto, a amplitude observada entre parcelas de mesma idade demonstra heterogeneidade no acúmulo de biomassa, especialmente nas áreas com 40 anos. Essa variação pode estar relacionada às diferenças na composição florística, na densidade de indivíduos e no porte das espécies presentes em cada parcela. Assim, os resultados indicam que a idade constitui um importante fator associado à recuperação da biomassa, embora outros componentes da estrutura da vegetação também contribuam para explicar a variação observada.

A maior concentração do estoque de biomassa em determinadas espécies evidencia a contribuição diferenciada das espécies para a estrutura e o acúmulo de biomassa nas áreas de Caatinga submetidas ao manejo florestal sustentável. Esse padrão pode estar relacionado às diferenças na densidade, no porte e nas características estruturais das espécies, fazendo com que algumas apresentem maior contribuição para o estoque total de biomassa. Pareyn (2008) também destaca a concentração da biomassa em um número reduzido de espécies lenhosas na Caatinga. Dessa forma, a composição florística e a estrutura da vegetação devem ser consideradas conjuntamente com a idade pós-corte para compreender a recuperação e a distribuição do estoque de biomassa ao longo do processo de regeneração.

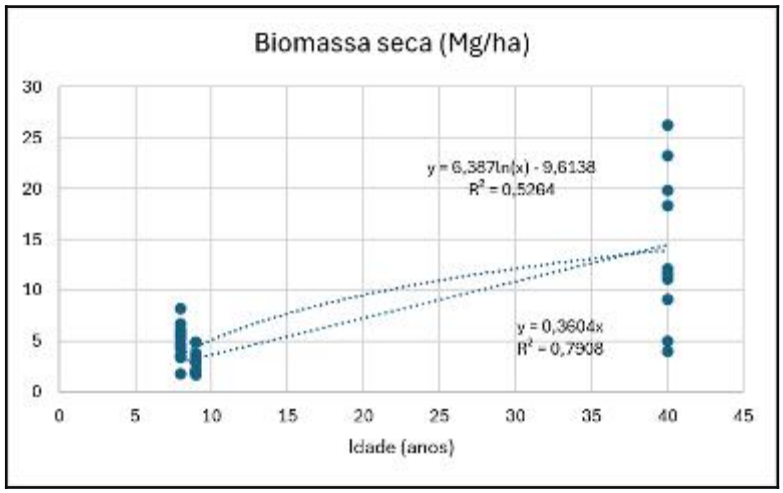


Figura 2 – Projeção temporal da relação entre idade da área e biomassa seca da vegetação lenhosa.

3.3 Estoque florestal por talhão

A comparação entre os talhões manejados e a Reserva Legal demonstrou diferenças no estoque de madeira, biomassa e potencial energético (Tabela 1). O talhão T1, correspondente à área com nove anos pós-corte, apresentou os maiores valores de volume por hectare (23,9 m^3 ha^{-1}), biomassa seca (18,6 t ha^{-1}) e estoque energético (70,2 Gcal ha^{-1}), indicando maior acúmulo de biomassa em relação ao talhão T2, com oito anos pós-corte, que apresentou 18,5 m^3 ha^{-1} de volume, 14,4 t ha^{-1} de biomassa seca e 54,6 Gcal ha^{-1} de estoque energético. A Reserva Legal apresentou os menores valores de volume, biomassa e estoque energético por unidade de área (15,2 m^3 ha^{-1}, 11,8 t ha^{-1} e 44,6 Gcal ha^{-1}, respectivamente), comportamento esperado para uma área sem exploração recente, cuja dinâmica ecológica está associada à manutenção da diversidade estrutural e ao equilíbrio do ecossistema.

Os resultados indicam que o incremento da biomassa ocorre progressivamente durante a regeneração da vegetação após o corte, com maior acúmulo observado no talhão com nove anos pós-corte. Esse comportamento corrobora os resultados encontrados por Carvalho *et al*. (2020), que observaram aumento da produção de biomassa em áreas de Caatinga submetidas ao Manejo Florestal Sustentável. Entretanto, considerando a avaliação de apenas duas idades pós-corte, os resultados representam uma tendência para as áreas estudadas e não permitem definir isoladamente a idade ótima de corte para todo o sistema de manejo.

Tabela 1 - Estimativas de volume, biomassa seca e estoque energético por hectare em áreas de Caatinga sob diferentes condições de manejo

Talhão	Idade	V/ha (m^3)	B/ha (t)	E/ha (Gcal)
T1	9	23,9	18,6	70,2
T2	8	18,5	14,4	54,6
Reserva Legal	-	15,2	11,8	44,6

3.4 Estrutura diamétrica da vegetação

A distribuição diamétrica dos indivíduos apresentou o padrão característico de J-invertido, com predominância de indivíduos nas menores classes de diâmetro (Tabela 2). Esse padrão é frequentemente observado em formações florestais em regeneração natural (Silva; Sampaio; Araújo, 2008). Dos 6.320 indivíduos inventariados, aproximadamente 95% concentraram-se na classe de 6 a 10 cm de DAP, enquanto as classes superiores apresentaram frequência reduzida.

Esse comportamento é típico de formações florestais em processo de regeneração, indicando intenso recrutamento de novos indivíduos e elevada capacidade de recomposição da vegetação após a exploração. A redução gradual do número de indivíduos nas classes diamétricas subsequentes evidencia a dinâmica natural de mortalidade e crescimento da comunidade vegetal. A predominância de indivíduos de pequeno diâmetro também explica a elevada densidade observada em espécies pioneiras, enquanto espécies como catingueira apresentam menor número de indivíduos, porém maior contribuição para a área basal e para o estoque volumétrico devido ao maior porte alcançado.

Tabela 2 - Estrutura diamétrica da vegetação lenhosa, expressa pelo número de indivíduos e percentual por classes de DAP, em área de Caatinga manejada no município de Tangará (RN)

Classe de DAP (cm)	Número de indivíduos	Percentual (%)
6 – 10	5.998	95,1
10 – 15	252	4,0
15 – 20	52	0,8
> 20	18	0,3

Total	6.320	100

Assim, a estrutura diamétrica observada reforça a eficiência do Manejo Florestal Sustentável na manutenção da regeneração natural da Caatinga, assegurando a continuidade do estoque de biomassa e a renovação da comunidade florestal.

3.5 Densidade energética da madeira das principais espécies

A densidade energética das espécies lenhosas foi estimada a partir da densidade básica da madeira (DB) e do poder calorífico superior (PCS), permitindo comparar o potencial energético por unidade de volume entre as principais espécies da Caatinga (Tabela 3). Os resultados demonstraram que a jurema-preta (*Mimosa tenuiflora*) apresentou a maior densidade energética (4,16 Gcal m^{-3}), resultado da combinação entre elevada densidade básica da madeira (0,85 g cm^{-3}) e alto poder calorífico superior (4.897 kcal kg^{-1}). Em seguida, destacaram-se o pereiro (*Aspidosperma pyrifolium*) (3,80 Gcal m^{-3}) e a catingueira (*Poincianella pyramidalis*) (3,78 Gcal m^{-3}), espécies que também apresentaram elevado potencial para produção de energia.

O pinhão (*Jatropha mollissima*) apresentou a menor densidade energética (3,31 Gcal m^{-3}), principalmente em função da menor densidade básica da madeira (0,72 g cm^{-3}), embora seu poder calorífico permaneça dentro da faixa observada para as demais espécies. Esse resultado evidencia que a densidade básica exerce influência significativa sobre a quantidade de energia armazenada por unidade de volume, tornando espécies de madeira mais densa mais eficientes para utilização energética, especialmente quando se considera o transporte, armazenamento e rendimento volumétrico da biomassa.

Tabela 3 - Densidade básica da madeira (DB), poder calorífico superior (PCS) e densidade energética (DE) das principais espécies avaliadas em área de Caatinga sob Manejo Florestal Sustentável

Espécie	DB (g/cm³)	PCS (kcal/kg)	DE (Gcal/m³)
Catingueira	0,78	4.850	3,78

Jurema Preta	0,85	4.897	4,16
Pinhão	0,72	4.600	3,31
Pereiro	0,80	4.750	3,80
Fórmula: *DE = DB × PCS.*			

3. Conclusões

c. O Manejo Florestal Sustentável favoreceu a produção de biomassa lenhosa com potencial energético, mantendo a regeneração natural da vegetação da Caatinga. O talhão com nove anos pós-corte apresentou maiores valores de volume, biomassa e estoque energético em comparação ao de oito anos, indicando maior acúmulo de biomassa ao longo da regeneração. Os resultados fornecem subsídios para o planejamento do manejo florestal sustentável e reforçam o potencial da biomassa da Caatinga como fonte de energia renovável no Semiárido brasileiro.

d.

4. Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001. Os autores agradecem ao Grupo de Estudos de Energia da Biomassa (GEEB/UFRN) pelo suporte técnico-científico e pela colaboração no desenvolvimento desta pesquisa.

5. Referências bibliográficas

Brasil, Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima. (2022). Bioma Caatinga: Características, biodiversidade e uso sustentável. Brasília, DF: Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima. https://www.gov.br/mma.

Brasil, Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima. (2024). Manejo florestal sustentável da Caatinga. Brasília, DF: Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima. https://www.gov.br/mma.

Carvalho, A. C., Santos, R. C., Castro, R. V. O., Santos, C. P. S., Costa, S. E. L., Carvalho, A. J. E., Pareyn, F. G. C., Vidaurre, G. B., Dias Junior, A. F., & Almeida, M. N. F. (2020). Produção de energia da madeira de espécies da Caatinga aliada ao manejo florestal sustentável. Scientia Forestalis, 4*8*(126), e3086. https://doi.org/10.18671/scifor.v48n126.08.

Dias Júnior, A. F., Andrade, C. R., Santos, R. C., & Lima, A. C. M. (2018). Propriedades energéticas da madeira e do carvão vegetal de três espécies florestais nativas da Caatinga. Floresta e Ambiente, 25(4), e00131.

Instituto Nacional do Semiárido. (2024). *A*genda estratégica para desenvolvimento sustentável do Semiárido brasileiro: Energias renováveis. Instituto Nacional do Semiárido.

Mueller-Dombois, D., & Ellenberg, H. (1974). Aims and methods of vegetation ecology. John Wiley & Sons.

Pareyn, F. G. C. (2008). Os recursos florestais da Caatinga. In J. A. Silva, E. V. S. B. Sampaio, & E. L. Araújo (Eds.), Núcleos de desertificação no semiárido brasileiro (pp. 121–146). Universidade Federal de Pernambuco.

Riegelhaupt, E. M., Pareyn, F. G. C., & Meunier, I. M. (2010). Caatinga e mudanças climáticas: Desertificação, mitigação e adaptação. APNE.

Santos, R. C., Fonseca, A. C. G., Ribeiro, L. G., & Lira, M. A. (2020). Qualidade energética da madeira de espécies nativas da Caatinga. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, 24(10), 675–682.

Silva, J. A., Sampaio, E. V. S. B., & Araújo, E. L. (Eds.). (2008). Núcleos de desertificação no semiárido brasileiro: Potencial de recuperação. Universidade Federal de Pernambuco.

Estrutura anatômica qualitativa e variação longitudinal das dimensões das fibras da madeira de clones de *Eucalyptus urophylla* e suas implicações para a qualidade tecnológica

João Vitor Morais da Silva[1]; Mara Lúcia Agostini Valle[1]; Wescley Viana Evangelista[2]; Calline Chaves de Jesus[1]; Wallace Plácido dos Santos[1]; Murilo Pereira da Silva[1]

[1] Universidade Federal do Sul da Bahia 01
[2] Universidade do Estado de Mato Grosso 02

Resumo: A madeira de *Eucalyptus urophylla* destaca-se pela ampla utilização nos setores de celulose, papel e produtos sólidos, sendo a caracterização anatômica fundamental para a avaliação de sua qualidade tecnológica. Este estudo teve como objetivo avaliar a estrutura anatômica qualitativa e a variação longitudinal das dimensões das fibras de dois clones de *Eucalyptus urophylla*. Foram analisadas 16 árvores provenientes de plantios comerciais em Itamarandiba, Minas Gerais, com amostras coletadas nas regiões da base, meio e topo do fuste. As fibras foram individualizadas e mensuradas por microscopia óptica, e os dados foram submetidos à análise de variância (ANOVA) em esquema fatorial 2 × 3, seguida do teste de Tukey ($p < 0,05$). Os resultados evidenciaram diferenças anatômicas qualitativas entre os clones e baixa variação longitudinal das dimensões das fibras. O comprimento das fibras variou de 1,03 a 1,15 mm, com maior valor no meio do Clone 2 (1,15 mm), enquanto a largura variou de 19,6 a 21,4 µm, destacando-se o maior valor no topo do Clone 2 (21,4 µm). O diâmetro do lúmen apresentou valores entre 8,8 e 10,0 µm, e a espessura da parede celular variou de 5,2 a 5,9 µm, com o maior valor observado no topo do Clone 1 (5,9 µm). De modo geral, observou-se tendência de aumento do comprimento e da largura das fibras em direção ao topo, enquanto o diâmetro do lúmen e a espessura da parede apresentaram pequenas variações. Conclui-se que, embora a posição longitudinal influencie a morfologia das fibras, ambos os clones apresentam relativa uniformidade anatômica, indicando potencial para aplicações industriais e fornecendo subsídios para programas de melhoramento genético e para a produção de celulose, papel e produtos sólidos de qualidade.

Palavras-chave: Anatomia da madeira; Morfometria das fibras; Variação longitudinal

Qualitative anatomical structure and longitudinal variation in wood fiber dimensions of *Eucalyptus urophylla* clones and their implications for technological quality

Abstract: A wood of *Eucalyptus urophylla* stands out for its widespread use in the pulp, paper, and solid wood products industries, making anatomical characterization essential for assessing its technological quality. This study aimed to evaluate the qualitative anatomical structure and longitudinal variation in fiber dimensions of two *Eucalyptus urophylla* clones. Sixteen trees from commercial plantations in Itamarandiba, Minas Gerais, Brazil, were analyzed, with samples collected from the basal, middle, and top regions of the stem. The fibers were macerated and measured using optical microscopy, and the data were subjected to analysis of variance (ANOVA) in a 2 × 3 factorial design, followed by Tukey's test ($p < 0.05$). The results revealed qualitative anatomical differences between the clones and low longitudinal variation in

fiber dimensions. Fiber length ranged from 1.03 to 1.15 mm, with the highest value observed in the middle portion of Clone 2 (1.15 mm), while fiber width ranged from 19.6 to 21.4 µm, with the highest value recorded at the top of Clone 2 (21.4 µm). Lumen diameter ranged from 8.8 to 10.0 µm, whereas cell wall thickness varied from 5.2 to 5.9 µm, with the highest value observed at the top of Clone 1 (5.9 µm). Overall, there was a tendency for fiber length and width to increase toward the top of the stem, whereas lumen diameter and cell wall thickness showed only slight variations. It is concluded that, although longitudinal position influences fiber morphology, both clones exhibit relatively uniform anatomical characteristics, indicating potential for industrial applications and providing support for genetic improvement programs and the production of high-quality pulp, paper, and solid wood products.

Keywords: Wood anatomy; Fiber morphometry; Longitudinal variation

1. Introdução

O gênero *Eucalyptus* destaca-se entre as principais espécies florestais cultivadas no Brasil devido ao seu rápido crescimento, elevada produtividade e ampla utilização nos setores de celulose, energia, serraria e painéis de madeira. A elevada produtividade dos plantios florestais brasileiros resulta da integração entre programas de melhoramento genético, manejo silvicultural e seleção de clones superiores (IBÁ, 2025). Nesse contexto, a anatomia da madeira constitui importante ferramenta para a avaliação da qualidade tecnológica da matéria-prima e seleção de genótipos superiores, uma vez que suas características variam em função do material genético e da posição ao longo do fuste (TONINI; OLIVEIRA, 2025).

As fibras representam cerca de 50 a 70% do volume da madeira de *Eucalyptus* e desempenham papel fundamental na sustentação mecânica das árvores, influenciando propriedades de grande importância industrial, como a densidade, resistência mecânica, retratibilidade, rendimento em polpa celulósica e qualidade do papel. As dimensões das fibras (comprimento, largura, diâmetro do lúmen e espessura da parede celular) são amplamente utilizados como parâmetros indicadores da qualidade tecnológica da madeira e em programas de melhoramento genético (BALDIN et al., 2017; FLORSHEIM et al., 2009).

As dimensões das fibras são influenciadas por fatores genéticos, ambientais, idade da árvore e posição de amostragem no tronco. Ao longo do desenvolvimento cambial ocorre a transição da madeira juvenil para a adulta, resultando em variações anatômicas ao longo do fuste e da direção radial, sentido medula-casca. Em geral, as regiões basais apresentam fibras mais longas e paredes celulares mais espessas, enquanto as regiões superiores concentram maior proporção de madeira juvenil, caracterizada por fibras de menores dimensões e com menor diferenciação celular (TOMAZELLO FILHO, 1985; TREVISAN et al., 2024).

Embora a variação radial da anatomia da madeira seja amplamente estudada, a variação longitudinal também possui grande importância tecnológica, pois influencia a uniformidade da madeira e seu desempenho industrial. Dessa forma, a caracterização anatômica de clones comerciais contribui para a seleção de materiais genéticos superiores e para o direcionamento da madeira aos diferentes usos tecnológicos (VIDAURRE et al., 2013; TONINI; OLIVEIRA, 2025).

Nesse contexto, este trabalho teve como objetivo avaliar a anatomia da madeira e a influência da posição longitudinal do fuste sobre as dimensões das fibras da madeira de dois clones de *Eucalyptus*, comparando a anatomia entre as regiões da base, meio e topo das árvores.

2. Material e métodos

O estudo foi conduzido com árvores de dois clones comerciais de *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake, oriundas de plantios comerciais situados no município de Itamarandiba, estado de Minas Gerais. A área experimental encontra-se a 1.001 m de altitude, apresenta precipitação média anual de 1.156 mm, temperatura média anual de 20 °C e está localizada nas coordenadas UTM 8041803 (latitude) e 741306 (longitude). Segundo a classificação climática de Köppen, a região apresenta clima Cwb, caracterizado como temperado de altitude, com inverno seco e verão ameno e chuvoso. (ALVARES et al., 2013).

Foram amostradas oito árvores de cada clone (clones 01 e 02), com aproximadamente cinco anos de idade e implantadas em espaçamento de 3,0 × 2,8 m, totalizando 16 indivíduos selecionados de forma aleatória. Após a coleta, os troncos das árvores foram desdobrados em toras de três metros de comprimento, sendo aproveitadas as três primeiras toras da porção basal de cada árvore, resultando um total de 48 toras.

De cada tora foi retirado um disco de madeira localizado a 30 cm da extremidade basal, destinado à avaliação das propriedades da madeira investigadas neste estudo (Figura 1). As determinações foram realizadas no Laboratório de Propriedades da Madeira, pertencente ao Departamento de Engenharia Florestal da Universidade Federal de Viçosa (UFV), campus de Viçosa, estado de Minas Gerais.

A partir das amostras de madeira foram confeccionados macerados utilizando solução de ácido acético glacial e peróxido de hidrogênio (1:1 v/v), conforme metodologia amplamente empregada para individualização de fibras de madeiras. Em cada amostra foram mensuradas 30 fibras utilizando microscopia óptica acoplada a sistema de análise de imagens (software Axio Vision), conforme figura 1.

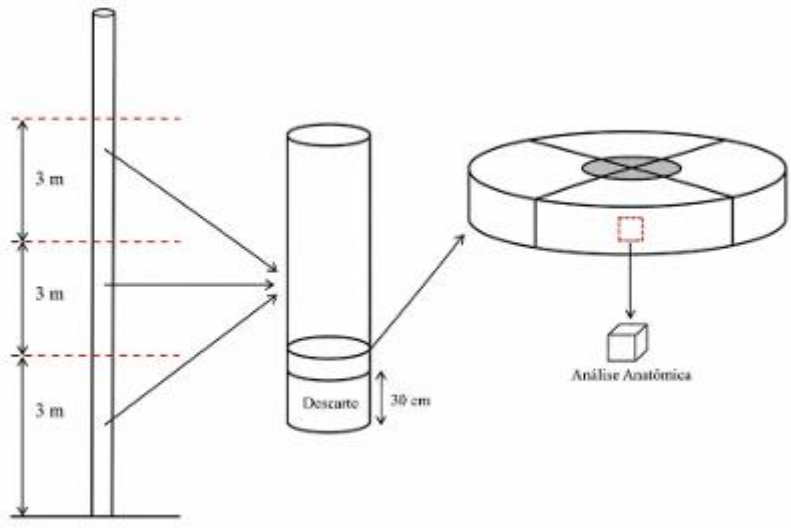


Figura 1 – Esquema de retirada de corpos de prova das toras para análise anatômica.

Foram determinadas as seguintes variáveis anatômicas: comprimento das fibras, largura das fibras, diâmetro do lúmen e espessura da parede celular. As três primeiras variáveis foram mensuradas com o auxílio do software Axio Vision, enquanto a espessura da parede foi estimada como sendo a metade da diferença entre a largura e o diâmetro do lúmen das fibras.

Os dados foram submetidos à análise de variância (ANOVA) em delineamento fatorial 2 × 3, considerando os fatores clone e posição longitudinal do fuste e sua interação, utilizando o software PAST versão 4.02. Previamente à realização da ANOVA, foram verificadas as pressuposições de normalidade dos resíduos e homogeneidade das variâncias, por meio dos testes de Shapiro-Wilk e Bartlett, respectivamente. A independência dos resíduos foi considerada em função da aleatorização das árvores e da independência das unidades experimentais. Quando constatado efeito significativo ($p < 0,05$), as médias foram comparadas pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

3. Resultados e discussão

3.1. Estrutura anatômica qualitativa da madeira

As imagens dos três planos anatômicos de corte para cada clone podem ser observadas na figura 2.

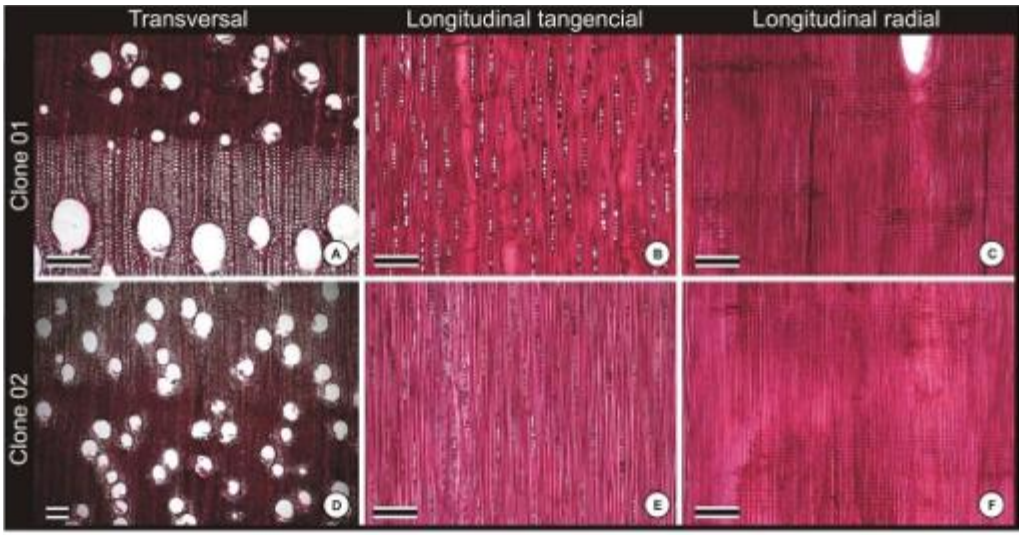


Figura 2 - Imagens dos planos anatômicos das seções transversal (A e D), tangencial (B e E) e radial (C e F) da madeira de dois clones de *Eucalyptus urophylla.* A barra preta corresponde a escala 200 µm.

Ambos os clones (01 e 02) apresentaram anéis de crescimento distintos, vasos de porosidade difusa, formato variando de arredondado a oval, ocorrência predominante de vasos solitários e múltiplos de dois. Os raios apresentaram composição homogênea, sendo formados exclusivamente por células de formato procumbente.

O clone 01 caracterizou-se pela transição abrupta entre lenho tardio e lenho inicial, rara ocorrência de tilos, parênquima axial apotraqueal difuso e paratraqueal dos tipos vasicêntrico e unilateral escasso; os raios eram exclusivamente unisseriados. Já o clone 02 apresentou transição gradual entre os lenhos inicial e tardio, ausência de tilos, parênquima paratraqueal confluente, vasicêntrico e unilateral, além de raios unisseriados e bisseriados, evidenciando diferenças anatômicas marcantes entre os materiais genéticos.

3.2. Dimensões das fibras e variação longitudinal

Os valores médios das dimensões das fibras dos dois clones de eucalipto, nas diferentes posições longitudinais do fuste, são apresentados na Tabela 1. De modo geral, observou-se baixa variação entre os clones e entre as três posições avaliadas, indicando que a madeira apresenta relativa uniformidade anatômica entre os clones e as três posições longitudinais estudadas.

Tabela 1- Dimensões das fibras e vasos dos clones de eucalipto.

Clone	Posição	C (mm)	DP	L (µm)	DP	EP (µm)	DP	DL (µm)	DP
Clone 1	Base	1,04Aa	0,2	20,0Ba	3,7	5,4Aa	1,5	9,2Aa	3,2
	Meio	1,05Aa	0,2	20,3Aab	3,6	5,2Aa	1,1	9,9Ab	3,0
	Topo	1,09Ab	0,2	21,1Ab	4,5	5,9Ab	1,7	9,3Aab	3,5
Clone 2	Base	1,03Aa	0,2	19,6Aa	4,0	5,4Aa	1,3	8,8Aa	3,2
	Meio	1,15Bb	0,2	20,9Bb	4,1	5,5Ba	1,6	9,9Ab	3,6
	Topo	1,12Bb	0,2	21,4Bb	4,0	5,7Aa	1,5	10Bb	3,9

Onde: Desvio Padrão (DP), Comprimento das Fibras (C), Largura da Fibra (L), Diâmetro do Lúmen da Fibra (DL), em diferentes posições ao longo do fuste. Médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ($p < 0,05$), sendo letras maiúsculas utilizadas para comparação entre clones dentro da mesma posição e letras minúsculas para comparação entre posições ao longo do tronco.

O comprimento das fibras variou de 1,03 a 1,15 mm, sendo os maiores valores observados no Clone 2, principalmente na posição do meio (1,15 mm), enquanto os menores ocorreram na base desse mesmo clone (1,03 mm). De maneira geral, verificou-se uma tendência de aumento do comprimento das fibras da base para o topo do fuste, comportamento frequentemente associado ao processo de maturação do lenho e às alterações anatômicas decorrentes do desenvolvimento da árvore (BALDIN et al., 2015; IAWA Committee, 1989).

A largura das fibras apresentou pequena variação entre os tratamentos, com valores entre 19,6 e 21,4 µm. Os maiores valores foram registrados na posição do topo para ambos os clones, destacando-se o Clone 2 (21,4 µm), enquanto o menor ocorreu na base desse mesmo clone (19,6 µm). Essa característica é influenciada por fatores genéticos, idade da árvore e condições ambientais de crescimento, sendo considerada um importante parâmetro na avaliação da qualidade tecnológica da madeira, especialmente para a produção de polpa celulósica (BALDIN et al., 2017).

O diâmetro do lúmen variou de 8,8 a 10,0 µm, sendo o menor valor registrado na base do Clone 2 e o maior no topo desse mesmo clone. Como o lúmen é influenciado pela largura da fibra e pela espessura da parede celular, observa-se que as pequenas variações entre essas características refletiram diretamente nos valores encontrados. Alterações no diâmetro do lúmen podem modificar a flexibilidade das fibras durante o processo de colapso na fabricação de papel, influenciando propriedades como resistência e formação da folha (RAMOS et al., 2011; LIMA et al., 2018).

A espessura da parede das fibras variou de 5,2 a 5,9 µm, apresentando baixa amplitude entre os clones e posições avaliadas. O maior valor foi observado no topo do Clone 1 (5,9 µm), enquanto o menor ocorreu na posição do meio desse mesmo clone (5,2 µm). A espessura da

parede celular exerce influência direta sobre propriedades físicas da madeira, como densidade e rigidez das fibras, além de afetar características da polpa e do papel, podendo contribuir para maior resistência mecânica dos produtos obtidos (TREVISAN et al., 2017; BALDIN et al., 2017).

3.3. Comparação dos resultados com estudos da literatura

Os valores das características anatômicas avaliadas nos Clones 1 e 2 apresentaram variações ao longo das posições longitudinais do fuste, evidenciando diferenças entre base, meio e topo, conforme tabela 2.

Para o Clone 1, o comprimento dos elementos apresentou aumento de 20,0 para 21,1 µm da base para o topo, enquanto o Clone 2 apresentou comportamento semelhante, com valores variando de 19,6 a 21,4 µm. Esses resultados foram superiores aos observados por Florsheim et al. (2009) para *Eucalyptus dunnii*, cujos valores variaram de 17,0 a 17,9 µm, porém inferiores aos registrados por Trevisan et al. (2017) para *Eucalyptus grandis*, que apresentou valores entre 24,9 e 25,5 µm. Dessa forma, os clones avaliados apresentaram características intermediárias às observadas na literatura, indicando comportamento compatível com materiais genéticos do gênero *Eucalyptus*.

Tabela 2 - Características anatômicas da madeira dos Clones 1 e 2 e comparação com valores reportados na literatura para espécies do gênero *Eucalyptus*.**Erro! Vínculo não válido.**Onde: Comprimento das Fibras (C), Largura da Fibra (L), Diâmetro do Lúmen da Fibra (DL), em diferentes posições ao longo do fuste.

Em relação à espessura da parede (EP), os Clones 1 e 2 apresentaram valores entre 8,8 e 10,0 µm, próximos aos registrados por Florsheim et al. (2009) para *E. dunnii* (8,0–8,5 µm), porém inferiores aos valores observados por Trevisan et al. (2017) para *E. grandis* (13,2–15,3 µm). Para o diâmetro do lúmen (DL), os valores dos clones variaram de 5,2 a 5,9 µm, enquanto *E. dunnii* apresentou valores entre 4,0 e 4,3 µm e *E. grandis*, entre 4,0 e 5,7 µm. Esses resultados indicam maior proximidade dos clones avaliados com *E. grandis* para essa característica, especialmente nas posições meio e topo.

De maneira geral, as diferenças mensuráveis observadas entre clones e posições longitudinais foram discretas, indicando relativa uniformidade anatômica da madeira. Entretanto, a tendência de incremento no comprimento e na largura das fibras em direção ao

topo do fuste demonstrou que a posição longitudinal exerce influência sobre a morfologia das fibras, característica relevante para programas de melhoramento genético e para dos fenótipos superiores destinados à produção de celulose, papel e para outros produtos florestais.

Esses resultados corroboram estudos que demonstram a influência da posição no tronco sobre a anatomia da madeira em espécies do gênero *Eucalyptus*.

4. Conclusões

Os resultados indicam que ambos os clones apresentam características anatômicas compatíveis com a utilização industrial da madeira. As variações observadas ao longo do fuste, principalmente no comprimento e na largura das fibras, evidenciam a influência da posição longitudinal sobre a morfologia das fibras, enquanto a espessura da parede e o diâmetro do lúmen apresentam baixa variação. Essas informações contribuem para a caracterização tecnológica da madeira e fornecem subsídios para a seleção de fenótipos com maior potencial para a produção de celulose, papel e de produtos sólidos com qualidade superior.

5. Referências bibliográficas

Alvares, C. A., Stape, J. L., Sentelhas, P. C., Gonçalves, J. L. M., & Sparovek, G. (2013). Köppen's climate classification map for Brazil. Meteorologische Zeitschrift, 22(6), 711–728.

Baldin, T., Schneider, P. R., Eloy, E., Haselein, C. R., Santini, E. J., & Ferreira Júnior, G. (2017). Anatomia da madeira e potencial de produção de celulose e papel de quatro espécies jovens de Eucalyptus. Revista Ciência da Madeira, 8(2), 114–126.

Baldin, T., Souza, J. D., Menezes, W. D., Haselein, C. R., & Ferreira Junior, G. (2015). Variação radial das propriedades físicas e anatômicas da madeira de Eucalyptus benthamii Maiden et Cambage. Enciclopédia Biosfera, 11(21), 14–19.

Florsheim, S. M. B., Couto, H. T. Z. do, Lima, I. L. de, & Longui, E. L. (2009). Variação nas dimensões dos elementos anatômicos da madeira de Eucalyptus dunnii aos sete anos de idade. Revista do Instituto Florestal, 21(1), 79–91.

IBÁ – Indústria Brasileira de Árvores. (2025). Relatório anual 2025. IBÁ.

Lima, P. A. F., Demarchi, J., Silva, M. F. da, Moraes, M. D. A. de, Caldas, D. J., & Silva Júnior, C. R. (2019). Qualidade da madeira de eucalipto para aplicação como mourão tratado. Revista de Ciências Agrárias, 42(2), 509–519.

Ramos, L. M. A., Latorraca, J. V. F., Pastro, M. S., Souza, M. T. de, Garcia, R. A., & Carvalho, A. M. de. (2011). Variação radial dos caracteres anatômicos da madeira de Eucalyptus grandis W. Hill ex Maiden e idade de transição entre lenho juvenil e adulto. Scientia Forestalis, 39(92), 411–418.

Tomazello Filho, M. (1985). Variação radial da densidade básica e da estrutura anatômica da madeira de Eucalyptus saligna e Eucalyptus grandis. IPEF, 29, 37–45.

Tonini, H., & Oliveira, L. da S. (2025). Relações entre o arranjo espacial, a morfometria e a qualidade da madeira de Eucalyptus grandis produzida em sistema silvipastoril. Ciência Florestal, 35, e88094.

Trevisan, R., Candaten, L., Dalla Costa, H. W., Bandera, E., Souza Mangini, T. de, Silva Zanchetta, L. da, & Eloy, E. (2024). Dimensões das fibras de Eucalyptus grandis em diferentes estratos e posição radial. Pesquisa Florestal Brasileira, 44.

Trevisan, R., Rosa, M., Haselein, C. R., Santini, E. J., & Gatto, D. A. (2017). Dimensões das fibras e sua relação com a idade de transição entre lenho juvenil e adulto de Eucalyptus grandis W. Hill ex Maiden. Ciência Florestal, 27, 1385–1393.

Vidaurre, G. B., Lombardi, L. R., Nutto, L., França, F. J. N., Oliveira, J. T. S., & Arantes, M. D. C. (2013). Propriedades da madeira de reação. Floresta e Ambiente, 20(1), 26–37.

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Estudo do comportamento físico de quatro espécies comerciais de madeira

Camila Cristina Simão da Silva[1]; Dalton Longue Júnior[1]; Anna Júlia Leite de Oliveira[1]; Victor Vinicius Sousa Martinelli Sales[1]

[1] Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia (UESB)

Resumo: A madeira é um material renovável e versátil, utilizada como fonte de energia, fibras ou até mesmo na construção civil. A biodiversidade florestal encontrada no Brasil permite o acesso a uma variedade de espécies, com diferentes características tecnológicas que permitem diversas aplicações. Assim, o objetivo foi estudar o comportamento físico de diferentes madeiras comerciais brasileiras. Foram utilizados cinco corpos-de-prova de madeiras das espécies *Pinus* spp., *Eucalyptus* spp., *Corymbia* spp. e *Pterogyne nitens.* As amostras foram submetidas a medições em estado seco e saturado por dois métodos: paquímetro e balança hidrostática. O volume da madeira aumentou à medida que as densidades básica e aparente das espécies aumentaram. A espécie *Pinus* apresentou os menores valores de densidade e, também, o menor incremento volumétrico, enquanto a espécie *Pterogyne nitens* apresentou as maiores densidades e a maior variação volumétrica. Os métodos do paquímetro e da balança hidrostática apresentam resultados similares na avaliação da densidade, podendo serem utilizados desde que garantidas as premissas metodológicas.

Palavras-chave: Densidade Básica; Volume; Madeira.

Study of the physical behavior of four commercial species of wood

Abstract: Wood is a renewable and versatile material used as a source of energy and fibers, and in civil construction. Brazil's forest biodiversity provides access to a variety of species with distinct technological characteristics that allow for diverse applications. Thus, the objective was to study the physical behavior of various common Brazilian wood species. Five specimens from the genera *Pinus*, *Eucalyptus*, and *Corymbia*, as well as the species *Pterogyne nitens*, were used. The samples were analyzed in both dry and saturated states using two methods: a caliper and a hydrostatic balance. Wood volume increased alongside the basic and apparent densities of the species. *Pinus* exhibited the lowest density values and the smallest volumetric increase, whereas *Pterogyne nitens* showed the highest densities and the greatest volumetric variation. The caliper and hydrostatic balance methods yielded similar results for density assessment and can be used interchangeably, provided that the appropriate methodological procedures are followed.

Keywords: Basic Density; Volume; Wood.

1. Introdução

A madeira é um recurso natural renovável bastante utilizada pela sociedade, podendo ser aplicada em diversos setores como construção civil, produção de móveis, papel e celulose, lenha para energia e produção de carvão vegetal. Sua utilização está associada às suas características físicas, químicas, anatômicas e mecânicas que permitem sua aplicação para diversos usos. Essa variedade de aplicações decorre, em parte, do Brasil apresentar uma elevada diversidade de espécies florestais, favorecidas por suas condições climáticas e vasta extensão territorial, o que possibilita o aproveitamento de diferentes madeiras com propriedades específicas para cada segmento (Ceccantini, 2020).

Entretanto, deve-se considerar que se trata de um material de origem biológica, com componentes diversos, como lignina e carboidratos, heterogêneo e higroscópico, naturalmente constituído por água em sua estrutura celular, características que devem ser avaliadas antes de ser definida a finalidade da madeira. Após a colheita, a madeira possui elevada umidade, que tende a reduzir gradativamente devido à perda de água para o ambiente, e por isso precisa ser monitorada (Trugilho et al., 1990).

Essa troca de água da madeira com o ambiente acontece devido a sua natureza higroscópica, capacidade de absorver ou liberar água conforme as condições ambientais, principalmente em função da temperatura e da umidade relativa do ar. Por consequência, uma mesma peça de madeira pode apresentar variações de massa e em suas dimensões ao longo do tempo. Como explicado por Amorim et al. (2021), essas alterações ocasionam modificações importantes em suas propriedades físicas, como volume e densidade, além de provocar fenômenos de contração e inchamento das peças produzidas.

Durante o processo de usinagem da madeira para a produção de móveis, esquadrias ou componentes estruturais, a densidade e a estabilidade dimensional tornam-se fatores essenciais, uma vez que variações excessivas podem ocasionar defeitos como empenamentos, fissuras e deformações permanentes, comprometendo a qualidade e o desempenho do produto final (Lucas Filho, 2004; Almeida, 2015). Um fator importante para este direcionamento é que diferentes espécies florestais apresentam comportamentos distintos relacionados à densidade, resistência mecânica, composição química e resposta às variações de umidade, características que influenciam diretamente sua adequação para usos específicos (Vidaurre et al., 2020).

Desta forma, o entendimento do comportamento físico da madeira em diferentes condições ambientais torna-se fundamental para otimizar processos produtivos e selecionar materiais mais adequados para cada finalidade.

Espécies como *Pinus* spp. e *Eucalyptus* spp. possuem amplos estudos científicos e extensa utilização industrial devido ao rápido crescimento e elevada produtividade. Entretanto, outras espécies vêm despertando interesse por apresentarem características promissoras para aplicações específicas (Trianoski, 2010). O gênero *Corymbia*, tem sido amplamente utilizado para produção de carvão vegetal devido ao seu potencial energético e propriedades físicas altamente produtivas (Protásio et al., 2015; Trugilho et al., 2021; Carneiro et al., 2023; Vital et al., 2024). Além disso, a espécie *Pterogyne nitens*, conhecida como madeira-nova, vem sendo estudada por apresentar potencial tecnológico e características que podem ampliar as possibilidades de utilização como lenha ou carvão vegetal no bioma Caatinga (Pereira et al., 2018).

Diante disso, este trabalho teve como objetivo estudar o comportamento físico (densidade básica e densidade aparente a 0% de umidade) de quatro diferentes madeiras comerciais utilizadas no setor florestal brasileiro.

2. Material e métodos

Amostragem

Foram utilizadas amostras de madeiras de quatro grupos de árvores: *Pinus* spp., *Eucalyptus* spp., *Corymbia* spp. e *Pterogyne nitens*. Cinco corpos-de-prova de cada um dos materiais foram confeccionados na carpintaria da Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia, com formato de paralelepípedos de medidas entre 3-4 cm na largura e altura, e 5 cm de comprimento, cortadas e lixadas para detalhamento. Estas amostras foram submetidas a dois métodos de medição: paquímetro, para medir as três dimensões e determinar as dimensões lineares bem como o volume; e o método da balança hidrostática, por imersão em água das amostras saturadas, para medir o volume dos corpos-de-prova. Para homogeneização da umidade inicial das amostras antes da carbonização, elas foram mantidas em estufa a 60 ± 2 °C até peso constante.



Figura 1 – Ilustração dos quatro grupos de madeira/árvores utilizados no experimento.

Densidade básica e aparente da madeira (0% de umidade)

A densidade básica da madeira foi mensurada de acordo com a relação entre a massa seca e o seu volume saturado, a partir do método da balança hidrostática (imersão em água), conforme a Norma Brasileira NBR-11941 da Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT (2003), conforme a Equação 1.

$$DB = \frac{M_s}{V_{sat}} x\,1000 \qquad \text{Equação 1}$$

Onde: DB = densidade básica da madeira (kg/m³); Ms = massa seca (g); Vsat = volume saturado (cm³); 1000 = fator de conversão de g/cm^3 para kg/m^3.

A densidade aparente da madeira a 0% de umidade foi mensurada de acordo com a relação entre a massa seca e o seu volume seco, conforme a Equação 2.

$$D_{AP} = \frac{M_s}{V_s} x\,1000 \qquad \text{Equação 1}$$

Onde: Dap = densidade aparente a 0% de umidade da madeira (kg/m³); mseca = massa seca (g); Vsec = volume seco (m³); 1000 = fator de conversão de g/cm^3 para kg/m^3.

3. Resultados e discussão

Os resultados da comparação dos valores de densidade básica (DB) obtidos pelos métodos do paquímetro e balança hidrostática mostraram um padrão semelhante para todas as madeiras avaliadas, com elevado coeficiente de determinação que variou de 94,8% para a madeira de *Eucalyptus* e 99,9% para a madeira de *Pterogyne nitens*. Isso demonstra que ambos os métodos são capazes de representar de forma similar a densidade da madeira (Figura 2A).

Essa semelhança entre os valores obtidos por diferentes métodos (paquímetro e balança) indica que ambos podem ser usados na caracterização física da madeira, tanto para o volume total quanto para as dimensões lineares, desde que os cuidados e critérios de medição sejam

mantidos, como marcação nas amostras dos locais exatos para medição com o paquímetro e a comprovação da saturação das amostras antes da imersão na água.

Este comportamento também foi observado por Alves (2022), que ao comparar diferentes metodologias para determinação da densidade básica da madeira de *Pinus caribaea* var. *hondurensis* e *Pinus oocarpa*, verificou que, apesar das diferenças entre os métodos, a tendência de variação entre os materiais permaneceu semelhante.

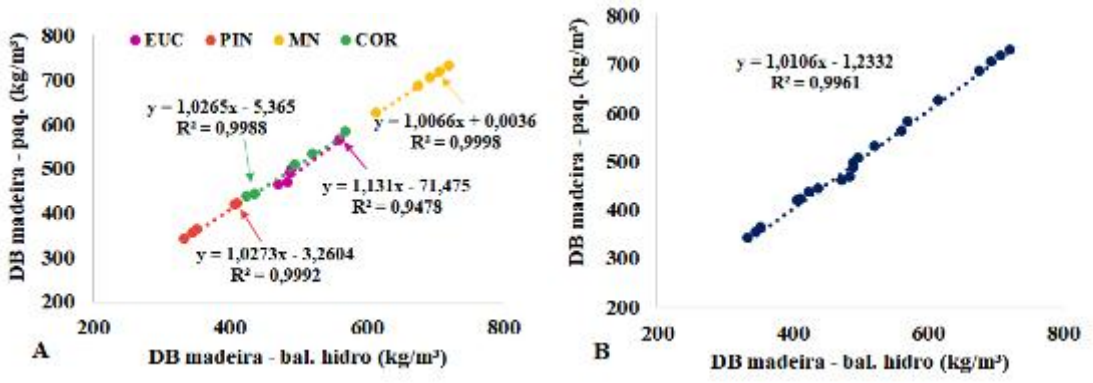


Figura 2 – Relação entre a densidade básica da madeira obtida pelos métodos da balança hidrostática e do paquímetro: (A) por grupo de madeira e (B) para todo o conjunto das madeiras de quatro materiais (MN = Madeira-nova; COR = *Corymbia spp.*; PIN = *Pinus spp*; EUC = *Eucalyptus spp.*)

Na avaliação individual de cada grupo das madeiras (Figura 2A), observou-se diferença no comportamento da densidade, onde a madeira de *Pinus* apresentou os menores valores, as madeiras das espécies de folhosas, *Eucalyptus* e *Corymbia* apresentaram densidades médias, enquanto a madeira da espécie folhosa de *Pterogyne nitens* (madeira-nova) apresentou os maiores valores. Essa diferença está relacionada às características anatômicas da madeira, principalmente à proporção de fibras e vasos, e a espessura das paredes celulares. De acordo com Pereira et al. (2021), as características anatômicas apresentam influência direta nas propriedades tecnológicas da madeira, pois alterações na estrutura celular refletem na densidade e no desempenho físico do material.

A análise conjunta dos grupos de materiais confirma a relação positiva e elevado coeficiente de determinação (R^2 = 99,6%) entre os métodos de determinação da densidade básica (paquímetro x balança hidrostática), demonstrando que o aumento da densidade determinada por um método acompanha a tendência observada pelo outro (Figura 2 B).

Segundo Ramos et al. (2024), a densidade básica apresenta relação direta com propriedades da madeira, influenciando seu comportamento em diferentes processos de utilização industrial.

O comportamento observado para as madeiras avaliadas individualmente quanto a densidade aparente a 0% de umidade apresentou também uma relação positiva entre os métodos utilizados, conforme Figura 3A. Isso significa que a densidade aparente está associada diretamente a densidade básica com elevados coeficientes de determinação, que variaram entre 76,5% para *Eucalyptus* e 99,9% para *Pinus*. Estudos realizados com *Eucalyptus cloeziana* demonstraram que a densidade da madeira está relacionada às características físicas e anatômicas do lenho, sendo influenciada pela organização dos tecidos e composição estrutural da madeira (Alves et al., 2017).

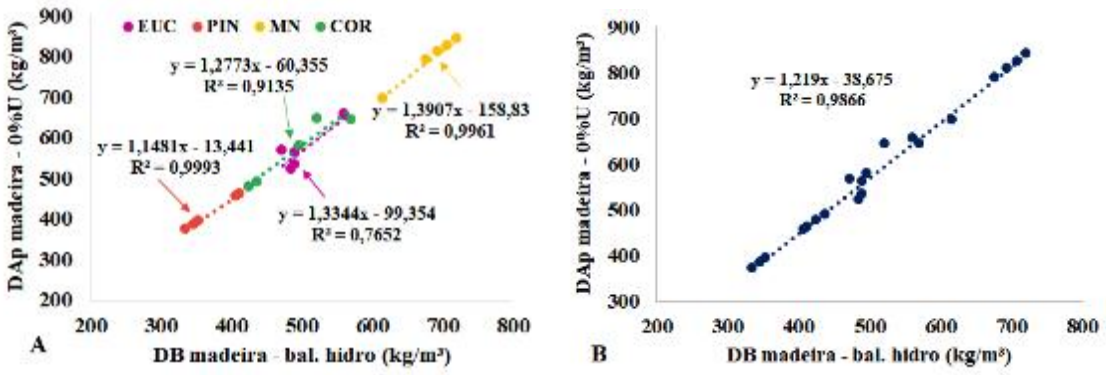


Figura 3 – Relação entre a densidade básica da madeira obtida pelo método da balança hidrostática e a densidade aparente da madeira a 0% de umidade obtida pelo método do paquímetro: (A) para cada tipo de madeira e (B) considerando os quatro grupos de madeiras.

Pelos resultados apresentados, a madeira de *Pinus* apresentou os menores valores de densidade aparente a 0% de umidade, enquanto a madeira de *Pterogyne nitens* (madeira-nova) apresentou os maiores valores, enquanto as madeiras de *Eucalyptus* e *Corymbia*, apresentaram resultados intermediários, com variações relacionadas principalmente às características anatômicas e genéticas, como diferenças dos tecidos anatômicos entre espécies/clones e condições de crescimento. Segundo Lopes et al. (2023), clones de *Corymbia* tendem a apresentar maiores valores de densidade básica em comparação a materiais de *Eucalyptus* devido às diferenças estruturais do lenho, enquanto o gênero *Eucalyptus* apresenta maior variabilidade em suas propriedades tecnológicas.

Na avaliação considerando todos os resultados das quatro madeiras estudadas (Figura 3B), a relação entre densidade básica e densidade aparente a 0% de umidade evidenciou uma

tendência direta e positiva, com elevado coeficiente de determinação (R^2 = 98,7%), reforçando que a determinação da densidade aparente a 0% de umidade pode ser feita também pelo método do paquímetro ou pela estimativa da densidade básica, importante ferramenta para explorar as propriedades das diferentes madeiras, espécies e materiais genéticos.

As propriedades físicas das madeiras avaliadas, relacionando os valores de densidade básica (DB) e densidade aparente a 0% de umidade (D_{AP}), apresentou uma correlação direta e positiva, sendo os valores de densidade aparente a 0% de umidade ligeiramente superiores aos valores de densidade básica (Figura 4A).

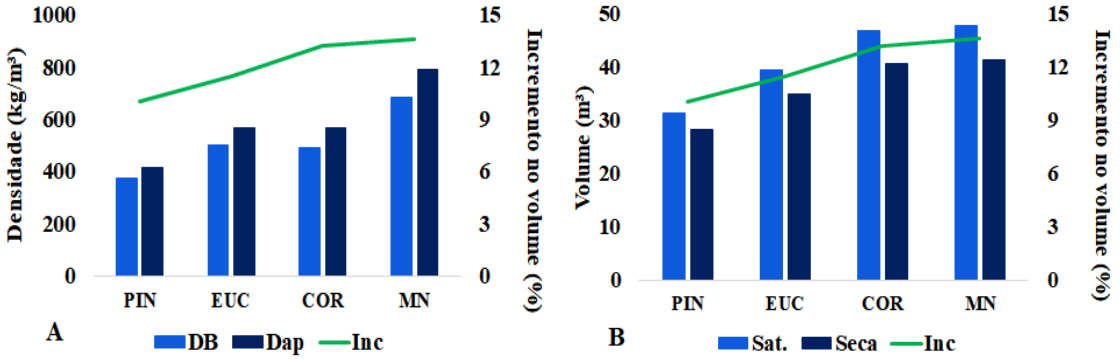


Figura 4 – Propriedades física das madeiras avaliadas: (A) comparação entre a densidade básica e a densidade aparente a 0% de umidade pelo método da balança hidrostática e o seu incremento volumétrico; (B) comparação entre o volume saturado, volume seco e o incremento volumétrico.

Os volumes secos foram inferiores aos volumes saturados para todas as madeiras, sendo que a diferença foi maior quando a densidade básica da madeira aumentou, confirmado que madeiras mais densas possuem maior variação dimensional (Figura 4B). Ou seja, o incremento volumétrico das madeiras aumentou à medida que os valores de densidade básica e densidade aparente das madeiras aumentaram, como representado na Figura 4A. A madeira de *Pinus* apresentou os menores valores de densidade e, também, o menor incremento volumétrico, enquanto a madeira de *Pterogyne* apresentou as maiores densidades e a maior variação volumétrica. Os gêneros *Eucalyptus* e *Corymbia* apresentaram comportamento intermediário para densidades e para o incremento do volume, conforme Figura 4B.

Esses resultados observados podem ser explicados pela maior quantidade de parede celular presente em madeiras mais densas, o que proporciona maior capacidade de adsorção de água nas paredes celulares e, consequentemente, maior inchamento. Segundo Trugilho et al. (2002b), citado por Lopes (2008), espécies florestais com maior quantidade de “substância

madeira" por unidade de volume tendem a apresentar maiores variações dimensionais para um mesmo teor de umidade. Dessa forma, a tendência observada nos gráficos indica que o aumento da densidade da madeira está associado ao aumento do incremento volumétrico das espécies estudadas.

4. Conclusões

A densidade básica e aparente da madeira podem ser determinadas utilizando os métodos do paquímetro e da balança hidrostática com elevado grau de confiança.

O estudo do volume/incremento volumétrico explicou parte importante da variação da densidade aparente das madeiras, refletindo informações importantes da qualidade da madeira e do ritmo de crescimento das árvores (produtividade).

5. Agradecimentos

A Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia pela infraestrutura para realização da pesquisa. Ao CNPq pelo fomento da bolsa de pesquisa. Ao Grupo de Pesquisa em Tecnologia de Produtos Florestais (Woodtech) pelo suporte científico.

6. Referências bibliográficas

Almeida, T. H. (2015). *Estudo da estabilidade dimensional de madeiras tropicais brasileiras* (Dissertação de mestrado, Universidade de São Paulo). Teses USP.

Alves, R. C., Oliveira, A. L. C., & Carrasco, E. V. M. (2017). Propriedades físicas da madeira de *Eucalyptus cloeziana* F. Muell. *Floresta e Ambiente, 24*, e00015312. https://doi.org/10.1590/2179-8087.015312

Amorim, E. P., Paes, J. B., & Nicácio, M. A. (2021). Anisotropia da contração e inchamento da madeira: Uma abordagem tecnológica. In Editora Científica Digital (Org.), *Madeiras nativas e plantadas do Brasil: Qualidade, pesquisas e atualidades – Volume 2* (pp. 81–100). Editora Científica Digital. https://doi.org/10.37885/211006537

Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2003). *NBR 11941: Madeira – Determinação da densidade básica*. ABNT.

Ceccantini, G. C. T. (2020). O uso da madeira de árvores urbanas: Biodiversidade, questões anatômicas, tecnológicas e práticas. In *NUTAU 2020 – 13º Seminário Internacional NUTAU: Planejamento e arquitetura: Caminhos para o desenvolvimento sustentável* (p. 3). Blucher. https://doi.org/10.5151/nutau2020-03

Couto, A. M., Trugilho, P. F., Napoli, A., Lima, J. T., Silva, J. R. M., & Protásio, T. de P. (2015). Qualidade do carvão vegetal de *Eucalyptus* e *Corymbia* produzido em diferentes temperaturas finais de carbonização. *Scientia Forestalis*, *43*(108), 817–831.

Oliveira, L. P., Carneiro, A. de C. O., Peres, L. C., Demuner, I. F., Ferreira, S. O., Fernandes, S. A., & Jorge, F. de J. (2023). Qualidade da madeira e do carvão vegetal na seleção de clones de *Eucalyptus spp.* e *Corymbia torelliana* × *Corymbia citriodora* para siderurgia. *Revista Árvore*, *47*. https://doi.org/10.1590/1806-908820230000022

Alves, E. M. (2022). Estudo das propriedades físicas da madeira de *Pinus oocarpa* e *Pinus caribea* var. *Hondurensis* cultivados no sudoeste da Bahia. (Monografia). Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia.

Figueiredo, M. E. O., Longue Júnior, D., Pereira, A. K. S., Carneiro, A. de C. O., & Silva, C. M. S. da. (2018). Potencial da madeira de *Pterogyne nitens* Tul. (madeira-nova) para produção de carvão vegetal. *Ciência Florestal*, *28*(1), 420–431. https://doi.org/10.5902/1980509831620

Guirardi, B. D., & Vital, B. R. (2024). *Avaliação da combustibilidade e combustão espontânea do carvão vegetal de Corymbia e Eucalyptus = Evaluation of combustibility and spontaneous combustion of Corymbia and Eucalyptus charcoal* (Tese de doutorado, Universidade Federal de Viçosa). Locus UFV.

Lopes, C. S. D. (2008). *Caracterização da madeira de três espécies florestais para uso em movelaria*. (Dissertação de mestrado, Universidade de São Paulo). Biblioteca Digital de Teses e Dissertações da USP.

Lopes, E. D., Gonçalves, J. F., Marques, A., Martins, N. S., Pena, C., & Laia, M. L. (2023). Physical and chemical properties of wood from *Eucalyptus* and *Corymbia* clones in different planting densities. *Ciência Florestal*, *33*(2), e64965. https://doi.org/10.5902/1980509864965

Loureiro, B. A., Assis, M. R., Melo, I. C. N. A., Oliveira, A. F. C. F., & Trugilho, P. F. (2021). Rendimento gravimétrico da carbonização e caracterização qualitativa do carvão vegetal em clones de híbridos de *Corymbia spp.* para uso industrial. *Ciência Florestal*, *31*(1), 214–232. https://doi.org/10.5902/1980509836120

Lucas Filho, F. C. (2004). *Análise da usinagem da madeira visando à melhoria de processos em indústrias de móveis* (Tese de doutorado, Universidade Federal de Santa Catarina). Repositório Institucional da UFSC.

Pereira, A. K. S., Longue Júnior, D., Carvalho, A. M. M. L., & Mafra Neto, C. S. (2021). Anatomical characterization and technological properties of *Pterogyne nitens* wood, a very interesting species of the Brazilian Caatinga biome. *Scientific Reports*, *11*(1), 15344. https://doi.org/10.1038/s41598-021-94779-0

Ramos, R. D., Longue Júnior, D., Pereira, G. S., Silva, J. V. M. da, Valle, M. L. A., & Dias Júnior, A. F. (2024). Influência da densidade básica e da composição química da madeira

para o processo de carbonização. *Ciência Florestal*, *34*(4), e87722. https://doi.org/10.5902/198050987722

Trianoski, R. (2010). *Avaliação do potencial de espécies florestais alternativas de rápido crescimento para produção de painéis de madeira aglomerada* (Dissertação de mestrado). Universidade Federal do Paraná.

Vidaurre, G. B., Silva, J. G. M., Moulin, J. C., & Carneiro, A. C. O. (2020). Densidade e sua variação na madeira de eucalipto. In G. B. Vidaurre, J. G. M. Silva, J. C. Silva, & A. C. O. Carneiro (Orgs.), *Qualidade da madeira de eucalipto proveniente de plantações no Brasil* (pp. 133–159). EDUFES.

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Evidências de ocorrência de *slip planes* em fibras de mudas de *Eucalyptus camaldulensis* sob estresse hídrico

Fernando Alberto Jimenez Duarte[1]; José Tarcísio Lima[1]; José Reinaldo Moreira da Silva[1]

[1] Departamento de Ciências Florestais – Universidade Federal de Lavras, 37202-000 Lavras MG

Resumo: Áreas da parede celular, consideradas como descontinuidades na organização das microfibrilas de celulose e denominadas *slip planes*, têm sido pouco investigadas em contexto distinto ao estresse mecânico. Considerando indícios de que o estresse hídrico poderia favorecer sua formação, objetivou-se avaliar a ocorrência de *slip planes* no lenho de mudas de *Eucalyptus camaldulensis* sob estresse hídrico. Um ensaio com dez mudas foi conduzido em casa de vegetação durante três meses. Após acondicionamento, mudas sob controle e sob restrição de irrigação foram submetidas, respectivamente, à irrigação diária (≈80% CC) e a cada 4–5 dias, utilizando o murchamento foliar como indicador da reposição hídrica. Amostras do lenho da base do caule foram maceradas e analisadas por microscopia de luz polarizada. A ocorrência de *slip planes* nas fibras foi avaliada por médio de estatística descritiva e por máxima verossimilhança. A restrição da irrigação aumentou a probabilidade (de 13% para 43%) e chances (OR = 5,05) de ocorrência de fibras com *slip planes*. A média de *slip planes* por fibra nas mudas do grupo controle e com restrição hídrica foi de 0,24 e 1,23, respetivamente. Os resultados proporcionam evidências de que o estresse hídrico favoreceu a ocorrência de *slip planes*, aumentando a proporção de fibras afetadas e sugerindo maior número por fibra.

Palavras-chave: deslocações; microfibrilas de celulose; parede celular

Evidence for the occurrence of slip planes in fibers of *Eucalyptus camaldulensis* wood seedlings under water stress

Abstract: Cell wall regions considered discontinuities in the organization of cellulose microfibrils and termed slip planes have been scarcely investigated under conditions other than mechanical stress. Considering indications that water stress may favor their formation, this study aimed to evaluate the occurrence of slip planes in the wood of Eucalyptus camaldulensis seedlings subjected to water stress. A greenhouse experiment with ten seedlings was conducted over three months. After acclimation, seedlings under control conditions and irrigation restriction were subjected, respectively, to daily irrigation (≈80% field capacity) and irrigation every 4–5 days, using leaf wilting as an indicator for water replenishment. Wood samples from the stem base were macerated and analyzed by polarized light microscopy. The occurrence of slip planes in fibers was evaluated using descriptive statistics and maximum likelihood estimation. Irrigation restriction increased the probability (from 13% to 43%) and the odds (OR = 5.05) of fibers exhibiting slip planes. The mean number of slip planes per fiber in control and water-restricted seedlings was 0.24 and 1.23, respectively. The results provide evidence that water stress favored the occurrence of slip planes, increasing the proportion of affected fibers and suggesting a greater number of slip planes per fiber.

Keywords: dislocations; Cellulose microfibrils; cell wall

1. Introdução

No âmbito estrutural, a disposição angular da celulose, na forma de microfibrilas, ganhou grande interesse uma vez que mostrou-se altamente significativa para explicar variações de atributos mecânicos da madeira. Porém, regiões da parede com microfibrilas presumivelmente divergente em ângulo em relação à orientação média da parede celular, conhecidas como *slip planes,* têm recebido menos atenção.

Os *slip planes* em fibras de madeiras têm sido reportados (Robinson, 1920) desde há mais de cem anos. Essas estruturas do nível supramolecular, também referenciadas como deslocamentos (Nyholm *et al*., 2001), foram observadas e caraterizadas em detalhe por Robinson (1920); como também, observadas em fibras de interesse têxtil como linho e urtiga (Davies, 1998; Bergfjord *et al*., 2010). Além disso, investigadas em fibras de cânhamo (Thygesen, 2008), por meio de grande variedade de técnicas. Entre algumas destas, destacam-se a microscopia de luz polarizada (Dinwoodie, 1966; Ander *et al*., 2008; Moulin & Lima, 2019) e de fluorescência (Kawakubo *et al*., 2010) e recentemente, a microscopia de força atômica (Melelli, *et al*., 2021) e, difração de raios X baseada em radiação de sincrotron em fibras de linho (Richely *et al*., 2022).

A pesquisa dos *slip planes* tem sido focada com maior intensidade no âmbito da ciência da celulose e papel. O motivo, tem sido conhecer sua implicação nas propriedades desse material e nas fibras, como identificar a parte do processo de polpação onde são formados (Thygesen *et al*., 2011). Nessa linha foi observado (Ander & Marklund, 2003) que em fibras de amostras de polpa na linha de sopro após o cozimento, peneiração e no filtro de lavagem (prévio e posteriormente ao branqueamento) apresenta-se na sequência, aumento relativo de *slip plane* e diminuição da resistência a tração.

Entretanto, no estudo da madeira, foi relatado que os *slip planes* estão vinculados a diferentes comportamentos mecânicos. Análises de pequenos espécimes após testes de impacto indicaram que a clássica ruptura abrupta do material está vinculada à elevada ocorrência de *slip plane* (Koehler, 1933). Investigação (Dinwoodie, 1978) com amostras de *Picea abies* submetidas a diferentes intensidades de carga sobre a resistência máxima (25, 35, 50, 65 e 80%) revelou a ocorrência de *slip planes* a 25% da resistência total da madeira, por meio da análise de fibras individuais e por lâminas histológicas temporárias.

Embora pesquisas sejam significativas no intuito de entender os *slip planes* e suas implicações de forma mais precisa, questões básicas como o motivo da sua ocorrência na planta viva ou características nanomecânicas, continuam sendo desconhecidas ou pouco exploradas. Sob essa perspectiva, a relação entre *slip planes* e atributos mecânicos do material pirolisado é

outra linha que permanece pouco explorada. Portanto, acredita-se que sua alta ocorrência possa estar vinculada à redução da resistência mecânica de caules carbonizados, tornando o carvão mais quebradiço.

Sabe-se que *slip planes* podem ser induzidos pela ação mecânica, podendo ser por causas naturais ou intervenção humana. Entre a primeira encontra-se o vento, tensões de crescimento e caraterísticas da árvore; nas induzidas, o corte da arvores e o processamento da madeira (Moulin & Lima, 2019). Nas árvores em pé o vento pode induzir a formação de *slip planes* na parte interna da curvatura do caule, com maior intensidade no xilema secundário próxima à casca (Thygesen & Asgharipour 2008), região conhecida pelo fato de sofrer as maiores magnitudes de tensões compressivas desde a perspectiva da análises do desenho estrutural.

Acredita-se ainda que algum tipo de estresse causado pela seca também induza a formação dos *slip planes* (Thygesen & Asgharipour, 2008), até onde sabemos, um tema ainda não explorado. Em vista de que tais causas possam ter implicação na formação de *slip planes* na parede de fibras (Thygesen *et al*., 2011). Nesse contexto e de projeções que apontam para aumento da frequência e da intensidade das secas em decorrência das mudanças climáticas, torna-se relevante compreender a influência da disponibilidade hídrica sobre a integridade das fibras da madeira. Assim, objetivou-se avaliar a ocorrência de *slip planes* no lenho de mudas de *Eucalyptus camaldulensis* sob estresse hídrico

2. Material e métodos

Dez mudas de *Eucalyptus camaldulensis* com altura média de 25 centímetros (cm), foram transplantadas para vasos plásticos de cinco litros (Figura 1A) contendo substrato florestal com vermiculita a 20%. Após transplante, as mudas permaneceram em período de aclimatação por 30 dias em estufa (Figura 1B), preliminarmente e durante aplicação de tratamento hídrico.

Dois níveis do tratamento hídrico foram consideradas: 1) nível controle e 2) restrição na frequência de irrigação no substrato. Cinco mudas estruturaram os grupos citados como controle e tratamento; onde as mudas do grupo controle foram irrigadas diariamente (≈80% CC) e mudas do tratamento irrigadas apenas, para manutenção da sobrevivência visando levá-las à condição de estresse hídrico. Em média, as mudas do controle foram irrigadas a cada cinco dias durante a primeira metade do ensaio, depois, a cada quatro ou cinco dias, atendendo ao

murchamento foliar (Figura 1C) prolongado como indicador visual da necessidade de irrigação e condição de estresse hídrico.

Ambos os níveis do experimento foram conduzidos ao longo de um período de três meses, sem atender aplicação de nutrientes. A partir do primeiro mês de tratamento hídrico, foram instaladas hastes de plástico nas mudas; visando minimizar a ocorrência de estresse mecânico por flexão nos caules e, consequentemente, a possível indução de *slip planes*, sobretudo nas mudas do grupo tratamento (sob estresse hídrico).

Figura 1 – Vários estádios de desenvolvimento das



mudas de *Eucalyptus camaldulensis* e aspectos gerais da condução experimental. **A**: Mudas dentro da estufa após transplantio em vasos. **B**: Mudas durante a noite dentro da estufa, após 40 dias do transplantio e com dez dias da instalação de suporte de plástico. **C**: Duas mudas do grupo controle (na direita e na esquerda da imagem) e duas do grupo tratamento (no centro da imagem) durante o meio-dia, após 95 dias do transplantio.

Após conclusão do ensaio, de cada uma das mudas uma amostra da base do caule de aproximadamente 1,5 cm de comprimento foi extraída para maceração e avaliação da ocorrência de *slip planes.* As amostras dos caules foram cortadas com serra, em seguida, as extremidades regularizadas com lâminas de barbear em ângulos menores que 20° para minimizar presença de fibras amassadas (decorrentes dos cortes com a serra) ou resíduos destas, que pudessem interferir na identificação de *slip planes*.

Após regularização de extremidades das amostras, a casca foi retirada de forma manual visando não danificar o xilema secundário. Em seguida, as amostras dos caules foram colocadas em frascos de vidro de 10 ml, contendo 5 ml de solução ácido acético glacial e peroxido de hidrogênio em proporções de 1:1 $^{v}/_{v}$ (solução de Franklin, 1945). Os frascos foram vedados com tampas de borracha butílica e, colocados em estufa a 60°C durante 15 horas. Após do processo, foram retirados do forno para seu esfriamento à temperatura ambiente e, na sequência, abertos gradualmente objetivando-se a liberação da pressão gerada pela reação entre a solução e a

amostra. O macerado produzido, foi lavado em oito repetições com adição e remoção de água destilada para caraterização em lâminas temporárias com glicerina.

A avaliação da ocorrência de *slip planes* foi executada em 20 fibras aleatórias por amostra; registrando-se para cada fibra, desde zero *slip planes* até o número máximo de *slip planes*. Esse trabalho foi realizado no microscópio Olympus BX-51, utilizando o polarizador e o analisador acoplados no microscópio; a platina rotatória e binoculares para a sua observação direta, como líneas brilhantes, semidiagonais, na parede das fibras quando examinada entre polarizadores cruzados ou em ocasiões como, finas linhas tênues obscuras (para melhor visualização) quando o polarizador inferior foi rotacionado.

Os dados da avaliação dos *slip planes* foram analisados sobre duas abordagens: inferencial e descritiva. No primeiro caso, por meio de um modelo linear generalizado (GLM) com distribuição binomial e função de ligação *logit*, tratando a muda como unidades experimental. Para cada muda, a variável resposta foi composta pelo número de fibras com *slip planes* em relação ao número total de fibras avaliadas (20 fibras/muda) permitindo assim, modelar a proporção de fibras com *slip planes* em função do tratamento experimental a um nível de significância de 5% ($\alpha = 0,05$). Na abordagem descritiva, utilizando estatísticas descritivas para o número de *slip planes* por fibras e resumida por grupo experimental sendo consideradas a média, a mediana, a frequência absoluta e a proporção. As análises foram realizadas no *software* R (R *Core Team*, versão 4.3.1).

3. Resultados e discussão

A análise de dados por meio do ajuste do GLM com distribuição binomial e função de ligação *logit* revelou efeito significativo do tratamento hídrico sobre a probabilidade de fibras das mudas do lenho de *Eucalyptus camaldulensis* apresentarem *slip planes* ($\beta = 1,619$; $z = 4,504$; $p = 6,66 \times 10^{-6}$).

Com base em valores de estatística de dispersão citados por Khan *et al*. (2026), o resultado do diagnóstico do modelo ajustado não indicou evidência de superdispersão (deviance residual/GL = 0,45), sugerindo que a variabilidade observada foi compatível com a assumida pela distribuição binomial. Dessa forma, o modelo apresentou ajuste satisfatório para descrever os dados obtidos. Sob a perspectiva biológica, essa ausência de superdispersão, associada ao ajuste satisfatório do modelo e ao efeito significativo do tratamento, constitui um indicativo de que a variabilidade extra presente nos dados não foi suficiente para comprometer a detecção do

efeito do estresse hídrico induzido pela restrição na frequência de irrigação sobre a ocorrência de *slip planes* nas fibras.

Em termos percentuais o modelo ajustado estimou que a probabilidade de uma fibra apresentar *slip planes* aumentou de, aproximadamente, 13% nas mudas controle para 43% nas mudas do grupo tratamento. Além do aumento na probabilidade estimada, a restrição da frequência de irrigação elevou em aproximadamente cinco vezes as chances (*odds*) de ocorrência de fibras com pelo menos um *slip plane* em relação ao grupo controle (OR = 5,05; IC95%: 2,55–10,54).

Os resultados anteriores fornecem evidências de que a condição de estresse em mudas de *E. camaldulensis*, induzida pela restrição na frequência de irrigação e inferido pelo murchamento, favorece a ocorrência de *slip planes*, aumentando a probabilidade e *odds* de uma fibra apresentar pelo menos um *slip plane* em relação ao grupo de mudas controle. Na Tabela 1, apresentam-se valores médios do número de fibras com e sem *slip planes* e, a porcentagem de fibras com *slip planes* no lenho de mudas de *E. camaldulensis* do grupo controle e o tratado com restrição na frequência de irrigação.

Tabela 1 – Valores médios de fibras com presença e com ausência de *slip planes* do lenho mudas de *Eucalyptus camaldulensis* por grupo experimental.

Grupos experimentais	FC-*Sp*	FS-*Sp*	T-F/M	FC-*Sp* (%)
Controle	2,60[a]	17,40	100,00	13,00
Tratamento	8,60[b]	11,40	100,00	43,00

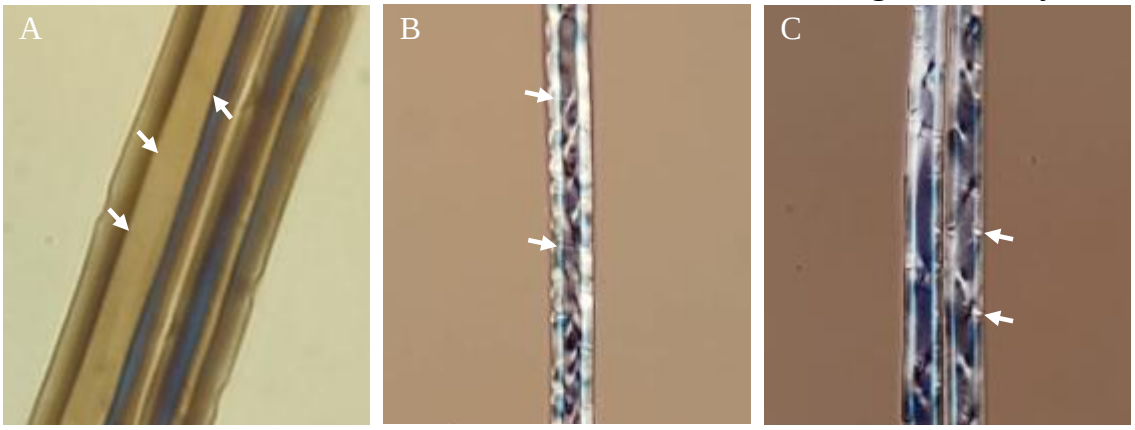
Valores médios seguidas por letras diferentes indicam diferenças significativas ao 5% ($p \leq 0,05$). **FC-*Sp***: Fibras com *slip planes*. **FS-*Sp***: Fibras sem *slip planes*. **T-F/M**: Total de fibras avaliadas por condição. **FC-*Sp* (%)**: Porcentagem de fibras com *slip planes*.

Um aspecto relevante e evidenciado nos resultados apresentados (Tabela 1) é que a restrição na frequência de irrigação não parece ser a única responsável pela presença de fibras com *slip planes* no lenho das mudas. Embora a frequência das fibras tenha sido maior nas mudas do grupo tratamento, fibras com *slip planes* também foram observadas nas amostras das mudas do grupo controle, sugerindo que outro fator, não identificado, poderia estar envolvido na formação de *slip planes*.

Os resultados anteriores oferecem evidencia de que a ocorrência de fibras com *slip planes* esteja vinculada à condição de estresse hídrico. Entretanto, na literatura não foram observados estudos para discutir os resultados do efeito da restrição na frequência de irrigação

ou da condição de estresse hídrico sobre a probabilidade ou as chances de ocorrência de fibras apresentarem *slip planes*. Um único estudo observado (Thygesen & Asgharipour, 2008), vinculado com este estudo inicial, reportou a presença de *slip planes* em fibras de mudas desenvolvidas sob irrigação e sob seca, embora em fibras de *Cannabis sativa* L. Na figura 3 apresentam-se imagens de fibras obtidas da microscopia de luz polarizada do lenho das mudas de *Eucalyptus camaldulensis* do grupo controle e o grupo tratado com restrição na frequência de irrigação.

Figura 3 – Porções de fibras de



mudas de *Eucalyptus camaldulensis* na microscopia de luz polarizada. **A**: Porção de fibra de muda do grupo controle com presença *slip planes* (linhas tênues obscuras), assinalados por setas brancas. **B**: Porção de fibra de muda do grupo tratamento, com presença *slip planes* (finas linhas brancas) assinalados por setas brancas. **C**: Porção de fibra de muda do grupo controle sem *slip planes* com marcas brilhantes, apontadas por setas brancas, associadas com a caraterística birrefringência da parede próximo às pontuações.

Até onde sabemos a razão pela qual as plantas poderiam desenvolver fibras com *slip planes* no lenho de plantas sem estresse hídrico é desconhecida. Com base nos estudos de deslocações em outros materiais e observações durante a exame das fibras, é plausível que para a condição contraria ao estrese hídrico, o desenvolvimento de *slip planes* poderia tratar-se de um mecanismo para minimizar o avanço de fissuras ou rachaduras na parede celular sob solicitações mecânicas específicas. Analisando o comportamento dos *slip planes*, reportado por Thygesen, Éder & Burgert (2007), estes poderiam se tratar de um mecanismo natural das plantas, destinado à liberação de tensão de tração longitudinal na parede de fibras; um mecanismo que pela perspectiva biomecânica, seria possível supor que esteja relacionada com o rápido crescimento. Porém, é necessária maior investigação para verificar essas suposições.

Em relação à quantidade de *slip planes* nas fibras do lenho das mudas de *E. camaldulensis*, a estatística descritiva evidenciou variações perceptíveis. Nas fibras de mudas do grupo controle foram observados 24 *slip planes*, distribuídos em 13% das cem fibras avaliadas. Já nas fibras das mudas do grupo tratado foram notados 123 *slip planes*, distribuídos em 43% de um total de cem fibras avaliadas. O número médio de *slip planes* nas fibras das mudas do grupo controle e nas mudas do grupo tratamento foi de 0,24 e 1,23, respetivamente.

Na maioria das fibras do grupo controle (87%) não foram observados *slip planes*; enquanto aquelas em que o fenômeno ocorreu, apresentaram entre um e três *slip planes*. Nas amostras das mudas do grupo experimental, observou-se menor proporção de fibras sem *slip planes* (57%) e maior amplitude de ocorrência, variando de um a seis *slip planes* por fibra. Na Tabela 2, apresentam-se valores estatísticos descritivos para a quantidade de *slip planes* nas fibras das mudas de *Eucalyptus camaldulensis* do grupo controle e o tratado com restrição na frequência de irrigação.

Tabela 2 – Estatística descritiva do número de *slip planes* nas fibras do lenho das mudas de *Eucalyptus camaldulensis* por grupo experimental.

Grupos experimentais	N° Fib	$\bar{X}$	Md*	FA	Prop. (%)
Controle	100	0,24	0,00	24	13
Tratamento	100	1,23	0,00	123	43

*****Estatística usado por se tratar de uma variável de contagem com distribuição assimétrica e elevada frequência zeros. **N° Fib**: Número de fibras examinadas. **$\bar{X}$**: Média aritmética. **Md**: Mediana. **FA**: Frequência absoluta. **Prop. (%)**: Proporção.

Ao observar a Tabela 2 é interessante observar valores da medianas igual a zero. Sob a perspectiva biológica o fato indica que, pelo menos a metade das fibras avaliadas de cada grupo não apresentou pelo menos um *slip plane*. Thygesen & Asgharipour (2008) investigando o efeito das condições de desenvolvimento sobre a ocorrência de *slip planes* em plantas *Cannabis sativa* L., reportaram diferenças entre magnitudes de parâmetros relativos aos *slip planes* da condição de seca e condição controle (citada como sem vento).

4. Conclusões

Os resultados obtidos neste estudo oferecem evidências de que o estresse hídrico, decorrente da restrição de irrigação, favorece a ocorrência de *slip planes* nas fibras do lenho de mudas de *Eucalyptus camaldulensis*. Evidências sugerem que a condição nas mudas não apenas

aumenta a probabilidade de ocorrência de fibras com *slip planes* mas, também do aumento do seu número nas fibras.

5. Agradecimentos

Os autores agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES).

6. Referências bibliográficas

Ander, P., & Marklund, A. “Dislocations and strength properties of softwood industrial pulps,” *WURC Intern rapport nr 4.* WURC, SLU, Inst f Travetenskap, Uppsala February 2003. ISBN 91-576-6647-4.

Ander, P., Hildén, L., & Daniel, G. (2008). Cleavage of softwood kraft pulp fibres by HCl and cellulases. BioResources, 3(2), 477-490. https://doi.org/10.15376/biores.3.2.477-490

Bergfjord, C., Karg, S., Rast-Eicher, A., Nosch, M. L., Mannering, U., Allaby, R. G., & Holst, B. (2010). Comment on “30,000-year-old wild flax fibers”. Science, 328(5986), 1634-1634. https://doi.org/10.1126/science.1186345

Coehler, A. (1933). Causes of brashness in wood. (United States Department of Agriculture Technical Bulletin No. 342) 328-330. https://doi.org/10.22004/ag.econ.163529

Davies, G. C., & Bruce, D. M. (1998). Effect of environmental relative humidity and damage on the tensile properties of flax and nettle fibers. Textile Research Journal, 68(9), 623-629. https://doi.org/10.1177/004051759806800901

Dinwoodie, J. (1966). Induction of cell wall dislocations (slip planes) during the preparation of microscope sections of wood. Nature, v. 212, p. 525-527. https://doi.org/10.1038/212525a0

Dinwoodie, J. M. (1978). Failure in timber part 3: The effect of longitudinal compression on some mechanical properties. Wood science and Technology, 12(4), 271-285. https://doi.org/10.1007/BF00350644

Kawakubo, T., Karita, S., Araki, Y., Watanabe, S., Oyadomari, M., Takada, R., Tanaka, F., Abe, K., Watanabe, T., Honda, Y., & Watanabe, T. (2010). Analysis of exposed cellulose surfaces in pretreated wood biomass using carbohydrate-binding module (CBM)–cyan fluorescent protein (CFP). Biotechnology and bioengineering, 105(3), 499-508. https://doi.org/10.1002/bit.22550

Khan, N.M., Baldi, I., Chiaruttini, M.V., Gregori, D. (2026). Residuals and Overdispersion in Generalized Linear Models. In: Classical and Bayesian Statistical

Approaches in Infectious Disease Data Analysis. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-032-06747-0_6

Melelli, A., Durand, S., Arnould, O., Richely, E., Guessasma, S., Jamme, F., Beaugrand, J., & Bourmaud, A (2021). Extensive investigation of the ultrastructure of kink-bands in flax fibres. Industrial Crops and Products, 164, 113368. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2021.113368

Moulin, J. C., Lima, J. T. (2019). Quantification of slip planes in the stem wood of *Eucalyptus grandis*. Holzforschung, 73(3), p. 269-275. https://doi.org/10.1515/hf-2018-0061

Nyholm, K., Ander, P., Bardage, S., & Geoffrey, D. (2001). Dislocations in pulp fibres–their origin, characteristics and importance–a review. Nordic Pulp & Paper Research Journal, 16(4), 376-384. https://doi.org/10.3183/NPPRJ-2001-16-04-p376-384

Richely, E., Nuez, L., Pérez, J., Rivard, C., Baley, C., Bourmaud, A., Guessasma a, & Beaugrand, J. (2022). Influence of defects on the tensile behaviour of flax fibres: Cellulose microfibrils evolution by synchrotron X-ray diffraction and finite element modelling. Composites Part C: Open Access, 9, 100300. https://doi.org/10.1016/j.jcomc.2022.100300

Robinson, W. (1920) The microscopical features of mechanical strains in timber and the bearing of these on the structure of the cell-wall in plants. Ph. Trans. Royal Soc, p. 49-82. https://doi.org/**10.1098/rstb.1921.0002

Thygesen, L. G. (2008). Quantification of dislocations in hemp fibers using acid hydrolysis and fiber segment length distributions. Journal of materials science, 43(4), 1311-1317. https://doi.org/10.1007/s10853-007-2284-4

Thygesen, L. G., & Asgharipour, M. R. (2008). The effects of growth and storage conditions on dislocations in hemp fibres. Journal of materials science, 43(10), 3670-3673. https://doi.org/10.1007/s10853-008-2587-0

Thygesen, L. G., Eder, M., Burgert, I. (2007). Dislocations in single hemp fibres – Investigations into the relationship of structural distortions and tensile properties at the cell wall level. Journal of Materials Science, 42(2), 558–564. https://doi.org/10.1007/s10853-006-1113-5

Thygesen, L. G., Hidayat, B. J., Johansen, K. S., & Felby, C. (2011). Role of supramolecular cellulose structures in enzymatic hydrolysis of plant cell walls. Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology, 38(8), 975-983. https://doi.org/10.1007/s10295-010-0870-y

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Extrativos da madeira de *Pinus*, *Eucalyptus* e *Corymbia* em acetona utilizando diferentes métodos

José Pedro Brito Santos[1]; Dalton Longue Júnior[1]; Laura da Silva Rocha[1]; Matildes Santos Borges[1]; Natielly Cristine Gomes de Medeiros[2]; Graziela Baptista Vidaurre Dambroz[2], Fernanda Maria Guedes Ramalho[3]

[1] Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia
[2] Universidade Federal do Espírito Santo
[3] Klabin Celulose

Resumo: O Brasil é reconhecido mundialmente pelas exportações de polpa celulósica utilizando principalmente madeiras de *Eucalyptus* e *Pinus*. Entretanto, o gênero *Corymbia* também tem sido estudado como alternativa devido ao seu rápido crescimento e elevada densidade básica. Este trabalho avaliou o teor de extrativos dessas três madeiras por meio dos "métodos da pesagem da serragem e do balão". As amostras foram submetidas à extração com acetona (simples) e acetona + água quente (dupla). Os resultados mostraram que o método do balão apresentou os maiores teores de extrativos para todas as madeiras estudadas. Já pelo método da serragem, a madeira de *Pinus* e *Corymbia* apresentou o maior teor de extrativos. Diferenças estatísticas foram observadas entre os métodos de determinação e a extração dupla resultou em teores superiores aos obtidos com a extração simples em acetona. Além disso, o método da serragem apresentou melhor capacidade operacional e possibilidade de realização de maior número de análises. Concluiu-se que o teor de extrativos utilizando diferentes métodos não devem ser comparados diretamente, pois fornecem resultados distintos, da mesma forma que os resultados das extrações simples e duplas não podem ser comparados.

Palavras-chave: Quantificação; Qualidade; Química da madeira.

Extractives of *Pinus*, *Eucalyptus* and *Corymbia* wood in acetone using different methods

Abstract: Brazil is recognized worldwide for its exports of pulp, mainly using *Eucalypt* and *Pinus* wood. However, the genus *Corymbia* has also been trained as an alternative due to its rapid growth and high basic density. This work evaluated the extractives content of these three woods using the "sawdust weighing and flask methods". The samples were subjected to removal with acetone solvent (single) and acetone + hot water (double). The results showed that the flask method presented the highest extractives content for all woods studied, and that, using the sawdust method, Pine wood presented the highest extractives content. Statistical differences were observed between the determination methods, and the doble extraction showed superior results compared to those found with simple acetone removal. Furthermore, the sawdust method presented better operational capacity and the possibility of performing a greater number of analyses. It can be concluded that the content of extractions using different methods should not be directly compared, as it provides different results, just as the results of single and double extractions cannot be compared.

Key words: Quantification; Quality; Wood chemistry.

1. Introdução

O Brasil ocupa atualmente a liderança mundial na exportação de celulose de fibra curta e longa, tendo exportado 18,6 milhões de toneladas em 2024, volume correspondente a 265,7% do consumo do mercado interno (IBÁ, 2025). As espécies mais utilizadas para essa finalidade pertencem aos gêneros *Eucalyptus* sp. e *Pinus* sp. Entretanto, estudos envolvendo espécies de rápido crescimento e elevado incremento médio anual, como aquelas pertencentes ao gênero *Corymbia* sp., têm sido amplamente desenvolvidos com o objetivo de diversificar e ampliar a disponibilidade de matéria-prima para a indústria de base florestal (IBÁ, 2025; Reis et al., 2014). Nesse contexto, torna-se fundamental avaliar as propriedades tecnológicas dessas espécies comerciais.

Dentre as principais propriedades tecnológicas da madeira, a composição química ocupa posição de destaque. Análises como o teor de lignina, celulose, hemiceluloses e extrativos são consideradas importantes parâmetros de qualidade da matéria-prima destinada à produção de celulose (Ferdous et al., 2021).

O teor de extrativos desempenha papel relevante no processo de produção de polpa celulósica, uma vez que elevados valores podem ocasionar diversos problemas operacionais na indústria. Segundo Dou et al. (2023), altos teores de extrativos favorecem a formação de incrustações em equipamentos, podendo provocar paradas para manutenção e limpeza e desclassificação do produto por sujidade, além de reduzir a eficiência do processo. Adicionalmente, esses compostos contribuem para a formação de *pitch*, depósitos de substâncias hidrofóbicas que comprometem a qualidade final da polpa celulósica.

Importante destacar que o teor de extrativos da madeira se altera conforme o tipo de solvente escolhido e o método de pesagem, sendo definido pela TAPPI o método utilizando balão e acetona como reagente, devido sua baixa periculosidade e polaridade capaz de extrair um amplo espectro de compostos. Porém, o método da pesagem da serragem permite a realização de uma maior quantidade de amostras, o que se torna mais aderente ao controle de processo em fábricas que precisam realizar muitas análises.

Portanto, o objetivo do trabalho foi determinar o teor de extrativos da madeira dos gêneros comerciais *Pinus* sp, *Eucalyptus* sp. e *Corymbia* sp. pelo método da serragem e balão, combinando extração simples (acetona) e dupla (acetona e posterior água quente).

2. Material e métodos

2.1 Local de estudo e materiais utilizados

Os cavacos utilizados nas análises foram provenientes de diferentes regiões e indústrias do Brasil. Os cavacos de madeira de *Eucalyptus* sp. e *Pinus* sp. foram obtidos, respectivamente, de fábricas de polpa celulósica localizada no extremo sul da Bahia e região do Campos Gerais no Paraná.

O material de *Corymbia* sp. foi obtido em plantios comerciais destinados a produção de carvão vegetal, localizados na região de Alagoinhas, Bahia, na forma de toretes. Posteriormente os toretes foram transformados em cavaco no Laboratório de Tecnologia de Produtos Florestais (Woodtech), onde também foram feitas todas as análises laboratoriais.

A serragem foi produzida utilizando moinho de facas de tipo Willey. A serragem foi classificada em peneiras de 40-60 mesh, onde a fração utilizada para as análises foram apenas as retidas na peneira de 60 mesh, conforme recomendado pela norma TAPPI T 257 (2012).

2.2 Determinação do teor de extrativos por diferentes métodos de pesagem

Para a determinação do teor de extrativos presentes nas madeiras dos diferentes gêneros comerciais, foram pesadas em balança analítica aproximadamente 2,000 g de serragem da fração aceita na peneira de 60 mesh. Em seguida, em aparelho do tipo Soxhlet, as amostras foram submetidas à extração por cinco horas, utilizando 150 mL de acetona (extração simples), conforme a norma TAPPI 204 cm-17 (Figura 1). Posteriormente, as amostras foram submetidas à extração em 200 mL de água deionizada quente por uma hora (extração dupla).

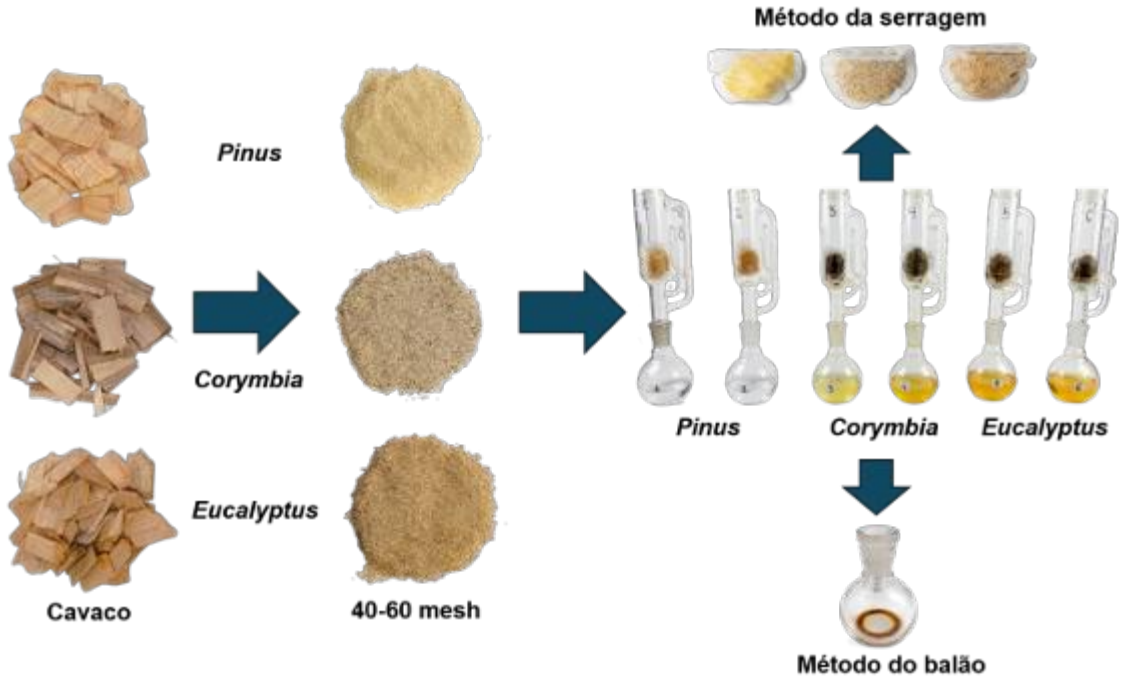


Figura 1: Procedimento e preparo das amostras de *Pinus*, *Corymbia* e *Eucalyptus* utilizadas.

Para a metodologia do balão, o teor de extrativos foi determinado a partir da massa de extrativos residual depositada no balão após o processo de extração. Inicialmente, o balão vazio foi pesado. Após a extração, o solvente foi evaporado em estufa a 103 ± 2 °C durante uma hora, sendo o balão novamente pesado. O teor de extrativos foi calculado pela diferença entre as massas final e inicial do balão.

No método da serragem, o teor de extrativos foi obtido pela diferença entre a massa da amostra de serragem antes e após a extração, sendo calculado a partir da perda de massa ocasionada pela remoção dos compostos extraíveis.

2.3 Análise estatística

A análise estatística dos dados foi realizada por meio do teste de Tukey, a 95% de probabilidade, para comparação das médias dos teores de extrativos entre os diferentes gêneros avaliados, tanto em extração simples (acetona) quanto na extração dupla (acetona + água).

Todas as análises foram realizadas em quatruplicata para o método da serragem e duplicata para o método do balão por extração e para todas as espécies. Considerando que foram feitas 3 extrações, as repetições totalizaram 36 para o método da serragem e 18 para o método do balão.

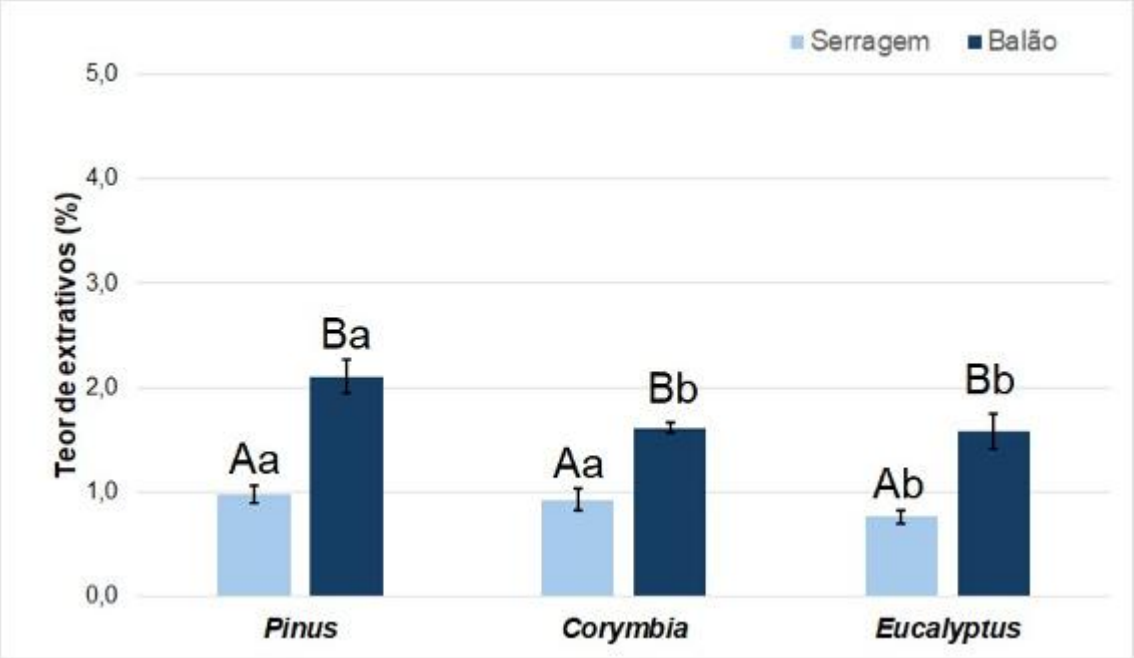
Para a comparação dos diferentes métodos de determinação do teor de extrativos dentro de cada gênero, foi aplicado o teste F. Todas as análises estatísticas foram realizadas utilizando o software PAST versão 4.02.

3. Resultados e discussão

Na extração simples (apenas acetona) o método do balão apresentou teores de extrativos superiores ao método da serragem nas amostras dos três gêneros avaliados. O teor de extrativos de *Pinus* sp. foi de 1,0% para o método da serragem, e 2,1% para o método do balão. *Corymbia* e *Eucalyptus* apresentaram teores de extrativos de 0,9 e 0,8%, respectivamente, para o método da serragem, e 1,6 e 1,7%, respectivamente, para o método do balão (Figura 2). Assim, os teores de extrativos determinados por diferentes métodos de pesagem devem ser considerados e avaliados separadamente, não sendo recomendada a comparação direta entre eles.

O teor de extrativos avaliado pelo método da serragem foi estatisticamente igual para *Pinus* e *Corymbia*, diferindo apenas no *Eucalyptus.* Já para o método do balão, apenas a

serragem de *Pinus* obteve diferença significativa, enquanto os outros tratamentos apresentaram igualdade estatística.



Letras maiúsculas idênticas significam igualdade estatísticas entre os métodos de pesagem, pelo teste F a 95% de probabilidade. Letras minúsculas idênticas significam igualdade estatística entre os diferentes gêneros, pelo teste Tukey a 95% de probabilidade.

Figura 2: Teor de extrativos de *Pinus*, *Eucalyptus* e *Corymbia*, utilizando acetona (extração simples) para os métodos serragem e balão.

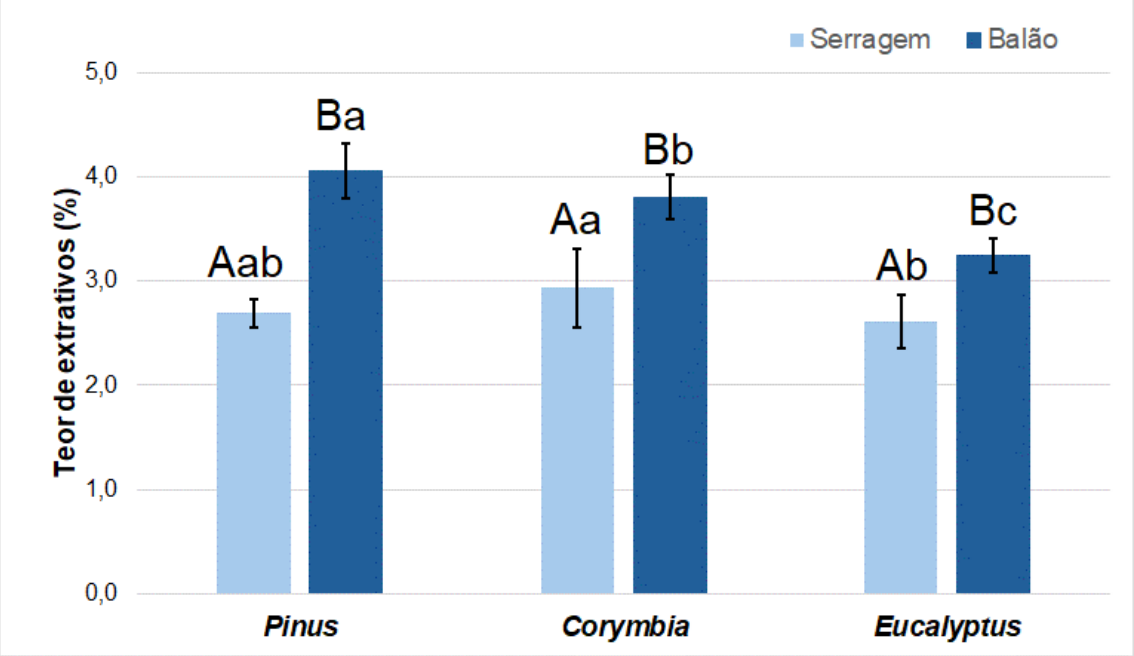
Geralmente, as coníferas apresentam maior teor de extrativos em relação as folhosas (Sarto e Sangigolo, 2010). Resultados semelhantes foi encontrado neste estudo, o qual o teor de extrativos encontrado em *Pinus* foi superior principalmente pelo método do balão em comparação com os demais gêneros comerciais.

A norma TAPPI T 204 cm-17 recomenda que a determinação do teor de extrativos seja realizada pelo método do balão. Entretanto, o método da serragem apresenta como principal vantagem a maior capacidade operacional, permitindo maior número de análises por ciclo de uso do equipamento. Considerando a utilização de 6 balões simultaneamente, é possível realizar 12 repetições pelo método da serragem, ou seja, o método se torna potencialmente mais atrativo para análises de rotina devido a sua operacionalidade.

Medeiros (2024) analisando o teor de extrativos para madeira de eucalipto, observou diferença estatística significativa entre o método do balão e da serragem, reafirmando a

possibilidade da adoção de ambas as técnicas para a determinação, ressaltando os cuidados com a comparação dos resultados.

O teor de extrativos utilizando em acetona + água (extração dupla) também mostrou resultados superiores para o método do balão, e apresentou diferença estatística quando comparado ao método da serragem em todos os tratamentos (Figura 3).



Letras maiúsculas idênticas significam igualdade estatísticas entre os métodos de pesagem, pelo teste F a 95% de probabilidade. Letras minúsculas idênticas significam igualdade estatística entre os diferentes gêneros, pelo teste Tukey a 95% de probabilidade.

Figura 3: Teor de extrativos de *Pinus*, *Eucalyptus* e *Corymbia*, utilizando acetona e água quente (extração dupla) para os métodos serragem e balão.

Os teores de extrativos obtidos em ambos os métodos e para todos os gêneros estudados foram superiores quando comparados a extração somente em acetona. A combinação da água com o solvente acetona contribuiu para o aumento da extração de compostos da madeira, devido à interação entre diferentes polaridades dos líquidos. Essa condição favorece a solubilização de uma maior diversidade de compostos químicos, resultando em maiores valores de extrativos totais.

Entretanto, teores mais elevados não necessariamente estão associados a uma maior extração de compostos (extrativos) diretamente relacionados aos problemas operacionais industriais, como os compostos lipofílicos associados a formação de *pitch*. Resultados semelhantes foram relatados por Pereira (2025) e Silva (2025), ao avaliar a influência da

extração dupla com água quente em eucalipto, observaram maiores percentuais da extração em comparação com a simples.

4. Conclusões

O método da serragem apresentou resultados significativamente diferentes do método do balão, bem como a extração em acetona e água quente confirmou a diferença entre os métodos.

A extração dupla promoveu o aumento do teor de extrativos em relação a extração simples para os três gêneros estudados, sendo necessário estudos que avaliem qualitativamente os compostos obtidos nessas extrações e associem ao impacto no processo industrial.

Por fim, não é recomendada a comparação de resultados utilizando diferentes métodos de pesagem (serragem e balão) ou extrações simples e duplas, ao mesmo tempo que todos os resultados são confiáveis e apresentam relação com os compostos presentes na madeira.

5. Agradecimentos

A Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia pela infraestrutura para realização da pesquisa. Ao CNPq pelo fomento da bolsa de pesquisa. Ao Grupo de Pesquisa em Tecnologia de Produtos Florestais (Woodtech) pelo suporte científico.

6. Referências bibliográficas

Dou, J., Niemelä, K., Haatainen, T., Tervola, P., & Vehmaa, J. (2023). Investigation of pitch deposits throughout the fiber line of softwood pulp mills. Journal of Cleaner Production. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.136940

Ferdous, T., Ni, Y., Quaiyyum, M. A., Uddin, M. N., & Jahan, M. (2021). Non-Wood Fibers: Relationships of Fiber Properties with Pulp Properties. ACS Omega, 6, 21613 - 21622. https://doi.org/10.1021/acsomega.1c02933

Indústria Brasileira de Árvores. (2025). Relatório IBÁ 2025 ano base 2024. https://iba.org/wp-content/uploads/2025/10/IBA_relatorio_digital_POR.pdf

Hammer, Ø., Harper, D.A.T., & Ryan, P.D. (2001). PAST: Paleontological Statistics Software Package for Education and Data Analysis. (4.02) palaeo-electronica.org

Medeiros, N. C. G. (2024). Estudo dos extrativos e da casca de eucalipto e seus impactos na indústria de polpa Kraft (Dissertação de mestrado). Universidade Estadual

do Sudoeste da Bahia

Pereira, N. (2025). Determinação dos extrativos da madeira para o monitoramento industrial (Bacharelado em Engenharia Florestal). Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia.

Reis, C. A. F., Assis, T. F., Santos, A. M. & Paludzyszyn Filho, E. (2014). Embrapa Florestas. ISSN 1980-3958.

Sarto, C.; Sangigolo, C. A. (2010). Cinética da remoção dos extrativos da madeira de *Eucalyptus grandis* durante polpação Kraft. Acta Scientiarum. Technology, v. 32, n. 3, p. 227-235.

SILVA, B. F. (2025). Estudo da metodologia de determinação do teor de extrativos da madeira de eucalipto (Bacharelado em Engenharia Florestal). Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia.

Technical association of the pulp and paper industry. (2012). TAPPI T 257 cm-02. Sampling and preparing wood for analysis.

Technical association of the pulp and paper industry. (2017). TAPPI T 204 cm-17. Solvent extractives of wood and pulp.

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Extrativos da madeira e da casca de *Eucalyptus* e *Corymbia* em diferentes idades utilizando solvente acetona pura

Matildes Santos Borges[1]; Dalton Longue Júnior[1]; Laura da Silva Rocha[1]; Elen de Sousa Barbosa[1]; Stéfany Vieira Silva[1]

[1] Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia.

Resumo: Os gêneros *Eucalyptus* e *Corymbia* são amplamente utilizados no setor florestal brasileiro, sendo os extrativos importantes indicadores de qualidade da madeira. O presente trabalho objetivou analisar o teor de extrativos da madeira e da casca de clones comerciais de *Eucalyptus* e *Corymbia* em diferentes idades cultivados na região Norte da Bahia, utilizando acetona pura como solvente. Foram utilizados clones com idades de 3 e 7 anos (*Eucalyptus*) e 3, 7 e 9 anos (*Corymbia*), submetidos a extração simples com acetona e extração dupla acetona e água seguindo as normas TAPPI. Os resultados obtidos indicaram que os clones de maior idade apresentaram maior teor de extrativos, tanto na madeira quanto na casca, e que os mesmos apresentam relação direta e positiva. A extração dupla (acetona + água) apresentou os maiores teores de extrativos em todos os materiais analisados, devido à capacidade dos diferentes solventes em extrair compostos químicos de diferentes polaridades.

Palavras-chave: Qualidade da madeira, Compostos orgânicos, Solventes.

Extractives from Eucalyptus and Corymbia wood and bark at different ages using pure acetone as a solvent

Abstract: The genera *Eucalyptus* and *Corymbia* are widely used in the Brazilian forestry sector, with extractives serving as important indicators of wood quality. This study aimed to analyze the extractive content in the wood and bark of commercial *Eucalyptus* and *Corymbia* clones of various ages cultivated in the northern region of Bahia, using pure acetone as the solvent. Clones 3 and 7 years old (*Eucalyptus*) and 3, 7, and 9 years old (*Corymbia*) were used, subjected to both single extraction (acetone) and double extraction (acetone followed by water) in accordance with TAPPI standards. The results indicated that older clones exhibited higher extractive content in both wood and bark, and that a direct, positive relationship exists between these values. The double extraction method (acetone + water) yielded the highest extractive contents across all materials tested, owing to the ability of the different solvents to extract compounds of varying polarities.

Keywords: Wood quality, Organic compounds, Solvents.

1. Introdução

Os gêneros *Eucalyptus* e *Corymbia* pertencentes à família Myrtaceae são nativos da Oceania, e estão entre os mais cultivados no mundo para fins industriais. No Brasil, esses gêneros se destacam pelo amplo uso, abrangendo uma diversidade de segmentos industriais, madeireiros e não madeireiros, contribuindo para a posição de destaque do país no setor mundial de florestas plantadas. De acordo a Indústria Brasileira de Árvores (IBÁ), no ano de 2024 havia 10,5 milhões de florestas plantadas, sendo desse total, em torno de 8,1 milhões de hectares formado por espécies do gênero Eucalyptus.

A madeira é composta por diferentes compostos químicos, como celulose, hemicelulose, lignina e uma pequena fração de extrativos e de materiais inorgânicos. A qualidade da madeira está associada às características químicas, físicas, mecânicas e anatômicas, as quais determinam a sua aptidão para a obtenção de diferentes produtos. Os extrativos exercem influência em diversas propriedades tecnológicas da madeira, sendo responsáveis pela cor, odor e resistência ao apodrecimento e ao ataque de xilófagos (Paes et al., 2016).

Os extrativos da madeira representam características importantes na qualidade da madeira, entretanto são considerados indesejáveis no processo de polpação, pois geram dificuldade na impregnação dos reagentes químicos nos cavacos de madeira, além de, entre outros problemas, se transformarem em sujidade conhecidos como *pitch*, que diminuem a capacidade de funcionamento da máquina de papel ao ponto de provocar ruptura na folha durante a formação (Robust et al., 2014). O teor de extrativos também influencia no processo de branqueamento da polpa celulósica, afetando o consumo de reagente químico na etapa de branqueamento e a qualidade da polpa reduzida.

Considerando a relevância econômica dos gêneros *Eucalyptus* e *Corymbia* para o setor florestal brasileiro e a importância dos extrativos como indicadores de qualidade da madeira e da casca, o presente trabalho teve como objetivo analisar o teor de extrativos da madeira e da casca de clones comerciais de *Eucalyptus* e *Corymbia* em diferentes idades cultivados na região Norte da Bahia, utilizando acetona pura como solvente.

2. Material e métodos

2.1. Preparo e coleta do material

Para realização das análises foram utilizados clones de *Eucalyptus* e *Corymbia* com idades de 3 e 7 anos (eucalipto) e 3, 7 e 9 anos (*Corymbia*) cultivados na região norte da Bahia por uma empresa de base florestal.

O material inicialmente estava no formato de toretes que foi reduzido a corpos de prova utilizando uma serra circular. Logo depois os corpos de prova foram cortados em palitos utilizando um facão para posteriormente serem transformados em serragem utilizando um moinho tipo Willey (Figura 1). Após ser reduzida à serragem, foi pesado aproximadamente 25 g do material que foi levado ao agitador de peneiras utilizando um conjunto de peneiras de 40 e 60 mesh na frequência de 10 hertz durante 10 minutos, sendo selecionada a fração retida na peneira de 60 mesh, seguindo a norma TAPPI T 257 (2012).



Figura 1 – Preparo do material de eucalipto e *Corymbia* utilizado para análise.

2.2. Determinação do teor de extrativos

Foram realizados dois tipos de extrações: simples utilizando apenas acetona e extração dupla utilizando acetona + água. Para determinação do teor de extrativos foi pesado aproximadamente 2,0000 g de serragem em uma balança analítica de precisão. As amostras foram submetidas em extração com 150 mL do solvente acetona, em um aparelho tipo Soxhlet por 5 horas, de acordo a norma TAPPI T 204 cm17 (2017). A determinação do teor de extrativos foi realizada pela pesagem do balão, sendo pesado inicialmente vazio e após a extração com secagem de 1 hora na estufa.

Para a extração dupla (acetona + água) a serragem foi transferida para um béquer com água quente para extração em banho maria, por 1 hora. Feito a extração em água quente, a serragem foi filtrada utilizando cadinho filtrante sintetizado de vidro. A filtração foi feita com auxílio de um kitassato acoplado à bomba de vácuo. Após a filtragem, o resíduo da extração em água foi coletado em um béquer, que foi levado para a estufa até evaporação total, restando apenas os extrativos secos para serem pesados.

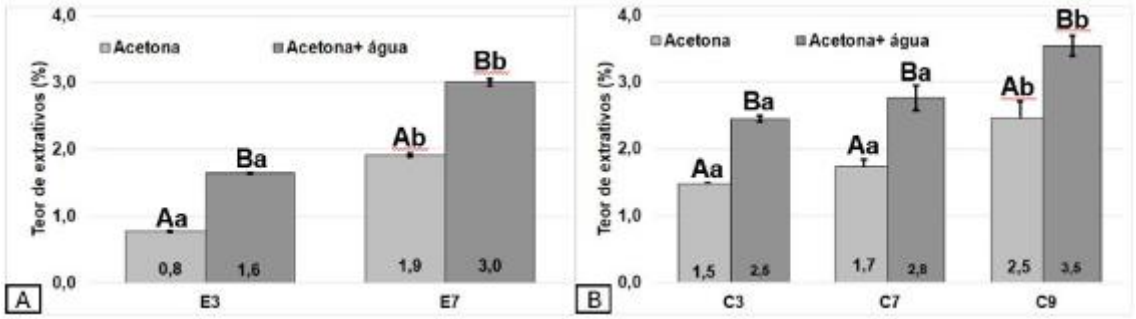
2.3. Análise estatística dos dados

Para a análise de dados foi utilizado o Excel para formatação dos gráficos e o software Past 4.03.exe para análise estatística.

Para comparação do tipo de extração foi aplicado o teste F a 95% de probabilidade. Para o gênero *Eucalyptus* foi avaliado o teor de extrativos no mesmo tipo de extração entre as diferentes idades pelo teste F a 95% de probabilidade. Por outro lado, para o gênero *Corymbia* foi realizado o teste de Tukey a 95% de probabilidade. Todas as análises foram realizadas em triplicata.

3. Resultados e discussão

Para as duas espécies (*Eucalyptus* e *Corymbia*) e em todas as idades avaliadas nesse estudo, o teor de extrativos pela extração simples foi inferior e diferiu estatisticamente do teor de extrativos da extração dupla (Figura 2). Para a extração simples, o teor de extrativos da madeira de *Eucalyptus* foi menor e variou entre 0,8 e 1,9%, enquanto na madeira de Corymbia variou entre 1,5 e 2,5%. Considerando a extração dupla acetona + água, o teor de extrativos da madeira de *Eucalyptus* variou entre 1,6 e 3,0%, enquanto na madeira de *Corymbia* a variação foi entre 2,5 e 3,5%.



Letras maiúsculas idênticas não apresentam diferenças estatísticas significativas entre o tipo de extração no mesmo clone, pelo teste F a 95% de probabilidade. Letras minúsculas idênticas não apresentam diferenças estatísticas significativas entre o tipo de extração em diferentes clones, pelo teste F a 95% de probabilidade (eucalipto) e Tukey a 95% de probabilidade (*Corymbia*).

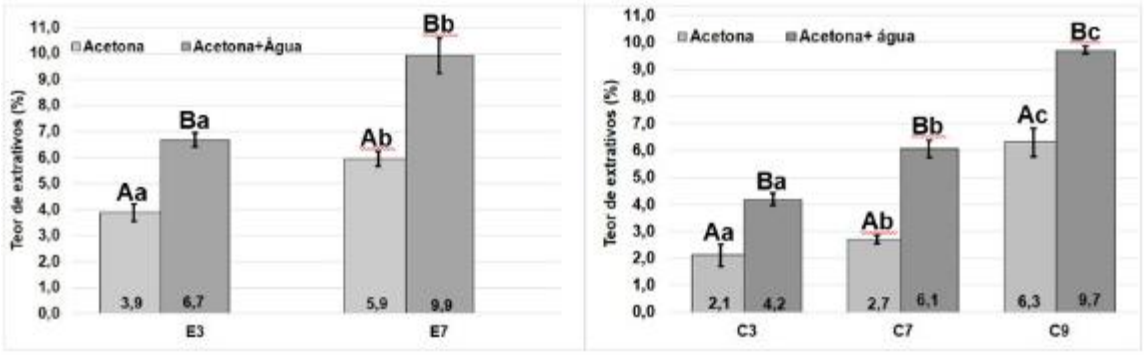
Figura 2 – Teor de extrativos na madeira em acetona e acetona + água em *Eucalyptus* (A) e *Corymbia* (B).

O aumento da idade das madeiras também acarretou em aumento do teor de extrativos, sendo que nas madeiras mais jovens (3 anos), *Eucalyptus* apresentou os menores valores (0,8 a 1,6%, extração simples e dupla respectivamente), enquanto nas madeiras de 7 anos,

Corymbia apresentou os menores valores (1,7 a 2,8%, extração simples e dupla respectivamente). Por consequência, a madeira de *Corymbia* aos 9 anos foi a que apresentou o maior teor de extrativos dentre todos os materiais avaliados.

Foi observado que a extração dupla também apresentou os maiores teores de extrativos na casca em relação a extração simples, para todas as idades de todos os materiais avaliados. Para extração simples, o teor de extrativos da casca de *Eucalyptus* variou entre 3,9 a 5,9%, enquanto a extração dupla variou entre 6,7 a 9,9% (Figura 3A). Para extração simples de *Corymbia*, o teor de extrativos da casca variou entre 2,1 a 6,3%, enquanto a extração dupla variou entre 4,2 a 9,7% (Figura 3B). Em resumo, as cascas de *Eucalyptu*s apresentam maiores teores de extrativos em relação a madeira de *Corymbia* nos materiais avaliados.

Da mesma forma como observado na madeira, a idade dos materiais provocou aumento no teor de extrativos da casca, onde os materiais de maior idade apresentaram maiores teores de extrativos (Figura 3).



Letras maiúsculas idênticas não possuem diferenças estatísticas significativas entre o tipo de extração no mesmo clone, pelo teste F a 95% de probabilidade. Letras minúsculas idênticas não possuem diferenças estatísticas significativas entre o tipo de extração em diferentes clones, pelo teste F a 95% de probabilidade (eucalipto) e Tukey a 95% de probabilidade (*Corymbia*).

Figura 3 – Teor de extrativos na casca em acetona e acetona + água em *Eucalyptus* (A) e *Corymbia* (B).

Após observar a análise do teor de extrativos da madeira e de casca para os clones de *Eucalyptus* e *Corymbia* constatou-se que os clones de maior idade possuem maior teor de extrativos. Segundo Soares et al., (2015) o aumento no teor de extrativos em função da idade do material lenhoso pode ser justificado em razão do início do processo de cernificação, no qual ocorre a transformação do alburno em cerne, processo esse caracterizado pela morte de células e alterações na constituição química das mesmas.

A diferença expressiva entre o teor de extrativos da casca e da madeira, com a casca apresentando valores aproximadamente três vezes superiores, se deve ao fato de a madeira ser formada majoritariamente por celulose, hemicelulose e lignina com função estrutural de sustentação, enquanto a casca acumula mais compostos de defesa por estar em contato com agentes externos, o que foi confirmado por Andrade et al., (2010), que constataram maior teor de extrativos na casca em comparação à madeira.

Quanto aos métodos de extração, a extração dupla (acetona + água) apresentou maior teor de extrativos em todas as extrações, isso se deve à capacidade dos dois solventes em extrair compostos de diferentes polaridades presentes na madeira e na casca. Silvério et al., (2006) avaliando diferentes metodologias de extração de eucalipto, verificou que a acetona apresentou maiores teores de extrativos totais quando comparada com outros solventes orgânicos, e que a água é capaz de solubilizar compostos de maior polaridade, como taninos e açucares que não são capturados pelos solventes orgânicos isoladamente.

Foi realizada uma relação do teor de extrativos da casca e da madeira visando compreender como esses compostos se comportam na árvore, tanto na extração simples (Figura 4A) quanto na extração dupla (Figura 4B). Os resultados indicaram que para ambos os materiais (*Eucalyptus* e *Corymbia*) houve uma relação forte e direta entre as porcentagens de extrativos da madeira e da casca, em outras palavras, a medida que esses compostos aumentaram na madeira, também foi observado um aumento na casca, com maior tendência de aumento nas madeiras de Corymbia.

A extração dupla acetona +água potencializou a quantidade de material extraído, tanto na madeira quanto na casca, em que a madeira de Corymbia também apresentou maior tendencia de acumular extrativos com a idade.

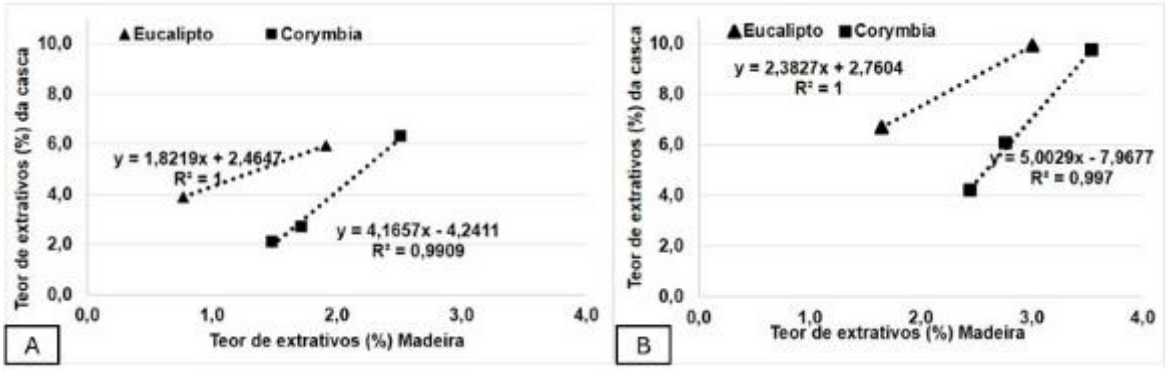


Figura 4 – Relação entre o teor de extrativos na madeira e na casca: apenas em acetona (A) e utilizando acetona + água (B).

4. Conclusões

Os dados obtidos demonstram que a espécie e a idade de colheita são fatores determinantes no teor de extrativos da madeira e da casca, contribuído para a tomada de decisão no aproveitamento industrial desses clones.

O descascamento adequado permite uma grande remoção de extrativos do processo industrial devido a casca das madeiras apresentarem maiores teores de extrativos, principalmente nas maiores idades.

O método de extração simples e duplo deve ser cuidadosamente escolhido e citado para que não sejam feitas comparações de resultados considerando diferentes técnicas.

5. Agradecimentos

A Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia pela infraestrutura para realização da pesquisa. Ao CNPq pelo fomento da bolsa de pesquisa. Ao Grupo de Pesquisa em Tecnologia de Produtos Florestais (Woodtech) pelo suporte científico.

6. Referências bibliográficas

Andrade, M. C. N. de; Minhoni, M. T. A. de; Sansígolo, C. A.; Zied, D. C. Análise química da madeira e casca de diferentes tipos de eucalipto antes e durante o cultivo de shiitake em toras. Revista Árvore, Viçosa-MG, v. 34, n. 1, p. 165-175, 2010.

Paes, J. B.; Guerra, S. C. S.; Silva, L. F. da; Oliveira, J. G. L. de; São Teago, G. B. Efeito do teor de extrativos na resistência natural de cinco madeiras ao ataque de cupins xilófagos. Ciência Florestal, v. 26, n. 4, p. 1259-1269, 2016.

Robusti, C.; Viana, E. D.; Ferreira Júnior, F.; Gomes, I.; Tognetta, L.; Santos, O. Celulose e Papel: Papel. São Paulo: SENAI-SP, 2014. 436 p.

Silvério, F. O.; Barbosa, L. C. A.; Gomide, J. L.; Reis, F. P.; Piló-Veloso, D. Metodologia de extração e determinação do teor de extrativos em madeiras de eucalipto. Revista Árvore, Viçosa, v. 30, n. 6, p. 1009-1016, 2006.

Soares, V. C.; Bianchi, M. L.; Trugilho, P. F.; Höfler J.; Pereira, A. J. Análise das propriedades da madeira e do carvão vegetal de híbridos de eucalipto em três idades. Cerne, Lavras, v. 21, n. 2, p. 191-197, 2015.

Zanuncio, A. J. V.; Carvalho, A. G.; Trugilho, P. F.; Monteiro, T. C. Extractives and energetic properties of wood and charcoal. Revista Árvore, Viçosa, v. 38, n. 2, p. 369-374, 2014.

Technical association of the pulp and paper industry. (2017). TAPPI T 204 cm-17. Solvent extractives of wood and pulp.

Technical association of the pulp and paper industry. (2012). TAPPI T 257 cm-02. Sampling and preparing wood for analysis.

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Extrativos da madeira e da casca de *Eucalyptus* e *Corymbia* utilizando diferentes métodos de pesagem

Elen de Sousa Barbosa[1]; Dalton Longue Junior[1]; Laura da Silva Rocha[1]; Matildes Santos Borges[1]; Stéfane Vieira Silva[1]; José Pedro Brito Santos[1]

[1] Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia

Resumo: A determinação precisa do teor de extrativos da madeira é fundamental para o controle de qualidade, sendo influenciada pela metodologia de quantificação empregada. Assim, o objetivo desse trabalho foi determinar o teor de extrativos em acetona da madeira e da casca de clones de *Eucalyptus* e *Corymbia* com idades de 3, 7 e 9 anos, pelo método “serragem” e “balão”. Amostras de casca e madeira das posições base, meio e topo das árvores foram submetidas à extração em Soxhlet, conforme a norma TAPPI T 204 cm-17. Os resultados mostraram que a casca apresentou teores de extrativos superiores aos da madeira; esses valores foram influenciados pela idade e a posição no tronco, sendo que os valores mais altos foram encontrados em madeiras e cascas das árvores mais velhas na posição da base. As madeiras e as cascas de *Eucalyptus* apresentaram maior teor de extrativos que as madeiras de *Corymbia*, e que os resultados utilizando os dois métodos de extração são diferentes, devendo ser explicitados nas metodologias de avaliação para futuras comparações.

Palavras-chave: Metodologia, idades, posição do tronco.

1137. Wood and bark extractives of *Eucalyptus* and *Corymbia* using different extraction methods

Abstract: Accurate determination of wood extractive content is essential for quality control and is influenced by the quantification methodology employed. Thus, the objective of this study was to determine the acetone-soluble extractive content in the wood and bark of *Eucalyptus* and *Corymbia* clones aged 3, 7, and 9 years, using both the "sawdust" and "flask" methods. Bark and wood samples from the base, middle, and top sections of the trees were subjected to Soxhlet extraction in accordance with the TAPPI T 204 cm-17 standard. The results showed that bark exhibited higher extractive content than wood; age and stem position also influenced extractive content, with higher levels found in the wood and bark of older trees and in samples taken from the base. *Eucalyptus* wood and bark showed higher extractive content than *Corymbia* wood, and the results obtained using the

two extraction methods differed, indicating that the specific method used must be clearly stated in evaluation protocols to allow for future comparisons.

Keywords: Methodology; age; trunk position.

1. Introdução

O setor florestal brasileiro ocupa posição de destaque mundial devido à elevada produtividade de cultivos florestais. Em 2025, a área destinada ao cultivo de árvores para fins industriais alcançou 10,5 milhões de hectares, sendo o gênero *Eucalyptus* responsável por aproximadamente 8,1 milhões de hectares (IBÁ, 2025). O gênero *Corymbia* ainda é pouco cultivado, mas tem despertado crescente interesse em programas de melhoramento genético devido ao seu elevado potencial produtivo, qualidade da madeira e adaptação a diferentes condições edafoclimáticas (Reis et al., 2014).

A composição química da madeira é um importante parâmetro de avaliação da qualidade e exerce influência direta sobre seu desempenho tecnológico e industrial. Dentre seus constituintes, os extrativos correspondem a compostos de baixo peso molecular que são externos a parede celular e podem ser removidos por solventes orgânicos (Wastowski, 2018). Sob o ponto de vista industrial, os extrativos podem interferir significativamente nos processos de polpação da madeira, influenciando no rendimento, no consumo dos reagentes e na qualidade do produto final (Lehr et al., 2021).

A distribuição dos extrativos na madeira não é homogênea ao longo da árvore, variando tanto no sentido radial quanto longitudinal. Lima et al. (1997), estudando *Eucalyptus*

microcorys e *Eucalyptus pilularis*, verificaram aumento do teor de substâncias solúveis em água quente e fria da medula em direção ao cerne periférico, com menores valores no alburno, comportamento observado em praticamente todas as alturas avaliadas. Da mesma forma, Andrade et al. (2010), ao avaliarem sete espécies e três clones de eucalipto, observaram que a casca apresenta, de modo geral, maiores teores de extrativos totais e menores teores de holocelulose quando comparada à madeira.

A extração desses compostos da madeira depende da metodologia empregada para sua quantificação. Diferentes solventes apresentam seletividade distinta em relação aos compostos extraídos (TAPPI 204 cm-17, 2017), enquanto os métodos de pesagem (serragem ou balão) podem influenciar a precisão, a rapidez e a aplicabilidade das análises. Dessa forma, a comparação entre diferentes metodologias de extração e de quantificação torna-se relevante para a obtenção de resultados confiáveis e para a padronização das análises.

Nesse contexto, o presente trabalho teve como objetivo determinar o teor de extrativos da madeira e da casca de clones de *Eucalyptus* e *Corymbia* utilizando diferentes métodos de pesagem, bem como avaliar a correlação entre eles.

2. Material e métodos

2.1 Local de estudo e materiais utilizados

Foram utilizadas amostras de madeira e casca dos gêneros *Eucalyptus* e *Corymbia*, provenientes de plantios comerciais localizados no Litoral Norte da Bahia. O material consistiu em 5 árvores de clones nas idades de 3 e 7 anos para *Eucalyptus* (E3 e E7) e 3, 7 e 9 anos para *Corymbia* (C3, C7 e C9), totalizando 25 árvores das quais foram coletados toretes em três posições longitudinais distintas: base, meio e topo. Todo o processamento e as análises laboratoriais foram realizadas no Laboratório de Tecnologia de Produtos Florestais (*WoodTech*) da Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia (UESB).

Para o preparo do material, os toretes foram seccionados em discos e reduzidos manualmente a cavacos. A serragem foi obtida através de moagem em moinho de facas do tipo Willey e classificada em peneiras de 40-60 mesh, utilizando-se a fração retida na peneira de 60 mesh, conforme norma TAPPI T 257 cm-02 (TAPPI, 2012).

2.2 Determinação do teor de extrativos

A determinação do teor de extrativos foi realizada, conforme TAPPI T 204 cm-17 (2017). Assim, foram pesadas aproximadamente 2,0000 g de serragem seca da fração selecionado em balança analítica. Após isso, as amostras foram submetidas à extração em tipo Soxhlet durante cinco horas, utilizando-se 150 mL de acetona como solvente extrator.

O teor de extrativos foi determinado por dois métodos gravimétricos, sendo o método do balão e o da serragem. Pelo método do balão, o teor de extrativos foi obtido pela quantificação da massa de extrativos depositada no balão após a evaporação do solvente. Já pelo método da serragem, o teor de extrativos foi calculado com base na diferença entre a massa seca das amostras antes e após o processo de extração, representando a quantidade de compostos removidos durante o processo de extração.

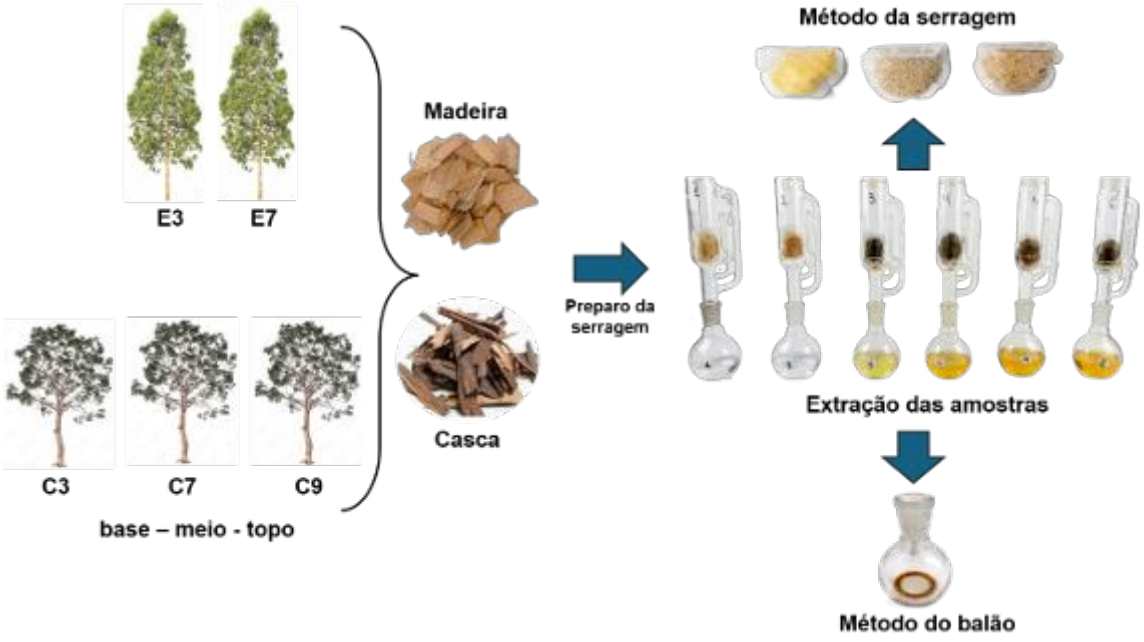


Figura 1 - Determinação do teor de extrativos da madeira e da casca de *Eucalyptus* e *Corymbia* em diferentes idades e posições, pelo método do balão e da serragem.

2.3 Análise estatística dos dados

Os dados referentes ao teor de extrativos dos cinco materiais combinando clone-idade (E3, E7, C3, C7 e C9) nas três posições da árvore (base, meio e topo), foram submetidos à análise estatística (casca e madeira). Foi realizado o teste F para comparação do teor de extrativos entre os diferentes métodos de pesagem (serragem e balão) com nível de significância de 5% ($p \leq 0,05$). Por outro lado, foi feito o teste Tukey para comparação

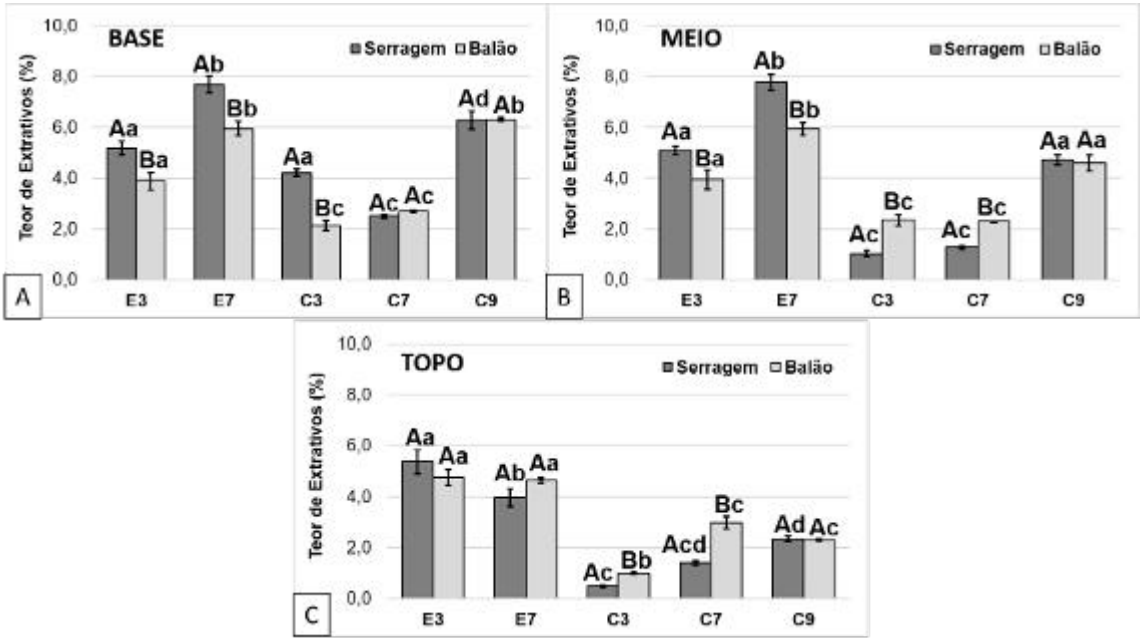
do mesmo método de pesagem entre os diferentes materiais, com nível de significância de 5% ($p \leq 0,05$).

Posteriormente, foi realizado uma correlação entre o teor de extrativos obtido pelo método do balão, com o método da serragem, sendo considerado os dois gêneros juntos (*Eucalyptus* e *Corymbia*) e também sendo avaliado uma correlação individual para cada gênero. Essas correlações foram realizadas tanto para o teor de extrativos da casca, quanto para madeira.

3. Resultados e discussão

a. O teor de extrativos da casca de *Eucalyptus* foi superior e estatisticamente diferente pelo método da serragem ao 3 e 7 anos quando comparado ao método do balão, exceto no topo, onde os métodos foram estatisticamente iguais. Por outro lado, em *Corymbia* os métodos de pesagem se mostraram distintos e sem um padrão definido, variando de acordo a idade e a posição na árvore (Figura 2).

b.



c. Letra maiúsculas idênticas possuem igualdade estatística pelos diferentes métodos de pesagem e letras minúsculas idênticas possuem igualdade estatística pelo mesmo método de pesagem, através do teste Tukey com nível de significância de 5% ($p \leq 0,05$).

d.

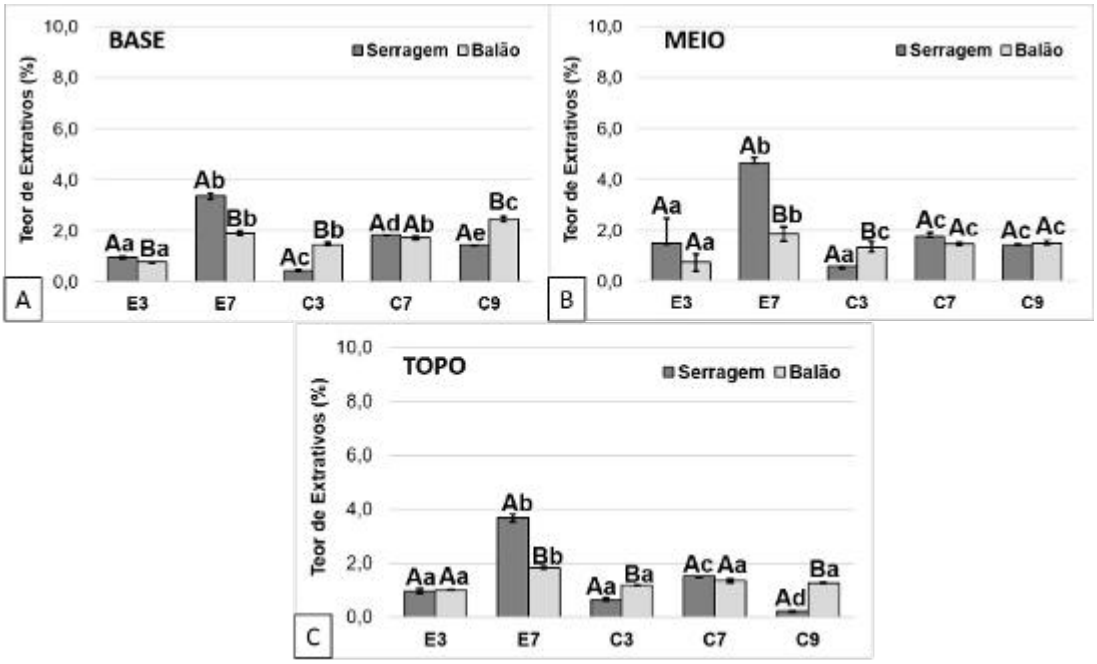
e. **Figura 2** – Determinação do teor de extrativos da casca de *Eucalyptus* (E3 e E7) e *Corymbia* (C3, C7 e C9) na base (A), no meio (B) e topo (C).

f.

g. O teor de extrativos obtido para madeira foi inferior ao encontrado na casca em todas as condições (Figura 3). Esse resultado já era esperado devido à composição anatômica e química distinta da casca, que concentra maior proporção de compostos extraíveis e material inorgânico em comparação ao lenho. Andrade et al. (2010) ao avaliarem sete espécies e três clones de eucalipto mostraram que a casca apresenta consistentemente maior teor de extrativos totais que a madeira.

h. Os diferentes métodos apresentaram resultados distintos, e o maior teor de extrativos encontrado foi para *Eucalyptus* aos 7 anos pelo método da serragem em todas as posições, sendo de 3,4 % (base), 4,7 % (meio) e 3,7 % (topo). Por outro lado, o menor de extrativos observado foi no topo de *Corymbia* aos 9 anos (0,2 %), conforme Figura 3C, o que indica novamente a necessidade de explicitar o método durante a análise para comparações futuras.

i.



j.

k. Letra maiúsculas idênticas possuem igualdade estatística pelos diferentes métodos de pesagem e letras minúsculas idênticas possuem igualdade estatística pelo mesmo método de pesagem, através do teste Tukey com nível de significância de 5% ($p \leq 0,05$).

l.

m. **Figura 3** – Determinação do teor de extrativos da madeira de *Eucalyptus* (E3 e E7) e *Corymbia* (C3, C7 e C9) na base (A), no meio (B) e topo (C).

n.

o. Não foi observado um padrão definido para a madeira de acordo à posição na árvore, mas as madeiras de *Eucalyptus* de maior idade apresentaram maiores teores de extrativos. Nesse sentido, é de fundamental importância que os métodos de pesagem sejam considerados separadamente, não sendo recomendada a comparação direta entre eles para determinação do teor de extrativos.

p. A norma TAPPI T 204 cm-17 (2017) recomenda que a determinação do teor de extrativos seja realizada pelo método do balão. Entretanto, o método da serragem apresenta como principal vantagem a maior capacidade operacional, permitindo maior número de repetições por análise. Considerando a utilização de seis balões simultaneamente, é realizado doze repetições pelo método da serragem, ou seja, o método se torna potencialmente mais atrativo para análises de rotina, devido a maior capacidade de realização de análises.

q. Quando os teores de extrativos da casca obtidos pelos diferentes métodos de extração dos gêneros *Corymbia* e *Eucalyptus* foram analisados em conjunto, foi obtida uma correlação R^2 = 0,7976 e um coeficiente angular de 1,30 (Figura 4A). Quando avaliados separadamente, houve uma redução na correlação de ambos os gêneros (*Eucalyptus* R^2 = 0,6970 e *Corymbia* R^2 = 0,7011) e pouca mudança nos coeficientes angulares (Figura 4B).

r. Isso indica que apesar dos resultados apresentados pelos diferentes métodos de extração (serragem x balão) não serem similares, existe uma relação que pode auxiliar na comparação de resultados.

s.

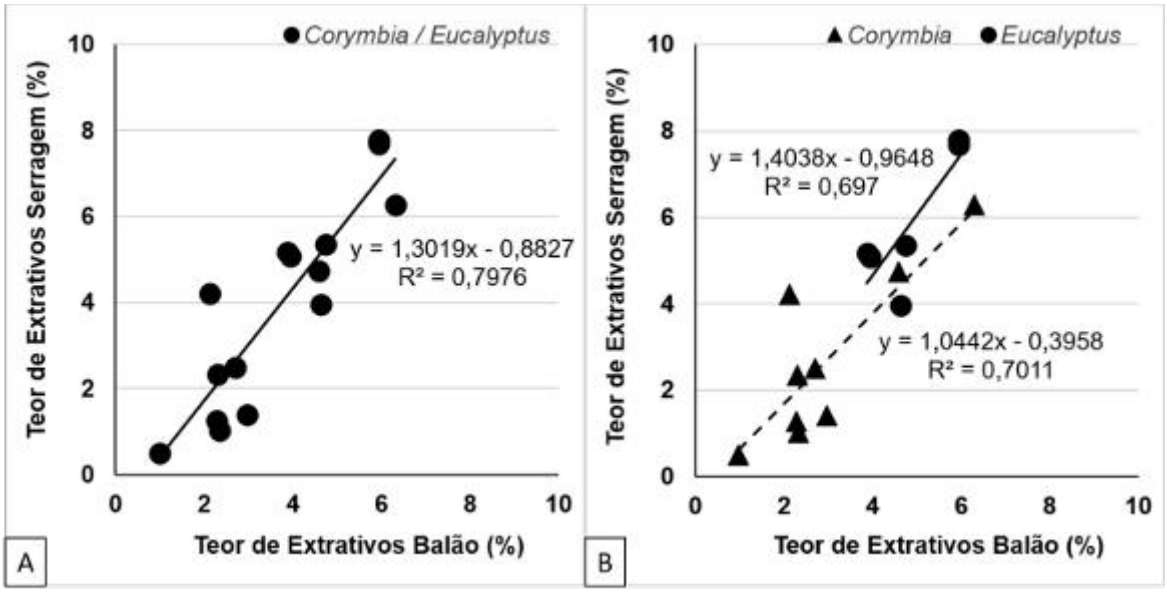


Figura 4 – Correlação entre os teores de extrativos da casca de *Corymbia* e *Eucalyptus* obtidos pelo método do balão e da serragem: (A) correlação em conjunto dos gêneros (B) correlação individual de cada gênero.

t.

Por outro lado, na avaliação conjunta dos teores de extrativos obtidos pelos diferentes métodos de extração dos gêneros *Corymbia* e *Eucalyptus*, o coeficiente de determinação foi R^2 = 0,252 (Figura 5A) e coeficiente angular de 1,4. A correlação observada no teor de extrativos da madeira pelos diferentes métodos foi considerada muito baixa, mostrando uma fraca associação entre as metodologias para madeira quando as espécies são analisadas em conjunto.

Na avaliação da correlação individual, *Eucalyptus* apresentou um R^2 = 0,8469 e *Corymbia* = 0,207 (Figura 5B). Nesse sentido, para o teor de extrativos da madeira, é recomendado que a correlação dos diferentes métodos de determinação seja realizada por gênero, e mais estudos precisam ser realizados para melhorar os ajustes entre os métodos.

u.

v.

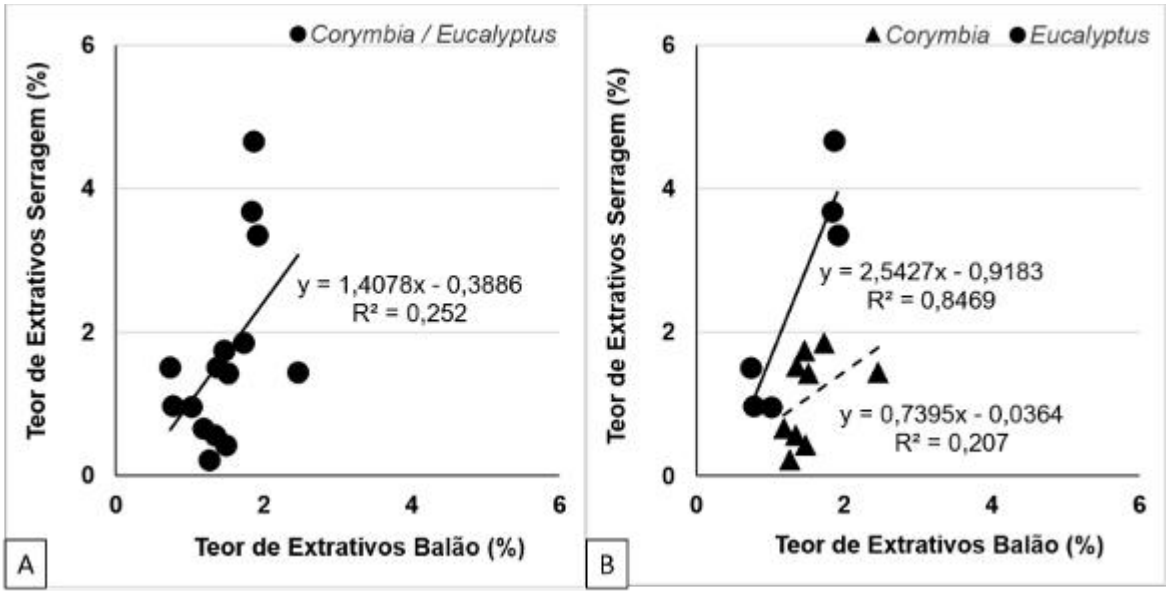


Figura 5 – Correlação entre os teores de extrativos da madeira de *Corymbia* e *Eucalyptus* obtidos pelo método do balão e da serragem: (A) correlação em conjunto dos gêneros (B) correlação individual de cada gênero.

4. Conclusões

Os teores de extrativos tanto na casca quanto na madeira variam de acordo ao gênero, idade, posição na árvore e método de pesagem. Assim, não é recomendada a comparação direta entre diferentes métodos de determinação, balão e serragem.

A correlação dos métodos de pesagem se mostrou elevada para casca de *Corymbia* e *Eucalyptus* em conjunto e para madeira de *Eucalyptus* separadamente. É recomendado mais estudos para ampliar e reforçar essa correlação presente entre os métodos de determinação do teor de extrativos.

5. Agradecimentos

A Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia (UESB) pela estrutura. Ao Laboratório de Tecnologia de Produtos Florestais (WoodTech) e a FERBASA pela concessão dos equipamentos e materiais necessários para o desenvolvimento da pesquisa.

6. Referências bibliográficas

Andrade, M. C. N., Minhoni, M. T. A., Sansígolo, C. A., & Zied, D. C. (2010). Análise química da madeira e casca de diferentes tipos de eucalipto antes e durante o cultivo de shiitake em toras. Revista Árvore, 34(1), 165–175. https://doi.org/10.1590/S0100-67622010000100018

Indústria Brasileira de Árvores. (2025). Relatório IBÁ 2025 ano base 2024. https://iba.org/wp-content/uploads/2025/10/IBA_relatorio_digital_POR.pdf

Lehr, M., Miltner, M., & Friedl, A. (2021). Removal of wood extractives as pulp (pre-)treatment: A technological review. SN Applied Sciences, 3, 886. https://doi.org/10.1007/s42452-021-04873-1

Lima, T. G., Della Lucia, R. M., & Pimenta, A. S. (1997). Variabilidade dos teores de extrativos solúveis em água quente e em água fria das madeiras de Eucalyptus microcorys e de Eucalyptus pilularis. Floresta e Ambiente, 4, 61–67.

Reis, C. A. F., Assis, T. F., Santos, A. M., & Paludzyszyn Filho, E. (2014). Corymbia torelliana: Estado da arte de pesquisas no Brasil (Embrapa Florestas, Documentos, 261). Embrapa Florestas.

Technical Association of the Pulp and Paper Industry. (2012). TAPPI T 257 cm-02: Sampling and preparing wood for analysis.

Technical Association of the Pulp and Paper Industry. (2017). TAPPI T 204 cm-17: Solvent extractives of wood and pulp.

Wastowski, A. D. (2018). Química da madeira. Editora Interciência.

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Fibras, Densidade e Retratibilidade da Madeira de *Hymenaea courbaril* L. em Plantio na Amazônia Central

Claudene Menezes Atayde Calderon[1]; Marlene Freitas da Silva[2] (*in memoriam*); Rafael de Azevedo Calderon[1]

[1] Serviço Florestal Brasileiro, Laboratório de Produtos Florestais-SFB/LPF
[2] Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia-INPA

Resumo: O cultivo de espécies nativas, como o jatobá (*Hymenaea courbaril* L.), constitui alternativa silvicultural à exploração seletiva na Amazônia. Este estudo avaliou as dimensões das fibras, a densidade básica e a retratibilidade da madeira de árvores com sete anos, cultivadas na Embrapa Amazônia Ocidental, em Manaus-AM, considerando as variações radial e axial. Foram amostradas três árvores, com retirada de discos na altura do DAP e no topo do fuste comercial. As fibras foram analisadas em material dissociado, enquanto as propriedades físicas foram determinadas por métodos gravimétricos e dimensionais. As fibras apresentaram comprimento médio de 1,27 mm e espessura média da parede de 4,61 µm. A densidade básica média foi de 0,70 g/cm³, com valores superiores no DAP. As retrações tangencial, radial e volumétrica foram de 9,67%, 3,62% e 14,42%, respectivamente. Não houve diferenças significativas entre as posições radiais, enquanto a densidade básica e as retrações apresentaram variação axial significativa. Os resultados evidenciam a predominância de madeira juvenil e indicam cautela em aplicações que demandem elevada estabilidade dimensional. A indicação para usos estruturais requer ensaios mecânicos complementares.
Palavras-chave: Jatobá; Anatomia da madeira; Silvicultura.

Fibers, Density and Shrinkage of Juvenile *Hymenaea courbaril* L. Wood from a Plantation in Central Amazon

Abstract: The cultivation of native species, such as jatobá (*Hymenaea courbaril* L.), represents a silvicultural alternative to selective logging in the Amazon. This study evaluated fiber dimensions, basic density, and wood shrinkage in seven-year-old trees grown at Embrapa Western Amazon, Manaus, Brazil, considering radial and axial variation. Three trees were sampled, and discs were collected at breast height and at the top of the commercial stem. Fibers were analyzed in macerated material, whereas physical properties were determined using gravimetric and dimensional methods. Fibers had a mean length of 1.27 mm and a mean wall thickness of 4.61 µm. Mean basic density was 0.70 g/cm³, with higher values at breast height. Tangential, radial, and volumetric shrinkage were 9.67%, 3.62%, and 14.42%, respectively. No significant differences were observed among radial positions, whereas physical properties showed significant axial variation. The results indicate the predominance of juvenile wood and suggest caution in applications requiring high dimensional stability. The suitability for structural uses requires complementary mechanical testing.
Keywords: Jatobá; Wood Anatomy; Silviculture.

1. Introdução

A Bacia Amazônica abriga uma das maiores reservas de recursos florestais do planeta, com um vasto potencial madeireiro historicamente explorado de maneira seletiva e extrativista. Esse modelo de exploração focado em poucas espécies de elevado valor comercial tem contribuído para redução dos estoques de importantes essências florestais no mercado madeireiro (Richardson & Peres, 2016; Castro et al., 2021).

Entre as espécies que sofrem forte pressão comercial destaca-se o jatobá (*Hymenaea courbaril* L.), pertencente à família Fabaceae, cuja madeira possui alta densidade e resistência e é amplamente valorizada para diferentes aplicações, incluindo mobiliário e construção civil, características que a destacam entre as espécies mais exploradas na Amazônia (Andrade et al., 2019; Moreira et al., 2022).

Diante da pressão sobre os estoques naturais de espécies madeireiras de elevado valor, o cultivo dessas espécies constitui-se como uma das alternativas mais viáveis para ampliar o suprimento contínuo da matéria-prima e reduzir a pressão sobre as florestas naturais (Pirard et al., 2016). No entanto, as condições de cultivo, ambiente e manejo, impõem desafios tecnológicos, visto que podem modificar o ritmo de crescimento das árvores e, consequentemente, a qualidade da madeira.

Neste contexto, as variações nas dimensões dos elementos xilemáticos, com destaque para as fibras, podem interferir no aproveitamento tecnológico e industrial da madeira, afetando ainda as propriedades físicas e mecânicas deste material. A avaliação dessas características estruturais ao longo do fuste da árvore, tanto no sentido radial (medula-casca) quanto no axial (base-topo), constitui importante subsídio para a caracterização tecnológica e para a seleção de matéria-prima com características ideais para determinado uso (Nezu et al., 2022).

Dentre os parâmetros físicos empregados na avaliação tecnológica, a densidade básica destaca-se como um importante indicador de qualidade, apresentando relação com diversas propriedades mecânicas e com a aptidão para diferentes usos. Associada à densidade, a retratibilidade (decorrente da natureza higroscópica da madeira) é uma característica importante para indicar a estabilidade dimensional, sendo afetada tanto pela idade da árvore quanto da posição da qual foi extraída a amostra. Em árvores jovens, as alterações estruturais e físicas são mais acentuadas devido à predominância do lenho juvenil, caracterizado por fibras mais curtas, paredes celulares delgadas e maior instabilidade dimensional (Panshin & De Zeeuw, 1980).

Considerando a necessidade de ampliar o conhecimento sobre as características anatômicas e tecnológicas de espécies florestais nativas submetidas ao regime silvicultural, este trabalho teve por objetivo determinar as características anatômicas microscópicas das fibras, a

densidade básica e a retratibilidade da madeira de *H. courbaril* L. aos 7 anos de idade em plantio na Amazônia Central, avaliando as propriedades nas direções axial e radial.

2. Material e métodos

2.1 Local de coleta e material de estudo

O material utilizado neste estudo foi coletado na área experimental da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA – Amazônia Ocidental), localizada no km 29 da rodovia AM-010, no município de Manaus-AM (3º8’ S e 59º52’ W), a uma altitude de 50 m acima do nível do mar. O clima local é classificado como do tipo Afi pelo sistema de Köppen (Tropical Chuvoso), apresentando temperatura média anual de 25,8 ºC, precipitação pluviométrica média de 2.529 mm e umidade relativa do ar em torno de 86 % (Embrapa, 1998).

O experimento foi implantado em janeiro de 1992, a pleno sol, sob espaçamento de 3 m x 3 m, contendo parcelas com 25 indivíduos por espécie. Para a realização dos ensaios tecnológicos, foram selecionadas três árvores de *H. courbaril* aos sete anos de idade, apresentando altura total média de 14 m, 6 m de fuste comercial e 19 cm de diâmetro à altura do peito (DAP), variando entre 16 cm e 22 cm. Foram retirados discos com espessura aproximada de 5 cm em duas posições axiais distintas: na altura do DAP (1,30 m do solo) e na altura correspondente ao topo do fuste comercial. De cada disco, foram confeccionados corpos de prova sequenciais no sentido radial, nas posições medula, 50% do raio e casca, cujas dimensões nominais seguiram as recomendações técnicas da norma NBR 6230 da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT, 1980).

2.2 Análise das fibras

Para cada amostra foi realizada a caracterização dimensional das fibras pelo processo de maceração, que consistiu na dissociação dos elementos anatômicos celulares em solução macerante composta por peróxido de hidrogênio e ácido acético glacial na proporção de 1:1, mantida em estufa regulada a 60 ºC por um período de três horas. Foi preparada uma lâmina por amostra, procedendo-se à mensuração de 25 fibras por lâmina utilizando ocular graduada acoplada a um microscópio óptico Kyowa Optical. Foram determinadas as variáveis de comprimento total, largura total, diâmetro do lúmen e espessura da parede celular das fibras, seguindo a norma da COPANT (1973).

2.3. Determinação da densidade básica

A determinação da densidade básica (DB) foi realizada pelo método gravimétrico, conforme procedimento descrito por Trugilho et al. (1990), utilizando balança analítica com

precisão de 0,002 g. Os corpos de prova foram submetidos à saturação em água até atingir peso constante para a obtenção do volume verde (Vv) pelo princípio de deslocamento de água. Em seguida, as amostras foram submetidas à secagem em estufa a 103 ± 2ºC até atingirem massa constante para a determinação do peso seco (Ps), utilizando-se a seguinte equação:

$$DB = \frac{Ps}{Vv}\, g/cm^3$$

2.4 Determinação da retratibilidade

A avaliação da retratibilidade da madeira compreendeu a determinação das retrações lineares (tangencial, radial e axial) e da retração volumétrica total. Com o auxílio de um micrômetro com precisão de 0,01 mm, foram realizadas medições nos três eixos da madeira nas condições verde (Dv) e completamente seca (Ds) em estufa a 103±2ºC. As retrações lineares (Rx) e volumétrica (Rv) foram calculadas conforme as seguintes equações:

$$R_x = \frac{D_v - D_s}{D_v}\, x\, 100$$

$$R_v = \frac{V_v - V_s}{V_v}\, x\, 100$$

2.5 Análise dos dados

A análise estatística dos dados consistiu no cálculo dos valores médios, desvios-padrão e coeficientes de variação de cada propriedade investigada. Para avaliar a variação radial foi realizada análise de variância, seguida do teste de Tukey quando detectadas diferenças significativas, ao nível de 1% de significância. Para comparar os resultados obtidos no DAP e no topo do fuste comercial, aplicou-se o teste t de Student para amostras pareadas, também ao nível de 1% de significância. A variabilidade entre os indivíduos foi avaliada por análise de variância, utilizando-se o teste F ao nível de 5% de significância, seguida do teste de Tukey quando constatadas diferenças significativas.

3. Resultados e discussão

3.1 Características anatômicas e dimensões das fibras

Os valores médios das dimensões das fibras de *H. courbaril* aos 7 anos de idade estão apresentados na Tabela 1. De acordo com os critérios de classificação da COPANT (1973), as

fibras foram classificadas como curtas, com comprimento médio de 1,27 mm, e paredes celulares delgadas a espessas, com espessura média de 4,61 µm.

Tabela 1 – Médias, desvios-padrão e coeficientes de variação das dimensões das fibras de três árvores de *H. courbaril* aos 7 anos de idade

Árvores	CT (mm)		LG (µm)		DL (µm)		EP (µm)	
	$\overline{X}$	CV (%)	$\overline{X}$	CV (%)	$\overline{X}$	CV (%)	$\overline{X}$	CV (%)
1	1,25 ± 0,02	1,4	16,64 ± 0,30	1,8	7,50 ± 0,27	3,5	4,57 ± 0,08	1,7
2	1,32 ± 0,05	3,8	16,68 ± 0,37	2,2	7,25 ± 0,34	4,6	4,72 ± 0,15	3,1
3	1,23 ± 0,03	2,2	16,46 ± 0,67	4,1	7,27 ± 0,57	7,9	4,55 ± 0,06	1,4
Média	**1,27**		**16,60**		**7,34**		**4,61**	

CT= comprimento total da fibra; LG= largura da fibra; DL= diâmetro do lúmen da fibra; EP= espessura da parede da fibra; CV= Coeficiente de variação

Os valores obtidos são compatíveis com a reduzida idade cambial das árvores avaliadas, uma vez que a madeira juvenil tende a apresentar fibras mais curtas e paredes menos espessas, sendo essas características modificadas com a maturação cambial (Savero et al., 2024). Moreira et al. (2022), ao compararem a madeira de galhos e troncos de árvores adultas de *H. courbaril* provenientes da floresta amazônica, observaram menores dimensões das fibras nos galhos. Embora os materiais não sejam diretamente comparáveis, os resultados reforçam a influência da idade cambial e da posição de amostragem sobre a biometria das fibras.

A análise de variância não revelou diferenças significativas entre as posições radiais para nenhuma das dimensões avaliadas, tanto no DAP quanto no topo do fuste comercial ($p > 0,01$). Embora não tenham sido detectadas diferenças estatisticamente significativas entre as posições radiais, observou-se, em termos absolutos, tendência de aumento do comprimento das fibras e da espessura da parede, da medula em direção à casca. O aumento do comprimento das fibras está relacionado à diferenciação e ao alongamento celular, enquanto o espessamento da parede resulta da deposição progressiva da parede secundária (Déjardin et al., 2010). Na variação axial, do DAP para o topo do fuste, o teste t não detectou diferenças estatísticas significativas para as dimensões das fibras. Contudo, em termos absolutos, o

comprimento da fibra tendeu a ser ligeiramente menor no DAP em comparação ao topo. Esse padrão corrobora o modelo discutido por Castro e Silva (1992), no qual os elementos anatômicos axiais tendem a aumentar da base para regiões intermediárias do fuste e, posteriormente, diminuir em direção ao topo.

3.2 Densidade básica e retração da madeira

A densidade básica média da madeira de *H. courbaril* foi de 0,70 g/cm³, o que permite classificar o material como moderadamente pesado. Esse valor foi semelhante ao registrado por Silva (2016), para árvores da mesma espécie cultivadas na mesma área experimental, porém em idade mais avançada. A autora também menciona valores entre 0,73 e 0,79 g/cm³ encontrados em outros estudos com a espécie ou com o gênero *Hymenaea*. A proximidade entre os resultados indica que, mesmo aos sete anos, a madeira analisada já apresentava densidade relativamente elevada. Contudo, a variação axial observada demonstra que essa propriedade ainda não se encontrava uniformemente distribuída ao longo do fuste. A distribuição dos valores médios por indivíduo e as propriedades higroscópicas de retração linear e volumétrica estão na Tabela 2.

Tabela 2 – Médias, desvios-padrão e coeficientes de variação da densidade básica e das retrações lineares e volumétrica da madeira de *H. courbaril* aos 7 anos de idade

Árvores	DB (g/cm³)		Rt (%)		Rr (%)		Rv (%)	
	$\overline{X}$	CV (%)	$\overline{X}$	CV (%)	$\overline{X}$	CV (%)	$\overline{X}$	CV (%)
1	0,71 ± 0,02	2,7	9,31 ± 0,67	7,2	3,45 ± 0,23	7,4	13,80 ± 1,18	8,5
2	0,71 ± 0,03	4,1	10,61 ± 1,37	12,9	4,24 ± 0,38	9,0	16,18 ± 1,80	11,1
3	0,67 ± 0,04	6,3	9,09 ± 0,85	9,3	3,16 ± 0,37	11,7	13,28 ± 1,44	10,8
Média	**0,70**		**9,67**		**3,62**		**14,42**	

DB= densidade básica Rr= retração radial CV= Coeficiente de variação
Rt= retração tangencial Rv= retração volumétrica

Similarmente aos resultados anatômicos, a densidade básica e os parâmetros de retração não apresentaram variação significativa na direção radial (medula-casca) ($p > 0,01$). Por outro lado, verificou-se variação axial significativa entre o DAP e o topo do fuste comercial ($p < 0,01$). Os maiores valores de densidade básica foram registrados na altura do

DAP. A redução da densidade em direção ao topo do fuste pode estar associada às diferenças de idade cambial e à maior proporção de madeira juvenil próxima à copa. Embora não tenham sido detectadas diferenças significativas entre as posições radiais, observou-se, em termos absolutos, tendência de aumento do comprimento das fibras, da espessura da parede e da densidade básica da medula em direção à casca. Esse comportamento é compatível com o padrão de maturação radial da madeira, no qual a idade cambial exerce influência sobre as características anatômicas e a densidade do lenho (Panshin & De Zeeuw, 1980; Savero et al., 2024). A ausência de significância pode estar associada à reduzida idade das árvores e à pequena distância cambial entre as posições amostradas.

Os parâmetros higroscópicos médios de retração tangencial (9,67%), radial (3,62%) e volumétrica (14,42%) enquadram-se na categoria de retratibilidade média. Na variação axial, todas as retrações, excetuando a axial, apresentaram valores significativamente mais elevados na altura do DAP em comparação ao topo do fuste comercial. Moreira et al. (2022), ao compararem a madeira do tronco e dos galhos de árvores adultas de *H. courbaril*, observaram menores retrações tangencial, radial e volumétrica nos galhos, enquanto a retração axial foi superior nesse material. Embora os estudos tenham considerado diferentes posições de amostragem, os resultados reforçam a influência da posição na formação da madeira na árvore sobre seu comportamento dimensional.

Como a madeira à altura do DAP apresentou maior densidade e fibras com paredes celulares mais espessas, a maior proporção de parede celular pode contribuir para a maior retração observada nessa posição. Durante a dessorção, a remoção da água ligada aos constituintes da parede celular provoca alterações dimensionais, influenciadas pela organização da parede e pela orientação das microfibrilas da camada S2 (Hill et al., 2024). A ausência de cerne bem definido nas árvores aos sete anos, constituídas predominantemente por alburno funcional, reforça o caráter juvenil do lenho. Em conjunto, a predominância de madeira juvenil e as variações de densidade e estrutura celular observadas ao longo do fuste contribuem para a maior movimentação dimensional, indicando limitações para usos que demandem elevada estabilidade dimensional.

4. Conclusões

A madeira de plantio de *H. courbaril* aos 7 anos de idade não apresentou diferenças significativas em suas propriedades anatômicas, físicas e higroscópicas nas posições radiais analisadas. No sentido axial foram observadas diferenças significativas, com maiores valores de

densidade básica e retrações tangencial, radial e volumétrica na altura do DAP em comparação com o topo do fuste comercial. A tendência radial crescente observada, em termos absolutos, para o comprimento das fibras, a espessura da parede e a densidade básica é compatível com a predominância de madeira juvenil nessa idade. Embora a densidade básica média classifique o material como moderadamente pesado, a variação axial das propriedades e a elevada movimentação dimensional indicam cautela em aplicações que demandem maior estabilidade dimensional. A indicação da madeira para usos estruturais requer ensaios mecânicos complementares.

5. Agradecimentos

Os autores agradecem ao Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia (INPA) e à Embrapa Amazônia Ocidental pelo suporte institucional, pela disponibilização da área experimental e pela infraestrutura laboratorial utilizada na pesquisa, bem como ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela concessão da bolsa de estudos, e ao Serviço Florestal Brasileiro, por meio do Laboratório de Produtos Florestais (SFB/LPF), pelo apoio institucional à divulgação deste trabalho.

6. Referências bibliográficas

Andrade, V. H. F., Machado, S. A., Figueiredo Filho, A., Botosso, P. C., Miranda, B. P., & Schöngart, J. (2019). Growth models for two commercial tree species in upland forests of the Southern Brazilian Amazon. *Forest Ecology and Management*, 438, 215–223. https://doi.org/10.1016/j.foreco.2019.02.030

Associação Brasileira de Normas Técnicas. (1980). *NBR 6230: Ensaios físicos e mecânicos de madeiras.*

Castro, T. C., Carvalho, J. O. P., Schwartz, G., Silva, J. N. M., Ruschel, A. R., Freitas, L. J. M., Gomes, J. M., & Pinto, R. S. (2021). The continuous timber production over cutting cycles in the Brazilian Amazon depends on volumes of species not harvested in previous cuts. *Forest Ecology and Management*, 490, 119124. https://doi.org/10.1016/j.foreco.2021.119124

Castro e Silva, A. (1992). Variação dimensional dos elementos xilemáticos em duas espécies madeireiras da Amazônia. *Acta Amazonica*, 22(2), 261–273. https://doi.org/10.1590/1809-43921992222273

Comisión Panamericana de Normas Técnicas. (1973). *Madeiras: Descrição macroscópica, microscópica e geral da madeira* (COPANT 30:1-019).

Déjardin, A., Laurans, F., Arnaud, D., Breton, C., Pilate, G., & Leplé, J.-C. (2010). Wood formation in angiosperms. *Comptes Rendus Biologies*, 333(4), 325–334. https://doi.org/10.1016/j.crvi.2010.01.010

Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. (1998). *Boletim agrometeorológico*. Embrapa Amazônia Ocidental.

Hill, C., Altgen, M., Penttilä, P., & Rautkari, L. (2024). Review: Interaction of water vapour with wood and other hygro-responsive materials. *Journal of Materials Science*, 59, 7595–7635. https://doi.org/10.1007/s10853-024-09636-y

Moreira, L. S., Lima, J. T., Soares, B. C. D., & Moutinho, V. H. P. (2022). Wood quality of residual branches of *Hymenaea courbaril* L. from logging in the Amazon rainforest. *Holzforschung*, 77(1), 16–27. https://doi.org/10.1515/hf-2022-0084

Nezu, I., Ishiguri, F., Ohshima, J., & Yokota, S. (2022). Relationship between the xylem maturation process based on radial variations in wood properties and radial growth increments of stems in a fast-growing tree species, Liriodendron tulipifera. *Journal of Wood Science*, 68, 48. https://doi:10.1186/s10086-022-02057-y

Panshin, A. J., & De Zeeuw, C. (1980). *Textbook of wood technology: Structure, identification, properties, and uses of the commercial woods of the United States and Canada* (4th ed.). McGraw-Hill.

Pirard, R., Dal Secco, L., & Warman, R. (2016). Do timber plantations contribute to forest conservation? *Environmental Science & Policy*, 57, 122–130. https://doi:10.1016/j.envsci.2015.12.010

Richardson, V. A., & Peres, C. A. (2016). Temporal decay in timber species composition and value in Amazonian logging concessions. *PLOS ONE*, 11(7), e0159035. https://doi:10.1371/journal.pone.0159035

Savero, A. M., Kim, J.-H., Purusatama, B. D., Prasetia, D., Wahyudi, I., Iswanto, A. H., Lee, S.-H., & Kim, N.-H. (2024). Radial variation of wood anatomical characteristics and maturation ages of six Korean oak species. *Forests*, 15(3), 433. https://doi:10.3390/f15030433

Silva, J. T. (2016). *Volumetria, biomassa e qualidade da madeira de Hymenaea courbaril L. proveniente de plantios na Amazônia Central* [Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Amazonas].

Trugilho, P. F., Silva, D. A., Frazão, F. J. L., & Matos, J. L. M. (1990). Comparação de métodos de determinação da densidade básica da madeira. *Acta Amazonica*, 20(1), 307–319. https://doi.org/10.1590/1809-43921990201319

Fluorescência da lignina em madeira de *Eucalyptus urophylla* sob diferentes climas

Marcela Pires de Oliveira[1]; Tatiana de Fátima Martins Pires[1]; Flávio Rodrigues Lima[1]
Josy Tainara Silva Silva[1]; Renata Guilherme Cândido da Silva[2], Jordão Cabral Moulin [1]

1 Universidade Federal do Espírito Santo
2 Suzano S.A., Aracruz, ES

Resumo: As condições climáticas influenciam diretamente nos processos fisiológicos e estruturais das plantas, podendo modificar a composição química da parede celular das células da madeira. Entre essas modificações, destaca-se a lignificação, mecanismo associado à resistência mecânica e também à adaptação ao estresse ambiental. O presente estudo teve como objetivo avaliar a intensidade de fluorescência da lignina em diferentes regiões anatômicas da madeira do clone de *Eucalyptus urophylla* cultivado sob condições climáticas contrastantes. Foram analisadas árvores provenientes de plantios localizados em São Miguel Arcanjo, SP, Nova Viçosa, BA, e Açailândia, MA. Discos de madeira foram coletados na posição correspondente ao diâmetro à altura do peito para obtenção de lâminas histológicas. As seções transversais foram analisadas em microscopia de fluorescência, sendo a intensidade luminosa quantificada na parede celular das fibras, parede celular dos vasos e lamela média. O sítio do Maranhão apresentou os maiores valores de fluorescência nas três regiões anatômicas avaliadas, sugerindo maior lignificação relativa nesse ambiente. Os resultados indicam associação entre maior restrição hídrica e maior intensidade de fluorescência da lignina na madeira.

Palavras-chave: Lamela média; Estresse hídrico; Parede celular.

Lignin fluorescence in *Eucalyptus urophylla* wood under different climatic conditions

Abstract: Climatic conditions directly influence physiological and structural processes in plants and may alter the chemical composition of the wood cell wall. Among these modifications, lignification stands out as a mechanism associated with mechanical resistance and adaptation to environmental stress. The present study aimed to evaluate lignin fluorescence intensity in different anatomical regions of the wood of an *Eucalyptus urophylla* clone grown

under contrasting climatic conditions. Trees from plantations located in São Miguel Arcanjo, São Paulo; Nova Viçosa, Bahia; and Açailândia, Maranhão, Brazil, were analyzed. Wood discs were collected at breast height to obtain histological sections. Cross-sections were examined using fluorescence microscopy, and fluorescence intensity was quantified in the fiber cell wall, vessel cell wall, and middle lamella. The Maranhão site exhibited the highest fluorescence values in all three anatomical regions evaluated, suggesting greater relative lignification under conditions of greater water restriction. The results indicate an association between greater water restriction and increased lignin fluorescence intensity in wood.

Keywords: Middle lamella; Water stress; Cell wall.

1. Introdução

O gênero Eucalyptus apresenta elevada relevância para o setor florestal brasileiro devido ao rápido crescimento, ampla adaptação edafoclimática e elevada produtividade em diferentes sistemas de cultivo. Espécies desse gênero são amplamente utilizadas na produção de celulose, carvão vegetal, biomassa energética e madeira sólida, representando importante matéria-prima para diversos segmentos industriais e energéticos no Brasil.

As condições ambientais exercem influência direta sobre processos fisiológicos essenciais das plantas, incluindo absorção de água, transporte de nutrientes, fotossíntese, divisão celular e formação dos tecidos vegetais (Qaderi et al., 2019). Entre os fatores ambientais, o déficit hídrico destaca-se como uma das principais limitações ao crescimento vegetal, podendo provocar alterações fisiológicas, anatômicas e químicas na madeira.

As respostas adaptativas das plantas frente ao estresse ambiental envolvem mecanismos fisiológicos, anatômicos e moleculares capazes de minimizar danos celulares e garantir a manutenção das funções metabólicas (Malavasi et al., 2016). Nesse contexto, a lignificação da parede celular assume importante papel na resistência mecânica e na proteção contra condições ambientais adversas. A lignina é um polímero fenólico tridimensional presente principalmente nos tecidos vasculares, sendo responsável pela rigidez, impermeabilidade e sustentação estrutural das células vegetais (Fengel & Wegener, 1989). Além da função estrutural, a lignina está associada à proteção das plantas contra estresses abióticos, incluindo déficit hídrico, altas temperaturas e variações climáticas (Han et al., 2022).

Em condições de maior restrição hídrica, pode ocorrer aumento da deposição de lignina na parede celular como forma de reforço estrutural dos tecidos vegetais, reduzindo a

vulnerabilidade ao colapso hidráulico e aumentando a resistência mecânica da madeira (Hacke et al., 2001; Tyree & Zimmermann, 2002). Dessa forma, alterações na lignificação podem refletir respostas adaptativas relacionadas às condições ambientais de cultivo. Essas alterações podem ser investigadas por técnicas específicas, como a análise da lignina na parede celular por microscopia de fluorescência.

A microscopia de fluorescência tem sido amplamente utilizada na avaliação da lignificação em tecidos vegetais, uma vez que a lignina apresenta autofluorescência natural. Essa técnica permite avaliar a distribuição relativa da autofluorescência associada à lignificação em diferentes regiões anatômicas da parede celular, como a parede celular das fibras, a parede celular dos vasos e a lamela média (Donaldson, 2013). Entretanto, a intensidade do sinal fluorescente não representa necessariamente uma medida direta da quantidade de lignina, uma vez que também pode ser influenciada por sua composição e estrutura química e pelo ambiente molecular (Donaldson, 2013). Diante disso, o presente estudo teve como objetivo avaliar a intensidade de fluorescência da lignina em diferentes regiões anatômicas da madeira do clone de *Eucalyptus urophylla* cultivado sob diferentes condições climáticas, visando compreender a influência do ambiente sobre a lignificação da madeira.

2. Material e métodos

O estudo foi conduzido com amostras de madeira provenientes de uma rede experimental localizada em três sítios com condições climáticas distintas: São Miguel Arcanjo, no estado de São Paulo; Nova Viçosa, no estado da Bahia; e Açailândia, no estado do Maranhão (Tabela 1). Os sítios apresentam, respectivamente, clima Cfa, caracterizado como subtropical úmido com verão quente; clima Af, tropical úmido sem estação seca definida; e clima Aw, tropical com inverno seco, conforme a classificação climática de Köppen-Geiger para o Brasil (Alvares et al., 2013). A seleção de sítios com condições climáticas contrastantes permitiu avaliar a influência do ambiente sobre a intensidade de fluorescência da lignina na madeira do clone *Eucalyptus urophylla*.

Tabela 1 - Caracterização climática e silvicultural dos sítios experimentais utilizados para avaliação da fluorescência da lignina na madeira do clone de *Eucalyptus urophylla.*

Caracterização do sítio	São Miguel Arcanjo - SP	Nova Viçosa - BA	Açailândia - MA
Classificação climática	Cfa	Af	Aw

Idade na coleta (meses)	81	79	86
Espaçamento (m)	3 × 1,8	3 × 2,3	3,5 × 2,6
Altitude (m)	723	70	400
Latitude	-23.868	-17.952	-5.050
Longitude	-47.896	-39.647	-47.559

Clima de acordo com a classificação de Köppen-Geiger (Alvares et al., 2013): Cfa – clima subtropical úmido com verão quente; Af – clima tropical úmido ou subúmido sem estação seca; Aw – clima tropical com inverno seco.

Foi utilizado o clone da espécie *Eucalyptus urophylla*, sendo amostradas 15 árvores, com cinco indivíduos em cada um dos três sítios experimentais. Foram retirados discos de madeira na posição correspondente ao diâmetro à altura do peito (1,30 m de altura), com aproximadamente 2,5 cm de espessura. A partir dos discos, foram obtidos corpos de prova nas posições radiais correspondentes a 20% e 80% da distância entre a medula e a casca, representando as regiões interna e externa do lenho, respectivamente, com dimensões aproximadas de 1,0 × 1,5 × 2,0 cm, nas direções radial, tangencial e longitudinal, respectivamente. Esses corpos de prova foram utilizados para a confecção das lâminas histológicas.

As amostras foram submetidas ao processo de amolecimento em água fervente e posteriormente seccionadas em micrótomo de deslize, obtendo-se cortes transversais com espessura aproximada de 20 µm. Para a análise da lignina por fluorescência, os cortes foram submetidos à clarificação em solução de hipoclorito de sódio (NaClO) a 3,3% (v/v), em temperatura entre 30 e 40 °C, durante 3 minutos, seguida de três lavagens com água destilada. Em seguida, os cortes foram montados em lâminas utilizando glicerol como meio de montagem, sem ajuste de pH. As condições de preparo e montagem foram mantidas constantes para todas as amostras, a fim de minimizar possíveis variações na intensidade de autofluorescência relacionadas às condições do meio de montagem. Posteriormente, as lâminas foram analisadas em microscópio de fluorescência, utilizando excitação de 440–490 nm e emissão entre 490–565 nm (Silva et al., 2026). As imagens foram capturadas com objetiva de 50× (NA 0,75), sendo obtidas 20 fotomicrografias para cada posição radial do clone, salvas em formato TIFF. A intensidade de fluorescência foi quantificada no ImageJ-Fiji (Schindelin et al., 2012), com

remoção do fundo pela ferramenta Subtract Background, e expressa em unidades arbitrárias (UA). Para cada mensuração, delimitou-se manualmente uma área padronizada de 1,11 µm² na parede celular das fibras, parede celular dos vasos e lamela média (Silva et al., 2026). A normalidade foi avaliada pelo teste de Shapiro–Wilk ($p < 0,05$) e, quando o pressuposto de normalidade não foi atendido, as comparações entre os sítios foram realizadas pelo teste de Kruskal–Wallis, ao nível de 5% de significância.

2.1 Obtenção de dados para variáveis climáticas

Os dados de temperatura e precipitação referentes aos plantios de São Miguel Arcanjo (SP), Açailândia (MA) e Nova Viçosa (BA) foram obtidos por meio das estações meteorológicas da Suzano S.A. A evapotranspiração potencial (ETP) foi estimada pelo método proposto por Thornthwaite (1948). Para avaliar a relação entre a precipitação e a evapotranspiração potencial, foi calculado o Índice de Aridez Modificado (IAM), com base no índice de aridez proposto por Thornthwaite e Holzman (1941), considerando:

$$IAM = \left(\frac{P}{ETP}\right) - 1, \quad \text{quando } P < ETP$$

$$IAM = 1 - \left(\frac{ETP}{P}\right), \quad \text{quando } P \geq ETP$$

em que **P** corresponde à precipitação e **ETP** à evapotranspiração potencial. Os valores do IAM foram utilizados para caracterizar e comparar os ambientes quanto à disponibilidade hídrica, sendo que valores menores ou mais negativos indicam maior deficiência hídrica, enquanto valores mais elevados representam condições de maior disponibilidade hídrica.

3. Resultados e discussão

A intensidade de fluorescência da lignina apresentou variações entre os sítios avaliados e entre as diferentes regiões anatômicas da madeira do clone de Eucalyptus urophylla (Figura 1). De modo geral, observou-se maior intensidade de fluorescência nas amostras provenientes da região de clima Aw (MA), menores valores na região de clima Af (BA) e valores intermediários na região de clima Cfa (SP).

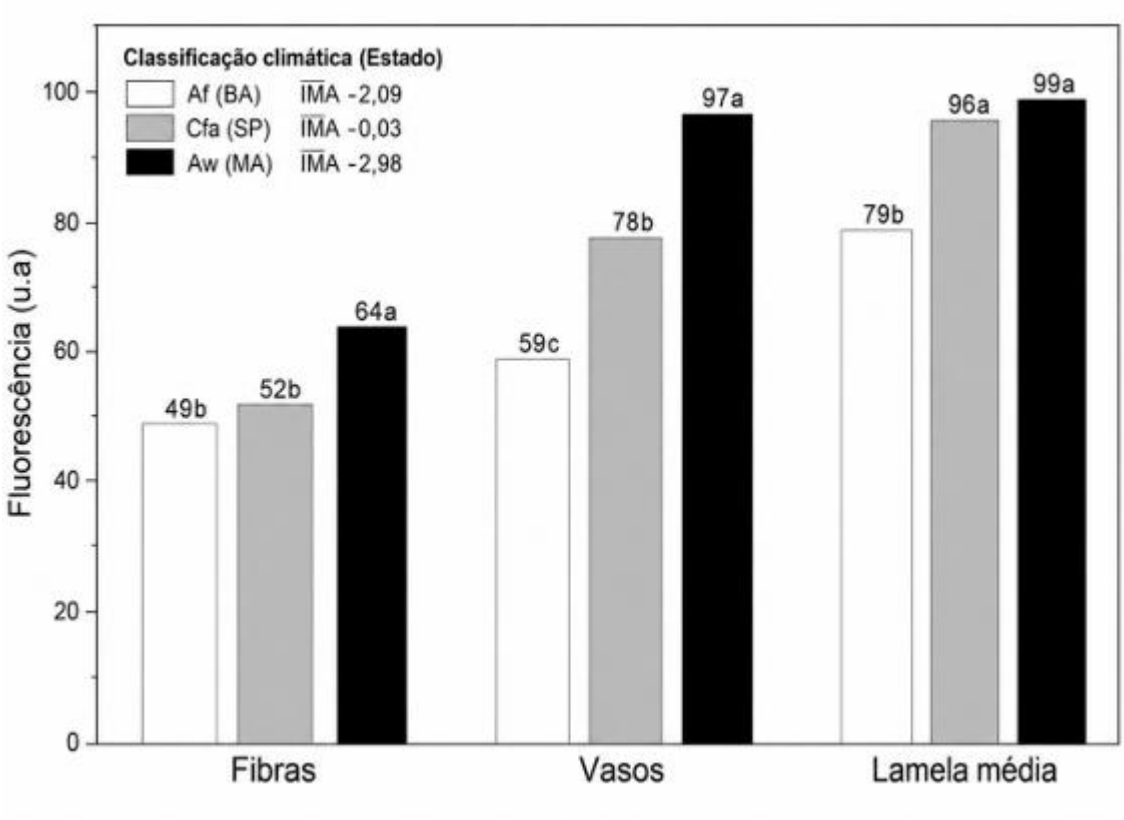


Figura 1. Intensidade de fluorescência da lignina nas fibras, vasos e lamela média da madeira do clone de *Eucalyptus urophylla* cultivado em São Miguel Arcanjo (SP), Nova Viçosa (BA) e Açailândia (MA), associada aos valores anuais do Índice de Aridez Modificado (IAM) de cada ambiente. Valores mais negativos de IAM indicam maior limitação climática de água, enquanto valores mais elevados representam condições relativamente mais úmidas. Médias seguidas pela mesma letra, entre os três locais de cultivo e para cada elemento celular, não diferem estatisticamente entre si.

Os valores de IAM diferenciaram os ambientes quanto à disponibilidade hídrica:

Os valores de IAM diferenciaram os ambientes quanto à disponibilidade hídrica: São Miguel Arcanjo (SP) apresentou IAM de -0,03, Nova Viçosa (BA) de -2,09 e Açailândia (MA) de -2,98. Assim, Açailândia apresentou a maior limitação hídrica entre os sítios avaliados, seguida por Nova Viçosa, enquanto São Miguel Arcanjo apresentou maior disponibilidade hídrica.

Açailândia possui clima Aw, com estação seca definida, de modo que a maior restrição hídrica e a sazonalidade da disponibilidade de água podem contribuir para respostas estruturais da madeira. Em condições de seca, o aumento da deposição de lignina pode contribuir para

maior resistência mecânica dos tecidos e menor vulnerabilidade do sistema condutor ao colapso hidráulico (Hacke et al., 2001; Tyree & Zimmermann, 2002). Resultados semelhantes foram observados por Moulin et al. (2024), que verificaram aumento da lignificação em madeira de *Eucalyptus urophylla* submetida à restrição hídrica.

Na parede celular das fibras, os ambientes Af (Nova Viçosa, BA) e Cfa (São Miguel Arcanjo, SP) apresentaram valores estatisticamente semelhantes, com médias de 49 e 52 UA, respectivamente, enquanto o ambiente Aw (Açailândia, MA) apresentou 64 UA. Nos vasos, os três ambientes diferiram entre si, com 59, 78 e 97 UA para Af, Cfa e Aw, respectivamente. Na lamela média, Af apresentou 79 UA e diferiu de Cfa e Aw, com 96 e 99 UA, respectivamente, que foram estatisticamente semelhantes. Ressalta-se que a intensidade de autofluorescência não representa diretamente a quantidade de lignina, pois o sinal também pode ser influenciado por sua composição e estrutura química e pelo ambiente molecular (Donaldson, 2013).

A lamela média apresentou os maiores valores absolutos de fluorescência independentemente do sítio avaliado. Esse resultado está relacionado à elevada concentração de lignina nessa região anatômica, responsável pela adesão entre células adjacentes e pela manutenção da integridade estrutural do lenho (Donaldson, 2001; Fengel & Wegener, 1989). A maior autofluorescência observada na lamela média corrobora estudos que descrevem essa região como naturalmente mais lignificada quando comparada às demais camadas da parede celular (Sjöström, 1993).

A parede celular dos vasos apresentou valores intermediários de fluorescência, enquanto as fibras apresentaram menores valores relativos, em comparação com a lamela média. Essa diferença pode estar associada às funções desempenhadas por cada tecido na madeira. Os vasos atuam diretamente na condução de água e podem demandar maior reforço estrutural em condições de deficiência hídrica, reduzindo riscos de cavitação e implosão do xilema sob tensão hídrica (Hacke et al., 2001; Tyree & Zimmermann, 2002).

Os resultados evidenciam que o clone responde às condições ambientais de cultivo; contudo, os resultados evidenciam que o clone responde às condições ambientais de cultivo, com maiores intensidades de fluorescência no ambiente de maior restrição hídrica.

4. Conclusões

A lamela média apresentou os maiores valores absolutos de fluorescência, seguida pela parede celular dos vasos e pela parede celular das fibras, evidenciando diferenças na intensidade do sinal entre os tecidos da madeira.

A intensidade de fluorescência da lignina na madeira do clone de *Eucalyptus urophylla* variou entre os sítios avaliados. O ambiente de clima Aw (Açailândia, MA) apresentou os maiores valores nas diferentes regiões anatômicas, sugerindo maior lignificação relativa nesse ambiente com estação seca definida e maior restrição hídrica.

Os resultados indicam que a maior restrição hídrica pode estar associada ao aumento da intensidade de fluorescência da lignina, embora outras características do ambiente de cultivo também possam contribuir para essa resposta.

1142. **Agradecimentos**

À Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação do Espírito Santo (FAPES) e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelo apoio financeiro e pela concessão de bolsas, e à Suzano S.A., pelo fornecimento do material genético.

6. Referências bibliográficas

Alvares, C. A., Stape, J. L., Sentelhas, P. C., Gonçalves, J. L. de M., & Sparovek, G. (2013). Köppen's climate classification map for Brazil. Meteorologische Zeitschrift, 22(6), 711–728. https://doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507

Donaldson, L. A. (2001). Lignification and lignin topochemistry—An ultrastructural view. Phytochemistry, 57, 859–873. https://doi.org/10.1016/S0031-9422(01)00049-8

Donaldson, L. A. (2013). Softwood and hardwood lignin fluorescence spectra of wood cell walls in different mounting media. IAWA Journal, 34, 3–19. https://doi.org/10.1163/22941932-00000002

Fengel, D., & Wegener, G. (1989). Wood: Chemistry, ultrastructure, reactions. Walter de Gruyter.

Hacke, U. G., Sperry, J. S., Pockman, W. T., Davis, S. D., & McCulloh, K. A. (2001). Trends in wood density and structure are linked to prevention of xylem implosion by negative pressure. Oecologia, 126, 457–461. https://doi.org/10.1007/s004420100628

Han, X., Zhao, Y., Chen, Y., Xu, J., Jiang, C., Wang, X., Zhuo, R., Lu, M. Z., & Zhang, J. (2022). Lignin biosynthesis and accumulation in response to abiotic stresses in woody plants. Forestry Research, 2, 9. https://doi.org/10.1007/s11676-022-01487-8

Malavasi, U. C., Davis, A. S., & Malavasi, M. M. (2016). Lignin in woody plants under water stress: A review. Floresta e Ambiente, 23, 589–597. https://doi.org/10.1590/2179-8087.143715

https://doi.org/10.3390/plants8030065Moulin, J. C.; Silva, J. T.; Oliveira, B. R.; Santos, L. M. (2024). Fluorescência da lignina da madeira de *Eucalyptus urophylla* submetido a estresse hídrico. In: Congresso Brasileiro de Ciência e Tecnologia da Madeira, Curitiba, Brasil.

Qaderi, M. M.; Martel, A. B.; Dixon, S. L. (2019). Environmental factors influence plant vascular system and water regulation. *Plants*, 8, 65. https://doi.org/10.3390/plants8030065

Schindelin, J., Arganda-Carreras, I., Frise, E., Kaynig, V., Pietzsch, T., Preibisch, S., Rueden, C., Saalfeld, S., Schmid, B., Tinevez, J. Y., White, D. J., Hartenstein, V., Eliceiri, K., Tomancak, P., & Cardona, A. (2012). Fiji: An open-source platform for biological-image analysis. Nature Methods, 9, 676–682. https://doi.org/10.1038/nmeth.2019

Sjöström, E. (1993). Wood chemistry: Fundamentals and applications (2nd ed.). Academic Press.

SILVA, Josy Tainara Silva; MOREIRA, Silvino Intra; MOULIN, Jordão Cabral. Method for Lignin Analysis in Wood by Fluorescence Microscopy. **Microscopy Research and Technique**, v. 89, n. 4, p. 578-589, 2026.

Tyree, M. T., & Zimmermann, M. H. (2002). Xylem structure and the ascent of sap (2nd ed.). Springer.

THORNTHWAITE, Charles Warren. Uma abordagem para uma classificação racional do clima. **Geographical review** , v. 38, n. 1, p. 55-94, 1948.

THORNTHWAITE, C. W.; HOLZMAN, Benjamin. Evaporation and transpiration. **Climate and Man: Yearbook of Agriculture**, p. 545-550, 1941.

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Frações e assinatura pirolítica da lignina no cerne e alburno de clones jovens de *Eucalyptus* cultivados em sítios com condições climáticas contrastantes

Sâmara Magdalene Vieira Nunes[1]; Ana Lourenço[2]; Duarte Miranda Neiva[2,3]; Jorge Gominho[2]; Stéffany Lima Araújo[1]; Graziela Baptista Vidaurre[1]

[1] Universidade Federal do Espírito Santo
[2] Centro de Estudos Florestais, Laboratório Associado TERRA, Instituto Superior de Agronomia, Universidade de Lisboa.
[3] Linking Landscape, Environment, Agriculture and Food, Laboratório Associado TERRA, Instituto Superior de Agronomia, Universidade de Lisboa.

Resumo: O objetivo deste trabalho foi avaliar as frações de lignina e sua assinatura pirolítica no cerne e alburno de clones de *Eucalyptus* cultivados em sítios com condições climáticas contrastantes. Foram analisados o cerne o alburno de três clones, em três sítios de crescimento,. Determinaram-se os teores de lignina insolúvel, solúvel, total e a relação S/G da lignina. Os compostos derivados da lignina foram caracterizados por pirólise analítica associada à cromatografia gasosa e avaliados por análise multivariada. A lignina total não diferiu entre sítios, enquanto a lignina solúvel e a relação S/G apresentaram variações dependentes do clone e do tipo de lenho. A PCA explicou 38,7% da variação nos dois primeiros componentes. A PERMANOVA indicou efeitos significativos, embora de baixa magnitude, do tipo de lenho, sítio de crescimento e clone sobre a composição pirolítica da lignina. Os resultados evidenciam que a assinatura da lignina pode ser influenciada pelo ambiente, clone e tipo de lenho.

Palavras-chave: Polpação kraft; Relação S/G; Qualidade da madeira

Lignin fractions and pyrolytic signature in the heartwood and sapwood of young *Eucalyptus* clones grown at sites with contrasting climatic conditions

Abstract: The objective of this study was to evaluate lignin fractions and their pyrolytic signature in the heartwood and sapwood of *Eucalyptus* clones grown at sites with contrasting climatic conditions. Three clones were analyzed across three growth sites, considering heartwood and sapwood. Insoluble, soluble, and total lignin contents, as well as the S/G ratio, were determined. Lignin-derived compounds were characterized by analytical pyrolysis coupled with gas chromatography and evaluated using multivariate analysis. Total lignin did not differ among sites, whereas soluble lignin and the S/G ratio showed variations dependent on clone and wood type. PCA explained 38.7% of the variation in the first two components. PERMANOVA indicated significant effects, although of low magnitude, of wood type, growth site, and clone on the pyrolytic composition of lignin. The results demonstrate that the lignin signature can be influenced by the environment, clone, and wood type.

Keywords: Kraft pulping; S/G ratio; Wood quality.

a. Introdução

A qualidade da madeira de *Eucalyptus* para polpação Kraft é determinada por um conjunto de propriedades associadas ao crescimento, à estrutura anatômica e à composição química do lenho. Nesse contexto, a lignina assume papel central, pois seu teor, sua estrutura e sua susceptibilidade à solubilização durante o cozimento Kraft atuam de forma complementar na resistência da parede celular à desconstrução química, influenciando a eficiência da deslignificação e a resposta da madeira ao processamento químico (Del Río et al., 2005; Santos et al., 2011; Zoghlami e Paës, 2019).

Em madeiras de folhosas, a lignina é composta predominantemente por unidades siringil (S) e guaiacil (G), cuja proporção é expressa pela relação S/G. Essa relação é um importante indicador estrutural, uma vez que ligninas com maior proporção de unidades siringil tendem a apresentar menor grau de condensação e maior susceptibilidade à deslignificação (Almeida *et al*., 2022). Em *Eucalyptus*, a relação S/G tem sido associada ao desempenho da polpação e ao rendimento de polpa, sendo muitas vezes mais informativa do que o teor total de lignina isoladamente (Del Río et al., 2005; Nunes et al., 2010).

A composição química da madeira também pode ser influenciada pelas condições de crescimento. Variáveis ambientais associadas ao clima podem alterar a formação do lenho e afetar características anatômicas, físicas e químicas, incluindo densidade, formação de cerne, teor de lignina total e relação S/G da lignina (Almeida et al., 2020; Almeida et al., 2022). No entanto, essas respostas nem sempre são lineares, pois dependem da interação entre genótipo, ambiente e processos fisiológicos de formação da madeira.

A diferenciação entre cerne e alburno representa outro fator relevante da heterogeneidade da madeira. O alburno está associado à condução de água e ao armazenamento de substâncias de reserva, enquanto o cerne é caracterizado por alterações fisiológicas e químicas, incluindo acúmulo de extrativos e modificações na permeabilidade. Essas diferenças podem afetar a impregnação dos cavacos, o consumo de álcali, a remoção de lignina e a qualidade da polpa. Embora estudos tenham relatado diferenças químicas entre cerne e alburno em espécies lenhosas, incluindo *Eucalyptus globulus* (Miranda et al., 2007; Morais; Pereira, 2007), ainda há menor detalhamento sobre as frações de lignina e os marcadores pirolíticos desses compartimentos em materiais jovens de *Eucalyptus* cultivados em ambientes contrastantes.

Apesar do potencial da pirólise analítica associada à cromatografia gasosa e espectrometria de massas para caracterizar a lignina, ainda existe uma lacuna quanto à

integração entre a quantificação clássica das frações de lignina e a caracterização pirolítica dos compostos derivados da lignina em cerne e alburno. Essa lacuna é particularmente relevante em estudos com clones cultivados sob condições climáticas contrastantes, nos quais a resposta química da madeira pode depender simultaneamente do tipo de lenho, do material genético e do ambiente de crescimento.

Diante disso, o objetivo deste estudo foi avaliar a variação das frações de lignina e da assinatura pirolítica da lignina no cerne e no alburno de clones de *Eucalyptus* cultivados em sítios com condições climáticas contrastantes.

b. Material e métodos

1.1 Descrição do material de estudo e amostragem

Amostras de madeira de três clones de eucalipto foram coletadas nos sítios com condições climáticas contrastantes no território brasileiro localizados nas cidades de São Miguel Arcanjo no estado de São Paulo (SP), Nova Viçosa no estado da Bahia (BA) e Açailândia no Maranhão (MA), conforme Figura 1.

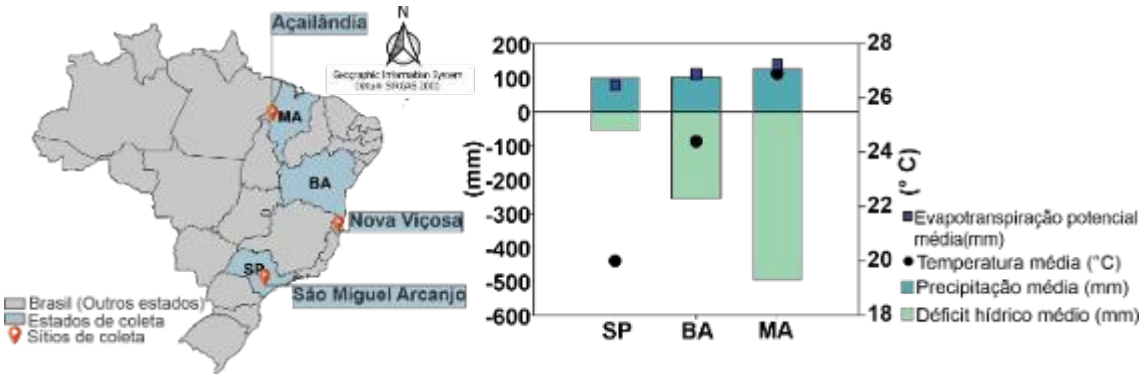


Figura 1- Mapa de localização e condições climáticas dos sítios de coleta.

Foram avaliados três materiais genéticos de *Eucalyptus*. O clone C1 (*Eucalyptus urophylla*) corresponde ao material comercial AEC144, o clone C4 (*Eucalyptus urophylla*) e o clone C5 (*Eucalyptus grandis* × *Eucalyptus urophylla*) . As árvores apresentavam, no momento da coleta, 81 meses no sítio de São Paulo, 79 meses no sítio da Bahia e 86 meses no sítio do Maranhão.

Foram selecionadas três árvores com diâmetro médio representativo de cada clone, provenientes de parcelas experimentais. De cada árvore, foram retirados discos de 2,5 cm de espessura nas posições correspondentes à base (0%), DAP, 25, 50, 75 e 100% da altura comercial, definida até o diâmetro de 6 cm. Para assegurar a representatividade da amostragem,

foram excluídas as árvores localizadas nas bordaduras das parcelas, bem como aquelas que apresentavam defeitos estruturais.

Os discos obtidos nas diferentes posições longitudinais do fuste foram seccionados com serra fita para separação das frações de cerne e alburno. Nas posições em que as duas frações estavam presentes, cerne e alburno foram processados separadamente. O material foi transformado em serragem em moinho de facas tipo Wiley, sendo selecionada a fração granulométrica que passou pela peneira de 40 mesh e ficou retida na peneira de 60 mesh. Após a climatização, a serragem foi submetida à remoção de extrativos, inicialmente com acetona por 6 horas e, posteriormente, com água quente, por 1 hora.

1.2 Análises da lignina

Para determinação da lignina total, insolúvel em ácido (lignina Klason) e solúvel em ácido, foram utilizadas as serragens livres de extrativos. A lignina Klason foi determinada conforme a TAPPI T 222 om-97 (1997). Um espectrofotômetro UV-vis foi utilizado para analisar a lignina solúvel no filtrado de hidrólise. A lignina total foi calculada pela soma da lignina Klason e da lignina solúvel em ácido.

Para obtenção do perfil pirolítico e relação S/G, a madeira livre de extrativos foi então submetida à moagem fina em moinho de bolas Retsch MM20 por 15 minutos. Em seguida, as amostras foram secas sob vácuo a 35 °C durante 12 horas. Cerca de 0,10 mg de serragem moída foi separada de cada amostra e pirolisada por 550 °C durante 1 minuto em uma Piroprobe conectada a uma interface CDS 5150 ligada a um cromatógrafo a gás líquido (Agilent 7890B) e com um detector de massa (Agilent 5977B). Os voláteis formados foram separados em uma coluna capilar de sílica fundida (ZB-1701: 60 mx 0,25 mm id x 0,25 µm de espessura de filme, (Phenomenex, EUA), que estava sob as seguintes condições cromatográficas: fluxo de hélio de 1 mL/min: 40 °C (mantido por 4 min), elevado para 100 °C a 20 °C/min e depois para 270 °C a 6 °C/min (mantido por 5 min); injetor a 270 °C, split 12:1, e interface do espectrômetro de massas a 280 °C e energia de ionização de elétrons 70 eV. Os compostos foram identificados comparando seus espectros de massa com o banco de dados Wiley, NIST2014 e literatura (Faix *et al*. 1989; Faix *et al*. 1990; Faix *et al*. 1991; Ralph *et al*. 1991). A área total do pirograma foi obtida após a integração automática de todos os picos obtendo-se a área total do pirograma. Em seguida, os compostos foram identificados e a área percentual de cada composto foi calculada. Os derivados de carboidratos (C), da Lignina Siringil (S) e Guaiacil (G) foram identificados, e então a relação entre Siringil e Guaiacil foi calculada.

1.3 Análises estatísticas

2.3.1 Análise univariada das frações de lignina e da relação S/G

Os testes de Shapiro-Wilk e Bartlett foram aplicados ao nível de 5% de significância, com o objetivo de avaliar, respectivamente, a normalidade dos resíduos e a homogeneidade das variâncias. Após a verificação desses pressupostos, os dados referentes às frações de lignina e à relação S/G foram submetidos à análise de variância pelo teste F, considerando-se o nível de 5% de significância.

As comparações estatísticas foram realizadas de forma a permitir a avaliação das diferenças entre as frações da madeira e entre os sítios de crescimento. Foram comparadas as médias obtidas para o alburno e o cerne dentro de um mesmo sítio, os resultados do alburno entre os diferentes sítios, bem como os resultados do cerne entre os diferentes sítios. Quando detectadas diferenças significativas pelo teste F, as médias foram comparadas pelo teste de Tukey, também ao nível de 5% de significância.

2.3.2 Análise multivariada dos compostos pirolíticos da lignina

As áreas dos compostos identificados por pirólise analítica associada à cromatografia gasosa foram organizadas em uma matriz com 54 observações. O phenol foi excluído por apresentar ocorrência irregular, baixa área relativa e menor especificidade como marcador das unidades siringil e guaiacil. Compostos não detectados foram considerados como zero, e as áreas dos compostos remanescentes foram convertidas em proporções relativas e submetidas à transformação de Hellinger.

A matriz transformada foi utilizada na análise de componentes principais (PCA), para visualização dos padrões de agrupamento das amostras, e na análise de variância multivariada permutacional (PERMANOVA), para avaliar os efeitos de tipo de lenho, sítio e clone sobre a composição pirolítica da lignina.

A homogeneidade da dispersão multivariada foi avaliada para tipo de lenho, sítio e clone. Quando o efeito de sítio foi significativo, foram realizadas comparações par a par entre sítios, controlando os efeitos de tipo de lenho e clone. Todas as análises foram realizadas no software R.

c. Resultados e discussão

As frações de lignina e a relação S/G variaram em função do clone, do tipo de lenho e do sítio de crescimento, entretanto, essa variação não ocorreu de forma uniforme entre as características avaliadas. A lignina total apresentou maior estabilidade entre os sítios, enquanto a lignina solúvel e a relação S/G foram mais sensíveis às diferenças ambientais (Figura 2).

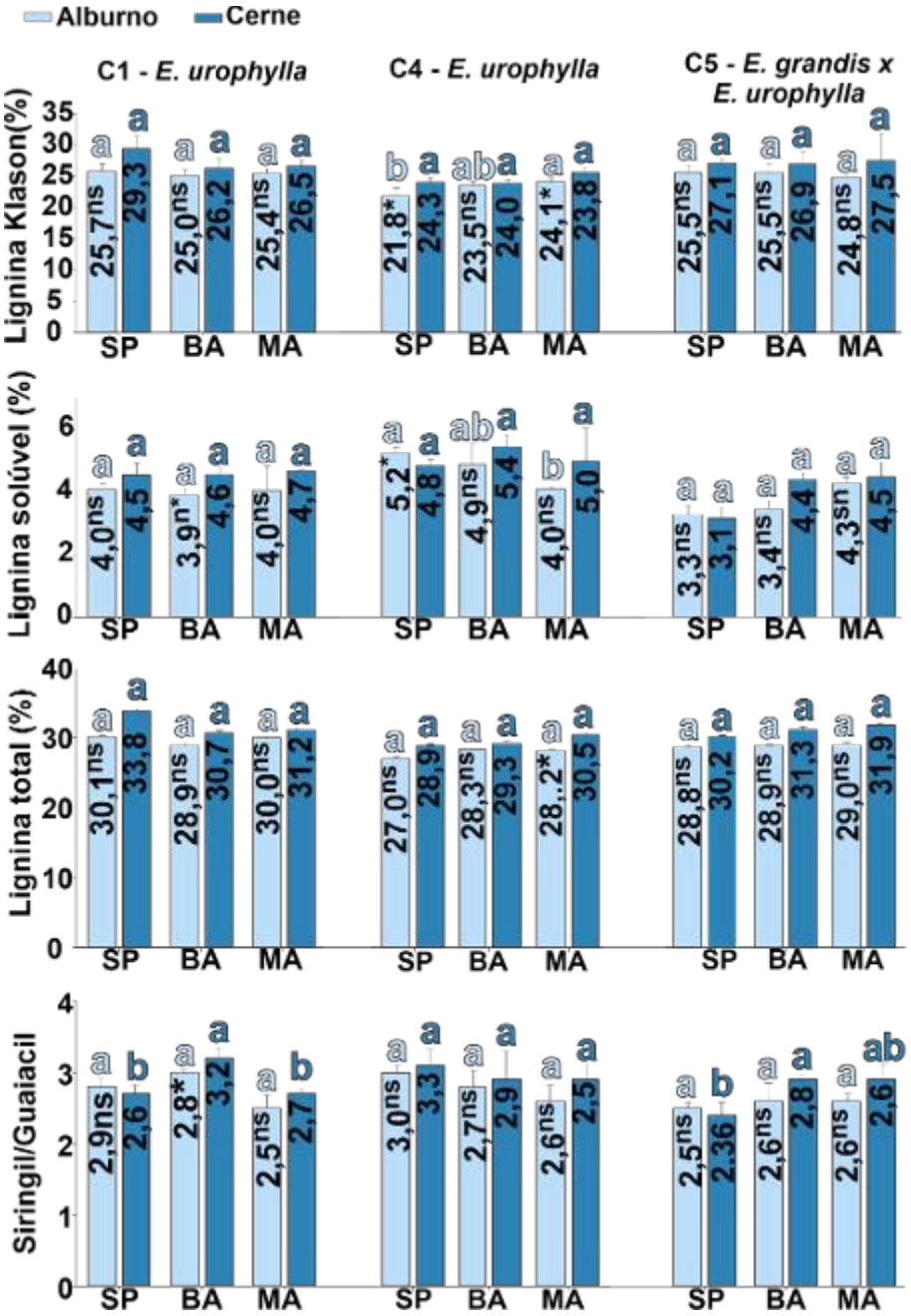


Figura 2. Variação das frações de lignina e da relação Siringil/Guaiacil no alburno e cerne de clones de *Eucalyptus* cultivados em diferentes sítios de crescimento. As letras minúsculas indicam a comparação entre sítios dentro de cada clone pelo teste de Tukey a 5% de

significância. “ns” indica ausência de diferença significativa entre alburno e cerne no mesmo clone e sítio, e “*” indica diferença significativa pelo teste de Tukey a 5% de significância.

A comparação entre sítios indicou que a lignina Klason variou apenas no clone C4, sugerindo resposta específica desse material genético às condições de crescimento. A lignina solúvel apresentou maior sensibilidade ao sítio, especialmente no clone C5, tanto no alburno quanto no cerne. Esse resultado indica que as condições de crescimento afetaram mais as frações solúvel e insolúvel da lignina do que o teor total.

A relação S/G apresentou variação entre sítios principalmente no clone C1 e no cerne do clone C5, indicando que o ambiente de crescimento pode modificar a proporção entre unidades siringil e guaiacil, mas essa resposta depende do material genético e da região da madeira.

As diferenças entre cerne e alburno foram pontuais e ocorreram principalmente no clone C4. A relação S/G não diferiu significativamente entre cerne e alburno em nenhum clone ou sítio, indicando que a proporção média entre unidades siringil e guaiacil foi mais conservada entre as regiões da madeira do que os teores das frações de lignina.

Estudos com *Eucalyptus globulus* demonstraram que cerne e alburno podem diferir em proporção, teor de extrativos, propriedades químicas e rendimento de polpa, mas essas diferenças variam conforme o material genético e o ambiente de crescimento (Miranda et al., 2007; Morais; Pereira, 2007). Assim, a ausência de diferenças consistentes na relação S/G entre cerne e alburno não indica ausência de heterogeneidade química, mas sugere que essa diferença pode estar mais associada ao perfil detalhado dos compostos derivados da lignina do que às variáveis médias isoladas.

A análise de componentes principais dos compostos pirolíticos derivados da lignina explicou 38,7% da variação total nos dois primeiros componentes, sendo 21,7% atribuídos ao PC1 e 16,9% ao PC2. Observou-se sobreposição parcial entre as amostras de cerne e alburno, mas a distribuição dos pontos indicou tendência de diferenciação entre os tipos de lenho, principalmente ao longo do PC2. As amostras de cerne tenderam a se posicionar em valores mais positivos desse componente, enquanto as amostras de alburno se concentraram predominantemente em valores negativos ou próximos de zero (Figura 3).

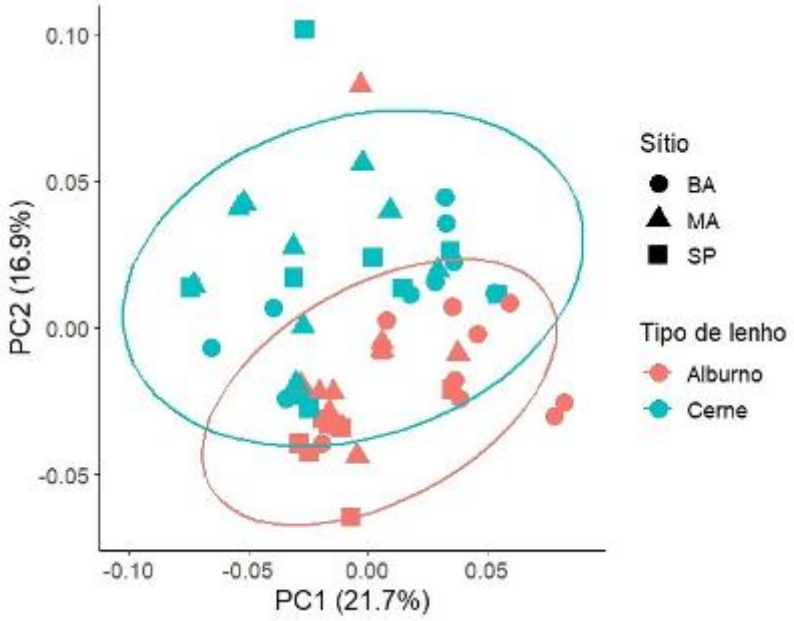


Figura 3. Análise de componentes principais dos compostos pirolíticos derivados da lignina no cerne e alburno de clones de *Eucalyptus* cultivados em três sítios de crescimento. As cores indicam as regiões da madeira, os símbolos indicam os sítios e as elipses representam o agrupamento das amostras por região da madeira.

A contribuição dos compostos para os componentes principais indicou que a variação entre as amostras esteve associada à alteração relativa de diferentes marcadores derivados da lignina. O PC1 foi influenciado principalmente por trans-4-propenilsiringol, 4-metilsiringol, 4-propinilsiringol, trans-isoeugenol, 4-vinilsiringol e guaiacol. O PC2 apresentou maior contribuição de vanilina, trans-4-propenilsiringol, siringaldeído, trans-isoeugenol, 4-vinilguaiacol e trans-sinapaldeído.

A PERMANOVA indicou efeito significativo, embora de baixa magnitude, do tipo de lenho, do sítio de crescimento e do clone sobre a composição pirolítica da lignina (Tabela 1). O tipo de lenho, o sítio e o clone explicaram, respectivamente, 8,1%, 7,8% e 6,4% da variação total da matriz, indicando que esses fatores contribuem para a assinatura pirolítica da lignina, embora grande parte da variação esteja associada a outras fontes de variabilidade.

Tabela 1. Análise de variância multivariada permutacional para a matriz dos compostos pirolíticos derivados da lignina.

Fontes de variação	**GL**	**Soma de quadrados**	**R^2**	**F**	**P**
Tipo de Lenho	1	0,02688	0,081	5,04	0,001
Sítio	2	0,02590	0,078	2,43	0,001

Clone	2	0,02113	0,064	1,98	0,008
Resíduo	48	0,25613	0,776	-	
Total	53	0,33005	1,0	-	

Como o efeito de sítio foi significativo, as comparações par a par entre ambientes foram avaliadas controlando os efeitos de tipo de lenho e clone. Foram observadas diferenças significativas entre BA e MA e entre BA e SP, enquanto MA e SP não diferiram significativamente entre si (Tabela 2).

Tabela 2. Comparações par a par entre sítios para a matriz dos compostos pirolíticos derivados da lignina, controlando os efeitos de tipo de lenho e clone.

Comparação	**R^2**	**F**	**P**
BA vs MA	0,082	3,36	0,006
BA vs SP	0,059	2,38	0,0225
MA vs SP	0,036	1,48	0,160

d. Conclusões

As frações de lignina e a assinatura pirolítica variaram em função do clone, do sítio e do tipo de lenho, com respostas distintas entre as características avaliadas. A lignina total foi mais estável entre os sítios, enquanto a lignina solúvel e a relação S/G mostraram maior sensibilidade às condições de crescimento. Embora as diferenças entre cerne e alburno tenham sido pontuais nas frações clássicas de lignina, a análise multivariada evidenciou assinaturas químicas distintas. Esses resultados reforçam a importância da avaliação integrada da lignina para compreender a qualidade química da madeira e sua possível influência na polpação kraft.

e. Agradecimentos

Os autores agradecem à Suzano pela parceria e colaboração, à CAPES, ao CNPq e à FAPES pelo apoio financeiro, e ao Centro de Estudos Florestais do Instituto Superior de Agronomia da Universidade de Lisboa pela infraestrutura e apoio à pesquisa.

f. Referências bibliográficas

Almeida, M. N. F., Vidaurre, G. B., Pezzopane, J. E. M., Lousada, J. L. P. C., Silva, M. E. C. M., Câmara, A. P., Rocha, S. M. G., Oliveira, J. C. L. de, Campoe, O. C., Carneiro, R. L., Alvares, C. A., Tomazzelo-Filho, M., Figueiredo, F. de M. de, & Oliveira, R. F. (2020). Heartwood variation of *Eucalyptus urophylla* is influenced by climatic conditions. *Forest Ecology and Management, 458*, 117743. https://doi.org/10.1016/j.foreco.2019.117743

Almeida, M. N. F., Vidaurre, G. B., Lousada, J. L. P. C., Pezzopane, J. E. M., Oliveira, J. C. L., Câmara, A. P., Silva, M. E. C. M., Barros, A. I. R. N. A., Matos, C. C., Alves, A. M. M., Campoe, O. C., & Alvares, C. A. (2022). Differences in wood anatomy and chemistry of a *Eucalyptus urophylla* clone explained by site climate conditions. *Canadian Journal of Forest Research, 52*(5), 834–844. https://doi.org/10.1139/cjfr-2021-0261

del Río, J. C., Gutiérrez, A., Hernando, M., Landín, P., Romero, J., & Martínez, A. T. (2005). Determining the influence of eucalypt lignin composition in paper pulp yield using Py-GC/MS. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 74*(1–2), 110–115. https://doi.org/10.1016/j.jaap.2004.10.010

Faix, O., Meier, D. (1989). Pyrolytic and hydrogenolytic degradation studies on lignocellulosics, pulps and lignins. *Holz als Roh- und Werkstoff, 47*(2), 67–72. https://doi.org/10.1007/BF02628617

Faix, O., Meier, D., & Fortmann, I. (1990). Thermal degradation products of wood: Gas chromatographic separation and mass spectrometric characterization of monomeric lignin derived products. *Holz als Roh- und Werkstoff, 48*(7–8), 281–285. https://doi.org/10.1007/BF02626519

Faix, O., Fortmann, I., Bremer, J., & Meier, D. (1991). Thermal degradation products of wood: Gas chromatographic separation and mass spectrometric characterization of polysaccharide derived products. *Holz als Roh- und Werkstoff, 49*(5), 213–219. https://doi.org/10.1007/BF02613278

Miranda, I., Gominho, J., Lourenço, A., & Pereira, H. (2007). Heartwood, extractives and pulp yield of three *Eucalyptus globulus* clones grown in two sites. *Appita Journal, 60*(6), 485–500.

Morais, M. C., & Pereira, H. (2007). Heartwood and sapwood variation in *Eucalyptus globulus* Labill. trees at the end of rotation for pulpwood production. *Annals of Forest Science, 64*(6), 665–671. https://doi.org/10.1051/forest:2007045

Nunes, C. A., Lima, C. F., Barbosa, L. C. A., Colodette, J. L., Gouveia, A. F. G., & Silvério, F. O. (2010). Determination of *Eucalyptus* spp. lignin S/G ratio: A comparison between methods. *Bioresource Technology, 101*(11), 4056–4061. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.01.012

Ralph, J., & Hatfield, R. D. (1991). Pyrolysis-GC-MS characterization of forage materials. *Journal of Agricultural and Food Chemistry, 39*(8), 1426–1437. https://doi.org/10.1021/jf00008a014

Santos, R. B., Capanema, E. A., Balakshin, M. Y., Chang, H.-M., & Jameel, H. (2011). Effect of hardwoods characteristics on kraft pulping process: Emphasis on lignin structure. *BioResources, 6*(4), 3623–3637. https://doi.org/10.15376/biores.6.4.3623-3637

Zoghlami, A., & Paës, G. (2019). Lignocellulosic biomass: Understanding recalcitrance and predicting hydrolysis. *Frontiers in Chemistry, 7*, Article 874. https://doi.org/10.3389/fchem.2019.00874

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Identificação de espécies nativas reflorestadas da Mata Atlântica utilizando espectroscopia NIR e análise discriminante PLS-DA

Maria Eduarda de Castro Flores[1]; Caio Cesar Nemer Martins[1]; Iara Fontes Demuner[1]; Edna Lopes Mendes Rosado[1]; Carolina Maria Filardi Cimino Silva[1]; Priscila Moreira da Silva Xavier[1]; Evanderson Luis Capelete Evangelista[1]; Vinícius Resende de Castro[1]

[1] Universidade Federal de Viçosa

Resumo: A identificação de espécies madeireiras em materiais fragmentados é um desafio para a rastreabilidade da madeira e o controle da origem de produtos florestais. Este estudo avaliou o potencial da espectroscopia no infravermelho próximo (NIR), associada à análise discriminante por mínimos quadrados parciais (PLS-DA), para classificar serragem de cinco espécies nativas da Mata Atlântica. Foram analisadas 50 amostras, comparando-se diferentes estratégias de pré-processamento espectral. O melhor modelo, baseado na segunda derivada e em quatro variáveis latentes, alcançou 100% de acurácia na validação cruzada interna, distinguindo corretamente todas as espécies. Os resultados demonstram que diferenças espectrais podem ser exploradas por métodos quimiométricos para identificação precisa de materiais madeireiros, evidenciando o potencial da combinação entre NIR e PLS-DA como ferramenta rápida, não destrutiva e promissora para rastreabilidade da madeira.

Palavras-chave: Quimiometria; Rastreabilidade de madeiras; Identificação de madeiras.

Identification of reforested native Atlantic Forest species using NIR spectroscopy and partial least squares discriminant analysis PLS-DA

Abstract: Identifying timber species in fragmented materials is a challenge for wood traceability and the verification of the origin of forest products. This study evaluated the potential of near-infrared spectroscopy (NIR), combined with partial least squares discriminant analysis (PLS-DA), to classify sawdust from five native Atlantic Forest species. Fifty samples were analyzed, and different spectral preprocessing strategies were compared. The best model, based on the second derivative and four latent variables, achieved 100% accuracy in internal cross-validation, correctly distinguishing all species. The results demonstrate that spectral differences can be explored through chemometric methods for the accurate identification of wood materials, highlighting the potential of combining NIR and PLS-DA as a rapid, non-destructive, and promising tool for wood traceability.

Keywords: Chemometrics; Wood traceability; Wood identification.

1. Introdução

A restauração florestal constitui uma estratégia importante para mitigar as mudanças climáticas, conservar a biodiversidade e recuperar serviços ecossistêmicos. O Brasil ocupa posição de destaque nesse cenário por abrigar biomas intensamente degradados e fragmentados

(Chazdon & Brancalion, 2019; Strassburg et al., 2020). Na Mata Atlântica, o aproveitamento de espécies arbóreas nativas apresenta relevância ecológica, tecnológica e socioeconômica, podendo favorecer sua inserção em cadeias produtivas sustentáveis e mercados bioeconômicos (Carvalho Ribeiro et al., 2024).

A incorporação desse material às cadeias produtivas requer mecanismos que assegurem sua identidade e procedência, pois diferenças físicas e químicas entre espécies influenciam o desempenho tecnológico, o valor comercial e o uso final. Entretanto, a divisão e a mistura de lotes dificultam a associação entre o material e a origem declarada, reforçando a importância de ferramentas de rastreabilidade (Zambrano et al., 2022).

A identificação convencional baseia-se na observação de características anatômicas macroscópicas e microscópicas e exige conhecimento especializado, além de preparo adequado das amostras. Sua aplicação torna-se mais limitada quando a madeira está fragmentada ou reduzida a serragem, condição em que os planos anatômicos não estão preservados. Assim, métodos instrumentais não destrutivos podem atuar como ferramentas complementares para a identificação e diferenciação de espécies madeireiras (Kobayashi et al., 2019).

Entre essas técnicas, a espectroscopia no infravermelho próximo (NIR) permite obter informações relacionadas à composição e à estrutura do material de forma rápida e não destrutiva. Devido à sobreposição das bandas e ao elevado número de variáveis espectrais, sua interpretação requer métodos quimiométricos. A análise discriminante por mínimos quadrados parciais (PLS-DA) relaciona as informações espectrais a classes previamente conhecidas, possibilitando a construção de modelos supervisionados de classificação (Pace, 2020).

Apesar do potencial da associação entre NIR e métodos multivariados, ainda são escassos os estudos sobre sua aplicação na classificação de serragem de espécies nativas. Diante disso, este estudo teve como objetivo avaliar o potencial da espectroscopia no infravermelho próximo (NIR) na diferenciação de cinco espécies nativas da Mata Atlântica: boleira (*Joannesia princeps* Vell.), ipê-felpudo (*Zeyheria tuberculosa*), jacarandá-da-bahia (*Dalbergia nigra*), jenipapo (*Genipa americana*) e jequitibá-rosa (*Cariniana legalis*). Para isso, foram avaliados os perfis espectrais, a distribuição das amostras no espaço das variáveis latentes e o desempenho interno de classificação, todos associados ao uso da PLS-DA.

2. Material e métodos

2.1 Origem do material

O estudo foi conduzido utilizando madeiras provenientes de plantios comerciais pertencentes à empresa Symbiosis Investimentos, localizados nos municípios de Porto Seguro e

Trancoso, Bahia, Brasil. Foram avaliadas cinco espécies nativas da Mata Atlântica com potencial madeireiro: *Joannesia princeps* Vell., *Zeyheria tuberculosa*, *Dalbergia nigra*, *Genipa americana* e *Cariniana legalis*. Para cada espécie foram selecionadas dez árvores com aproximadamente 14 anos de idade, conduzidas sob o mesmo sistema silvicultural e submetidas às mesmas condições de manejo. A seleção priorizou indivíduos representativos dos povoamentos, sem defeitos visíveis, injúrias mecânicas ou sintomas de ataque por organismos xilófagos, totalizando 50 árvores avaliadas.

2.2 Preparo das amostras

De cada árvore foram retirados discos correspondentes a 0, 25, 50 e 75% da altura comercial, em que um quarto da seção transversal de cada disco foi destinado às análises de NIR's. O material proveniente das quatro posições longitudinais foi homogeneizado para compor uma única amostra representativa por árvore. As amostras foram moídas em moinho de facas e peneiradas, sendo utilizada a fração de serragem retida entre a peneira de 40 *mesh* e a de 60 *mesh*, para aquisição dos espectros NIR

2.3 Aquisição dos espectros NIR

Os espectros foram obtidos em espectrômetro FT-NIR MPA II (Bruker Optik GmbH), operando em modo de absorbância na faixa espectral de 12.000 – 4.000 cm^{-1}, com resolução espectral de 16 cm^{-1} e média de 64 varreduras por leitura/espectro. Cada amostra foi analisada cinco vezes, promovendo-se homogeneização e reposicionamento do material entre as aquisições para minimizar efeitos associados à distribuição das partículas, totalizando 250 espectros. O espectro representativo de cada árvore correspondeu à média das cinco leituras independentes, resultando em um conjunto final de cinquenta espectros utilizados nas análises multivariadas de PLS-DA.

2.4 Pré-processamento espectral e análise PLS-DA

Os espectros médios foram exportados do software OPUS em arquivos com extensão .dpt e processados em linguagem Python 3.14.6 utilizando as bibliotecas NumPy, SciPy, Pandas e Scikit-learn. As análises foram executadas em notebooks Jupyter no ambiente Visual Studio Code.

Foram comparados os espectros brutos e oito métodos de pré-processamento: transformação normal padrão (SNV), correção multiplicativa de espalhamento (MSC), normalização vetorial, primeira derivada, segunda derivada, SNV combinada com a primeira derivada, MSC combinada com a primeira derivada e normalização vetorial combinada com a

primeira derivada. As derivadas foram calculadas pelo filtro de Savitzky–Golay, utilizando janela de 11 pontos e polinômio de segunda ordem.

A classificação foi realizada por análise discriminante por mínimos quadrados parciais (PLS-DA), com avaliação de modelos contendo de uma a dez variáveis latentes. As espécies foram codificadas em uma matriz binária, na qual cada coluna representou uma classe, e a classe prevista foi definida pela maior resposta estimada pelo modelo.

O desempenho dos modelos foi avaliado por validação cruzada estratificada em cinco grupos, com embaralhamento das amostras e 50 repetições. A seleção do modelo considerou a maior acurácia e, em caso de empate, o menor número de variáveis latentes. Também foram calculadas a precisão, a sensibilidade e o F1-score para cada classe. A matriz de confusão foi construída a partir das previsões obtidas durante a validação cruzada interna. Além disso, foram avaliadas as projeções bidimensionais das variáveis latentes para visualizar a distribuição das amostras no espaço multivariado.

3. Resultados e discussão

3.1 Perfis espectrais das espécies

Os espectros médios das cinco espécies (Figura 1) apresentaram similaridade ao longo da região do infravermelho próximo, refletindo a composição química estrutural básica compartilhada pelas madeiras, predominantemente constituídas por celulose, hemiceluloses e lignina. Entretanto, diferenças discretas na intensidade e no formato das bandas indicam variações na proporção desses constituintes e na presença de extrativos específicos, capazes de modificar a resposta espectral mesmo quando não perceptíveis por inspeção visual direta. Essas pequenas diferenças constituem a principal fonte de informação explorada por métodos quimiométricos supervisionados para a discriminação entre espécies. Embora essas diferenças nem sempre sejam claramente distinguíveis por inspeção visual, elas podem ser exploradas por métodos quimiométricos para a classificação das espécies (Pace, 2020).

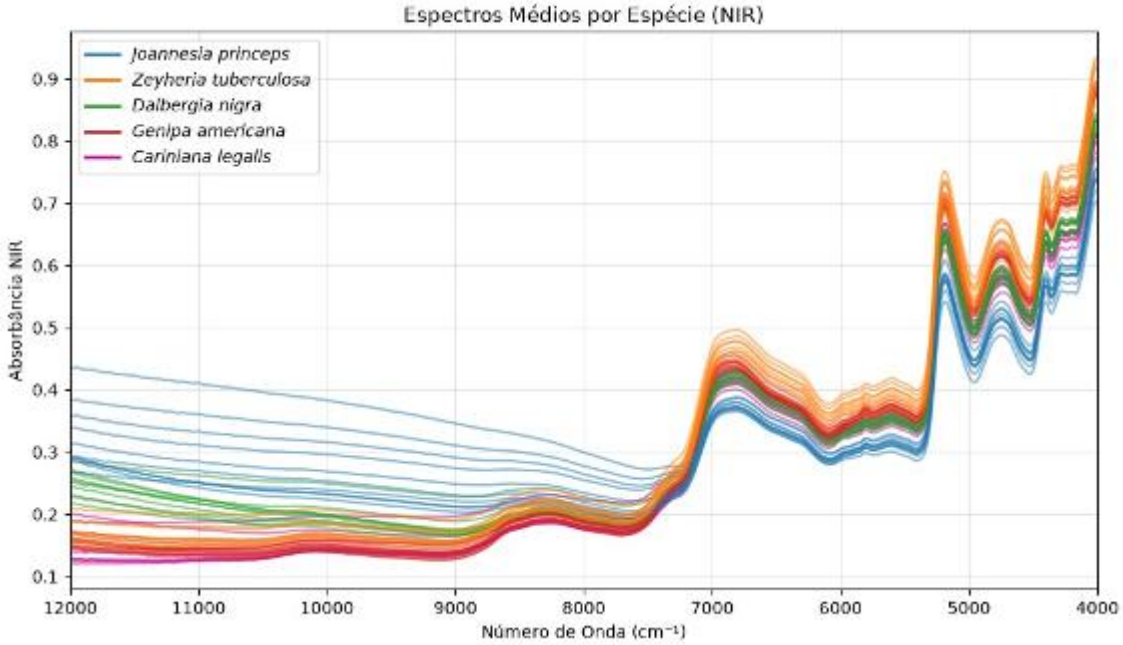


Figura 1 – Perfis espectrais médios das amostras de serragem das cinco espécies nativas avaliadas na região do infravermelho próximo.

3.2 Classificação das espécies por PLS-DA

Entre as estratégias de pré-processamento avaliadas, a segunda derivada associada a quatro variáveis latentes apresentou o melhor desempenho na classificação das espécies do modelo PLS-DA. Esse resultado pode ser atribuído à capacidade desse pré-processamento de reduzir deslocamentos de linha de base, minimizar efeitos de espalhamento da radiação e aumentar a resolução de bandas parcialmente sobrepostas, permitindo destacar diferenças espectrais associadas à composição química da madeira. Para visualizar a distribuição das amostras no espaço multivariado, foram consideradas as variáveis latentes LV1 e LV4, cuja projeção foi apresentada na Figura 2.

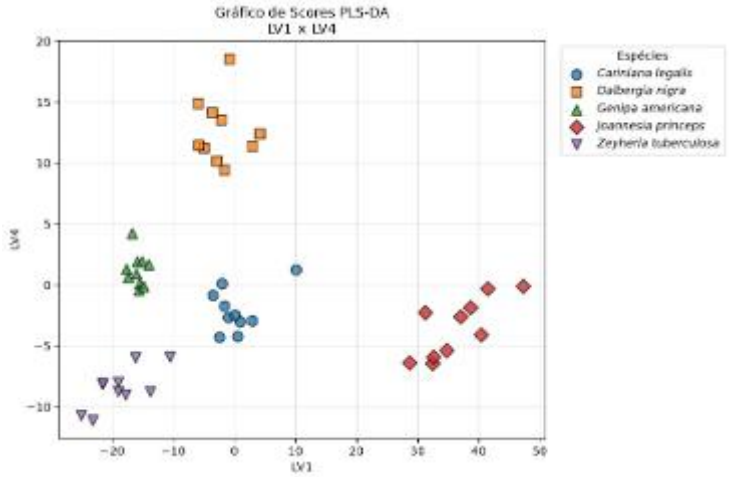


Figura 2 – Distribuição das amostras de serragem das cinco espécies no espaço definido pelas variáveis latentes LV1 e LV4 do modelo PLS-DA.

A projeção LV1 × LV4 evidenciou a formação de agrupamentos distintos entre as cinco espécies avaliadas. As amostras de uma mesma classe permaneceram próximas entre si, enquanto os grupos ocuparam diferentes regiões do espaço latente. Esse padrão indicou que o modelo representou variações espectrais associadas à identidade das espécies, mesmo diante da semelhança geral observada nos espectros brutos. Embora essa projeção não constitua, isoladamente, uma medida de desempenho preditivo, ela auxilia na interpretação da separação das classes obtida pelo modelo PLS-DA.

A Figura 3 apresenta a matriz de confusão obtida a partir das previsões realizadas durante a validação cruzada do modelo selecionado.

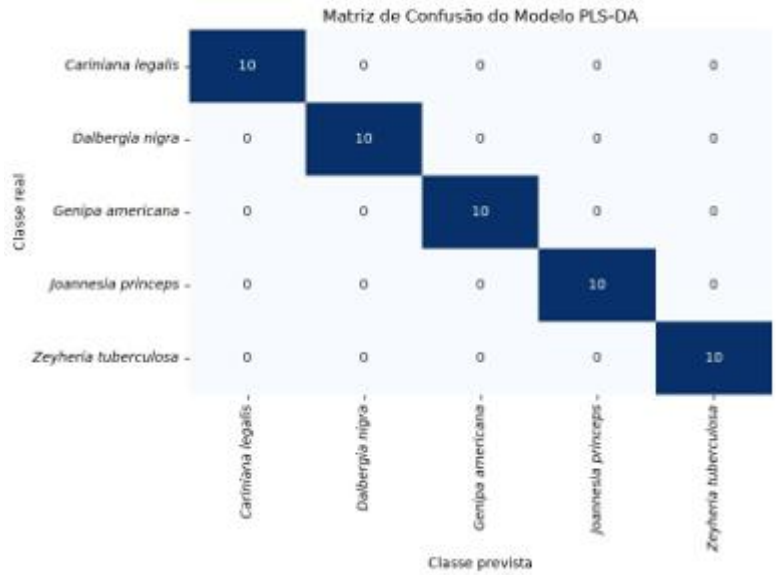


Figura 3 – Matriz de confusão do modelo PLS-DA obtida por validação cruzada para a classificação das cinco espécies avaliadas.

As dez amostras de cada espécie foram classificadas corretamente, sem ocorrências fora da diagonal principal da matriz de confusão, resultando em acurácia de 100%. Os valores de precisão, sensibilidade e F1-score também foram iguais a 1,00 para todas as classes. Esse desempenho evidencia elevada capacidade discriminante do modelo para o conjunto experimental estudado e confirma que diferenças químicas sutis entre as espécies foram suficientemente capturadas pelos espectros NIR's após o pré-processamento adequado. Entretanto, resultados dessa magnitude devem ser interpretados com cautela, uma vez que foram obtidos por validação interna utilizando um conjunto relativamente homogêneo de amostras provenientes de plantios sob condições semelhantes.

Resultados semelhantes foram obtidos por Lima et al. (2022), que utilizaram espectroscopia NIR associada à PLS-DA para classificar resíduos lenhosos de 12 espécies nativas da Amazônia. Na validação cruzada, o modelo desenvolvido com a primeira derivada dos espectros obtidos na superfície radial alcançou 97,9% de classificações corretas, enquanto o modelo submetido à validação externa, utilizando a segunda derivada, atingiu 97,6%. Esses resultados, juntamente com o desempenho observado no presente estudo, reforçam o potencial da associação entre NIR e PLS-DA para diferenciar espécies madeireiras, mesmo em materiais com diferentes formas de preparo e apresentação. Ainda assim, ambos os estudos convergem ao demonstrar que a informação química contida nos espectros NIR é suficiente para distinguir espécies taxonomicamente distintas, mesmo quando a estrutura anatômica da madeira foi completamente destruída durante o processamento em serragem.

Apesar do desempenho obtido, os resultados corresponderam a uma avaliação interna, realizada com 50 amostras provenientes de um conjunto específico de materiais. Assim, a capacidade de generalização do modelo ainda deve ser confirmada por validação externa, utilizando novas amostras e maior variabilidade de origem, idade, condições de crescimento e manejo.

4. Conclusões

A espectroscopia NIR associada à análise PLS-DA mostrou-se eficiente para diferenciar a serragem das cinco espécies nativas avaliadas. O modelo desenvolvido com a segunda

derivada e quatro variáveis latentes evidenciou agrupamentos distintos no espaço latente e alcançou acurácia de 100% na validação cruzada interna, sem erros de classificação.

Sob o ponto de vista tecnológico, os resultados reforçam o potencial da espectroscopia NIR como ferramenta rápida, não destrutiva e de baixo custo operacional para rastreabilidade da madeira, inspeção industrial e apoio às ações de fiscalização ambiental. Contudo, antes da aplicação operacional do modelo, torna-se necessária sua validação externa utilizando materiais provenientes de diferentes regiões, idades, condições de crescimento e sistemas de manejo, garantindo maior robustez e capacidade de generalização.

5. Agradecimentos

Os autores agradecem às agências de fomento CAPES, CNPq e FAPEMIG. Além disso, agradecem ao Laboratório de Propriedades da Madeira (LPM/UFV), ao Laboratório de Painéis e Energia da Madeira (LAPEM/UFV) e ao Laboratório de Celulose e Papel (LCP/UFV) pela disponibilização da infraestrutura, pelo preparo das amostras e pelo suporte técnico nas análises por espectroscopia no infravermelho próximo.

6. Referências bibliográficas

Carvalho Ribeiro, S., Soares Filho, B., Cesalpino, T., Araújo, A., Teixeira, M., Cardoso, J., Figueiras, D., Nunes, F., & Rajão, R. (2024). Bioeconomic markets based on the use of native species (NS) in Brazil. *Ecological Economics*, *218*, 108124. https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2024.108124

Chazdon, R. L., & Brancalion, P. H. S. (2019). Restoring forests as a means to many ends. *Science*, *365*(6448), 24–25. https://doi.org/10.1126/science.aax9539

Kobayashi, K., Hwang, S.-W., Okochi, T., Lee, W.-H., & Sugiyama, J. (2019). Non-destructive method for wood identification using conventional X-ray computed tomography data. *Journal of Cultural Heritage*, *38*, 88–93. https://doi.org/10.1016/j.culher.2019.02.001

Lima, M. D. R., Ramalho, F. M. G., Trugilho, P. F., Bufalino, L., Dias Júnior, A. F., Protásio, T. P., & Hein, P. R. G. (2022). Classifying waste wood from Amazonian species by near-infrared spectroscopy (NIRS) to improve charcoal production. *Renewable Energy*, *193*, 584–594. https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.05.048

Pace, J. H. C. (2020). *Estimativas de propriedades e identificação da madeira com uso da espectroscopia no infravermelho próximo – NIR* (Tese de doutorado). Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro. https://rima.ufrrj.br/jspui/handle/20.500.14407/9400

Strassburg, B. B. N., Iribarrem, A., Beyer, H. L., Cordeiro, C. L., Crouzeilles, R., Jakovac, C. C., Braga Junqueira, A., Lacerda, E., Latawiec, A. E., Balmford, A., Brooks, T. M., Butchart, S. H. M., Chazdon, R. L., Erb, K.-H., Brancalion, P. H. S., Buchanan, G., Cooper, D., Díaz, S., Donald, P. F., ... Visconti, P. (2020). Global priority areas for ecosystem restoration. *Nature*, *586*(7831), 724–729. https://doi.org/10.1038/s41586-020-2784-9

Zambrano, V., Pozzetti, V. C., Silva, A. C. L. da, & Cromwell, A. C. S. (2022). Obrigatoriedade do uso de método eficiente para rastreabilidade de madeira extraída de florestas nativas. *Revista Jurídica*, *4*(71), 739–765. https://doi.org/10.26668/revistajur.2316-753X.v4i71.6166

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Impermeabilização da madeira de *Simarouba amara* Aubl. (marupá): avaliação de produtos no sudeste do Pará

Raimunda Marcia Souza dos Santos[1]; Denise Thais Pinheiro Barata[1]; Nayellen Pereira Cunha Ramos[1]; Ana Beatriz Nunes[1]; Thiago de Paula Protásio[2]; Elessandra Da Silva Araújo[1]; Ximena Mendes de Oliveira[3]; Selma Lopes Goulart[1]

[1] Universidade Federal Rural da Amazonia, Campus Parauapebas 01

[2] Universidade Federal de Lavras, Departamento de Ciências Florestais- DCF 02

[3] Universidade Federal de São Carlos, Campus Sorocaba, Departamento de Ciências Ambientais 03

Resumo: Este estudo investigou a taxa de absorção de água da madeira de *Simarouba amara* Aubl (marupá) submetida a tratamentos naturais e sintéticos, avaliados em diferentes períodos de imersão. As amostras foram tratadas com óleo de linhaça, cera de carnaúba, verniz comum e verniz naval, além de uma testemunha sem proteção. A absorção hídrica foi medida após 45, 1440, 4320 e 18720 minutos. Os resultados indicaram maior absorção nos primeiros momentos de imersão, seguida de redução gradual ao longo do tempo. A testemunha e o óleo de linhaça apresentaram os maiores índices de absorção, enquanto a cera de carnaúba, o verniz comum e, sobretudo, o verniz naval demonstraram significativa eficiência na redução da entrada de água. O verniz naval destacou-se como o tratamento mais eficaz em todos os períodos avaliados. Conclui-se que a impermeabilização é fundamental para aprimorar o desempenho da madeira de marupá frente à umidade, sendo os tratamentos formadores de película especialmente o verniz naval os mais adequados para aumentar sua estabilidade e durabilidade.

Palavras-chave: Madeira tropical; Produtos naturais e sintéticos; Proteção da madeira.

Waterproofing of *Simarouba amara* Aubl. (marupá) wood: evaluation of products in southeastern Pará

Abstract: This study evaluated the water absorption rate of *Simarouba amara* Aubl. (marupá) wood treated with natural and synthetic products and subjected to different immersion periods. The samples received treatments with linseed oil, carnauba wax, standard varnish, and marine varnish, along with an untreated control. Water absorption

was measured at 45, 1440, 4320, and 18720 minutes. The results showed higher absorption at the beginning of immersion, followed by a gradual decrease over time. The control and linseed oil treatments exhibited the highest absorption values, whereas

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

carnauba wax, standard varnish, and especially marine varnish significantly reduced water uptake. Marine varnish was the most effective treatment across all immersion periods. The findings indicate that waterproofing is essential to improve the performance of *Simarouba amara* Aubl. (marupá) under moisture exposure, with film-forming treatments particularly marine varnish being the most suitable for enhancing its stability and durability.

Keywords: Tropical wood; Natural and synthetic products; Wood protection.

1. Introdução

A madeira é um recurso amplamente utilizado em construções e mobiliário, e seu desempenho depende de propriedades anatômicas, físicas e mecânicas (PARMA & ICIMOTO, 2023; ALMEIDA et al., 2016; GALLIO et al., 2018). Por ser um material vegetal, é heterogênea, anisotrópica e higroscópica, absorvendo e liberando umidade em função de sua composição química (CASTRO & GUIMARÃES, 2018; BORGES & QUIRINO, 2004). Essa variação provoca retração e inchamento, gerando tensões internas que podem causar rachaduras, empenamentos e perda de integridade estrutural (CERCHIARI et al., 2010). A umidade também favorece o ataque de fungos e insetos xilófagos, acelerando a deterioração (COSTA & CABRAL, 2023).

Na Amazônia, o clima quente e úmido intensifica a ação de organismos deterioradores, especialmente fungos manchadores e emboloradores (HANADA et al., 2003). Entre as espécies nativas da região, destaca-se *Simarouba amara* Aubl. (marupá), madeira de baixa densidade pertencente à família Simaroubaceae, distribuída nos biomas Amazônia, Mata Atlântica e Cerrado. A espécie pode atingir de 15 a 25 m de altura e até 80 cm de diâmetro (CARVALHO, 2006). Sua madeira, leve e de boa trabalhabilidade, é utilizada na fabricação de brinquedos, caixotes, compensados e papel (LORENZI, 1992; CARVALHO, 2008). Embora apresente durabilidade satisfatória em ambientes protegidos, sua resistência diminui quando exposta às intempéries, exigindo tratamentos de proteção.

A impermeabilização é fundamental para reduzir a absorção de umidade, prevenir defeitos como rachaduras e empenamentos e aumentar a durabilidade da madeira (CASTRO & GUIMARÃES, 2018; FINAAR, 2024; HERTEL, 2024). Considerando esse contexto, esta pesquisa tem como objetivo avaliar a taxa de absorção de água da madeira de *Simarouba amara* Aubl., tratada com produtos sintéticos e naturais e submetida a diferentes tempos de imersão.

2. Material e métodos

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

O estudo foi realizado no Laboratório Multiusuário de Química e materiais Lignocelulósicos da Universidade Federal Rural da Amazônia (UFRA), no Campus Parauapebas , no sudeste do Pará. O material utilizado neste estudo é composto por resíduos de manejo florestal sustentável coletados na UMF Rio Capim, em Paragominas (PA). O delineamento estatístico escolhido foi o inteiramente casualizado, com três repetições por tratamento em cada tempo de avaliação. Foram testados sete tratamentos, considerando a aplicação de diferentes produtos impermeabilizantes e o número de demãos: Sem impermeabilizante (testemunha); Cera de carnaúba: 1 e 2 demãos; Óleo de linhaça: 1 e 2 demãos; Verniz comum: 1 e 2 demãos; Verniz naval: 1 e 2 demãos.

As amostras foram avaliadas em quatro períodos de imersão 45, 1.440, 4.320 e 18.720 minutos permitindo acompanhar como a absorção de água evolui ao longo do tempo e identificar possíveis mudanças no comportamento do material conforme aumenta o tempo de exposição.

O processamento dos cortes foi realizado na marcenaria Good Portas, localizada no polo moveleiro de Parauapebas, PA. Durante essa etapa, foram confeccionados 27 corpos de prova cúbicos, com dimensões aproximadas de 3 × 3 × 3 cm. Os cortes foram executados nas três principais direções anatômicas da madeira como o transversal, longitudinal tangencial e radial, garantindo a representatividade das diferentes orientações estruturais do material.

Os corpos de prova foram inicialmente submetidos ao processo de lixamento, etapa essencial para corrigir imperfeições decorrentes dos cortes e para nivelar e suavizar as superfícies. Esse procedimento também facilitou a identificação das amostras com o auxílio do pincel, como ilustrado na (Figura 1), que apresenta a sequência de organização até a

marcação final dos corpos de prova. Além disso, o lixamento proporcionou melhores condições para a aplicação dos produtos utilizados no estudo, garantindo maior uniformidade entre as amostras.

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Figura 1- Organização do material trabalhado. A) material apos o corte e posteriomente o lixamento; B) separação das amostras por tratamento; C) Organização das amostras e D) amostras identificadas para maior confiabilidade dos resultados.



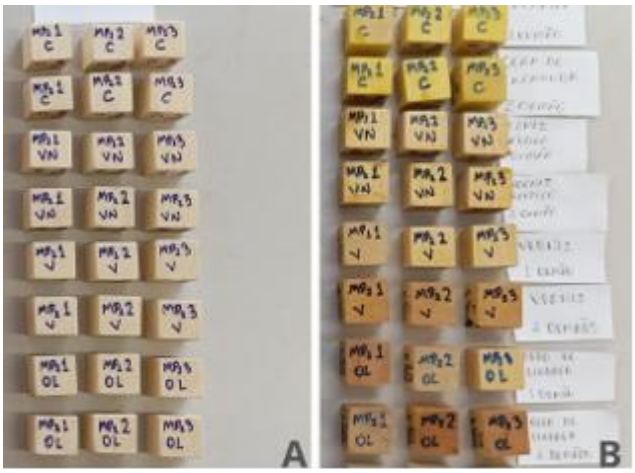
Em seguida, foi iniciado o processo de aplicação dos produtos impermeabilizantes pelo metodo de pincelamento. Utilizando um pincel apropriado, foram aplicados o verniz naval, o

verniz comum e o óleo de linhaça. Cada produto foi distribuído em duas demãos: a primeira camada foi aplicada de forma uniforme sobre a superfície da madeira, e, após a completa secagem, procedeu-se à aplicação da segunda demão, visando garantir maior cobertura e penetração do produto. O resultado pode ser observado na Figura 2.

Para o tratamento com cera de carnaúba, foi necessário aquecê-la em banho-maria a aproximadamente 100 °C para aumentar sua solubilidade e facilitar o manuseio. Devido à rápida solidificação após o resfriamento, a aplicação precisou ser realizada imediatamente, ainda em estado líquido e quente.

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Figura 2- amostras organizadas por tratamento antes e depois da impermeabilização: A) amostras sem impermeabilizantes e B) amostras com impermeabilizantes, exceto a testemunha.



Após a completa secagem, os corpos de prova foram pesados em balança analítica com precisão de 0,1 g e, em seguida, organizados em béqueres de 1.000 mL para o processo de imersão em água. As amostras foram agrupadas conforme o impermeabilizante utilizado e o número de demãos aplicadas; assim, aquelas tratadas com apenas uma demão de cera de

carnaúba foram alocadas no mesmo béquer, seguindo o mesmo critério para os demais tratamentos.

A etapa de imersão foi conduzida nos béqueres previamente organizados, e as pesagens subsequentes foram realizadas em diferentes intervalos de tempo: após 45, 1.440, 4.320 e 18.720 minutos de imersão.

Analise estatistica

A taxa de absorção de água (g/h) (Equação 1) e o teor de água absorvido (%) (Equação 2) foram determinados com base nas fórmulas propostas por Cerchiari et al. (2010). Essa abordagem permitiu quantificar, de forma precisa, a quantidade de água absorvida pelos materiais ao longo do período de avaliação do estudo.

$$TA\,H2O = \frac{mf - mi}{tf - ti} \qquad \text{Equação1}$$

TA H_2O = Taxa de absorção de água(g/h);

mf = massa final do corpo de prova no instante analisado(g);

mi= massa inicial, considerada a massa do corpo de prova à umidade de equilíbrio, após a aplicação do selante(g);

tf= instante final (h);

ti = instante inicial(h).

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

$$TH2O = \frac{mf - mi}{mi} x\,100 \qquad \text{Equação 2}$$

TH_2O = teor de massa de água absorvido (%);

mf = massa final do corpo-de-prova no instante analisado (g);

mi = massa inicial, considerada a massa do corpo-de prova à umidade de equilíbrio, após a aplicação do selante (g).

Os dados foram organizados e plotados utilizando o software Microsoft® Excel®, por meio do qual também foram realizados os cálculos referentes ao teor de água absorvido (%) e à taxa de absorção de água (g/h). Para as análises estatísticas, foi utilizado o software Jamovi.

3. Resultados e discurssões

A madeira de *Simarouba amara* Aubl apresentou diferenças expressivas na taxa de absorção de água entre os tratamentos avaliados. A testemunha registrou as maiores medianas, evidenciando alta permeabilidade quando não há proteção superficial. O óleo de linhaça também mostrou medianas elevadas , indicando baixa eficiência como barreira hídrica, e este resultado pode ser observado na tabela 1. Em contraste, a cera de carnauba, verniz comum e verniz naval reduziram significativamente a absorção, sobretudo quando aplicados em duas demãos. O verniz naval em duas demãos apresentou a menor mediana, destacando-se como o tratamento mais eficaz.

Tabela 1 - Análise descritiva da taxa de absorção de água (g/h)

Tratamento	Demão	Mediana	Desvio- Padrão
Cera de carnaúba	1	0,00252	0,00235
	2	0,00197	0,00142
Óleo de linhaça	1	0,00268	0,0116
	2	0,0026	0,01196
Testemunha	1	0,00493	0,02421
	2	0,00493	0,02421
Verniz comum	1	0,00334	0,00866
	2	0,00165	0,00269
Verniz naval	1	0,00231	0,00298
	2	0,000378	0,000868

A maior absorção observada na testemunha e no tratamento com óleo de linhaça está alinhada com a anatomia da *Simarouba amara* Aubl (marupá), uma madeira de baixa densidade (≈0,38 g/cm³) e porosidade difusa, características que favorecem a movimentação de água pelos vasos e raios (Carvalho, 2006; Lorenzi, 1992). Madeiras leves tendem a apresentar maior

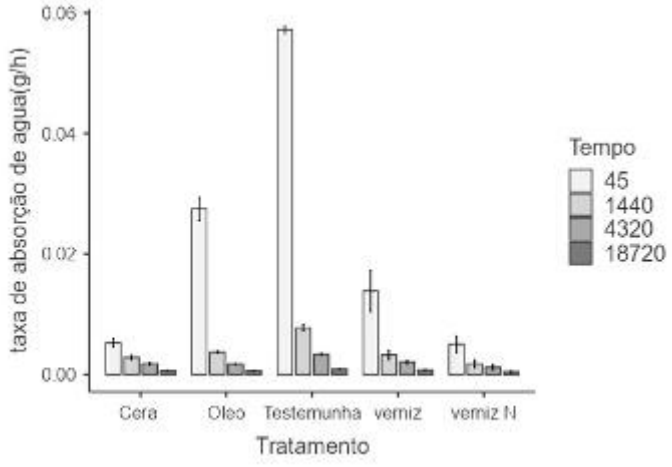
permeabilidade e menor resistencia natural a umidade, o que explica o comportamento incial sem proteção.

Tratamentos formadores de película, como vernizes, são reconhecidos por criar camadas contínuas que reduzem a permeabilidade superficial e limitam a interação da madeira com a água (Castro & Guimarães, 2018). Isso justifica a superioridade do verniz naval, cuja formulação mais densa favorece o bloqueio dos poros. A aplicação de duas demãos reforça esse efeito, pois aumenta a espessura da película e reduz a migração de umidade, comportamento amplamente documentado em estudos sobre acabamentos hidrorrepelentes (Hertel et al., 2024).

A cera de carnaúba apresentou desempenho intermediário. Embora forme uma barreira hidrofóbica, sua estrutura menos rígida permite maior movimentação de umidade, o que é coerente com resultados já observados em madeiras tropicais submetidas a tratamentos não poliméricos (Cerchiari, 2020).

A taxa de absorção foi maior no início da imersão (45 min) e diminuiu progressivamente nos tempos seguintes (1440, 4320 e 18720 min). A testemunha e o óleo de linhaça apresentaram os maiores valores em todos os períodos, enquanto a cera de carnaúba, verniz comum e principalmente verniz naval, mantiveram as menores taxas ao longo do tempo. Em 18720 min, todos os tratamentos estabilizaram em valores muito baixos, com o verniz naval permanecendo como o mais eficiente esses resultados podem ser observados no gráfico 1.

Gráfico1- Representação gráfica sobre a taxa de absorção de água(g/h) ao longo do tempo.



A redução da absorção ao longo do tempo reflete o comportamento natural da madeira, que absorve água rapidamente no início e desacelera conforme se aproxima da saturação (Borges & Quirino, 2004). A *Simarouba amara*, por ser leve e porosa, apresenta maior absorção

inicial (Carvalho, 2006; Lorenzi, 1992). Tratamentos formadores de película, como vernizes, reduzem essa entrada de água ao longo de todo o período, com o verniz naval sendo o mais

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

eficiente (Castro & Guimarães, 2018). A cera oferece proteção intermediária, enquanto o óleo permanece pouco eficaz, pois não forma barreira superficial rígida (Cerchiari, 2020).

4. Conclusão

✔️ A madeira sem tratamento apresentou a maior absorção de água, confirmando sua alta permeabilidade natural.

✔️ O óleo de linhaça reduziu pouco a absorção, mostrando baixa eficiência como impermeabilizante.

✔️ A cera de carnaúba ofereceu proteção moderada, com desempenho intermediário.

✔️ Os vernizes foram os tratamentos mais eficazes, especialmente o verniz naval, que manteve as menores taxas em todos os tempos.

✔️ O aumento do tempo de imersão reduziu a taxa de absorção em todos os tratamentos, mas a proteção foi claramente superior nos produtos formadores de película.

✔️ Conclui-se que o verniz naval é a melhor opção para impermeabilizar *Simarouba amara*, (marupá) garantindo maior estabilidade frente à umidade.

✔️

5. Agradecimentos

Agradeço ao Grupo de Pesquisa GMABIO, da Universidade Federal Rural da Amazônia, sob a coordenação da Profa. Selma Lopes Goulart, pelo apoio, dedicação e contribuição científica que enriqueceram de forma significativa este trabalho.

Ao CNPq - Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (Processo nº 406053/2022-7) pelo financiamento do projeto “Geração de bionergia a partir de resíduos do manejo florestal sustentável: descentralização da matriz energética e impactos socioambientais na Amazônia”, sob coordenação do Prof. Thiago de Paula Protásio.

Agradeço ao Grupo Keilla Florestal, cujo apoio especialmente na oferta de materiais madeireiros e na colaboração de sua equipe foi essencial para a realização dos projetos e para o desenvolvimento desta pesquisa em tecnologia da madeira.

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

6. Referências bibliográficas

Almeida, D. H., et al. (2016). Determinação da rigidez de *Pinus elliottii* em diferentes teores de umidade por meio de ensaios mecânicos não destrutivos. *Scientia Forestalis*, 44(110), 303–309.

Borges, L. M., & Quirino, W. F. (2004). Higroscopicidade da madeira de *Pinus caribaea* var. *hondurensis* tratada termicamente. *Revista Biomassa & Energia*, 1(2), 173–182.

Carvalho, P. E. R. (2006). *Espécies arbóreas brasileiras: Marupá (Simarouba amara)* (Vol. 3). Embrapa.

Carvalho, P. E. R. (2008). *Espécies arbóreas brasileiras* (Vol. 3, pp. 367–374). Embrapa Informação Tecnológica.

Castro, V. G., & Guimarães, P. P. (2018). *Deterioração e preservação da madeira*. Mossoró: Edufersa.

Cerchiari, A. M. F. (2020). Cola impermeabilizante para madeira à base de óleo de mamona. *A Lavoura*.

Costa, A. L. de S., & Cabral, C. P. T. (2023). Madeiras nativas atacadas por agentes xilófagos durante o processo de secagem no Estado do Amapá. In *Engenharia Florestal: Desafios, Limites e Potencialidade*.

Finaar. (2024, março 15). *Como preparar e proteger madeira contra umidade e mofo: guia completo*. Finaar.

Gallio, E., Zanatta, P., Ribes, D. D., Beltrame, R., & Gatto, D. A. (2018). Higroscopicidade da

madeira de três espécies florestais deterioradas por térmitas *Nasutitermes*. *Pesquisa Florestal Brasileira*, 38.

Hanada, R. E., et al. (2003). Fungos manchadores e emboloradores em madeiras da Amazônia. *Pesquisa Florestal Brasileira*, 43, 55–62.

Hertel, L. R., Ferrari, M., & D'Amelio, M. T. S. (2024). Desenvolvimento de impermeabilizante à base de poliestireno expandido. *Revista Ensaios Pioneiros*, 8(1).

Lorenzi, H. (1992). *Árvores brasileiras: Manual de identificação e cultivo de plantas arbóreas nativas do Brasil* (Vol. 1, p. 326). Instituto Plantarum.

Parma, A. P., & Icimoto, F. H. (2023). Patologias em estruturas de madeira ocasionadas por agentes bióticos e abióticos. UNIARA.

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Índices de qualidade das fibras da madeira de *Paulownia fortunei* var. Mikado para produção de celulose e papel

Camila Alves Corrêa[1]; Alexsandro Bayestorff da Cunha[1]; Polliana D'Angelo Rios[1]; Natalia Durigon Melo[1]; Tarcisio Francisco de Camargo[1]; Nicolas Costa Pucci[1]; Maickele Aparecida Muniz[1]; Marine Alves Antonello[1].

[1] Universidade do Estado de Santa Catarina

Resumo: A espécie *Paulownia fortunei* var. Mikado é mundialmente reconhecida pelo rápido crescimento em plantios homogêneos, o que vem despertando interesse de produtores no Brasil. As características anatômicas e os índices de qualidade das fibras da madeira de *Paulownia fortunei* foram avaliados para determinar seu potencial para a produção de celulose e papel. Foram analisadas cinco árvores com 5 e 8 anos de idade oriundas do Estado de Santa Catarina, considerando três posições radiais: próxima à medula, intermediária e próxima à casca. A posição radial influenciou significativamente as dimensões das fibras, enquanto a idade apresentou efeito apenas associado à posição próxima da casca para o diâmetro do lúmen, que foi menor na madeira com oito anos. As fibras apresentaram índices tecnológicos favoráveis, indicando o potencial da madeira para a produção de celulose e papel, destacando-se os baixos valores do índice de Runkel, os elevados coeficientes de flexibilidade e a reduzida fração parede.

Palavras-chave: Anatomia da madeira; Posição radial; Lenho juvenil.

Quality indexes of the wood fibers of *Paulownia fortunei* var. Mikado for pulp and paper production

Abstract: The species *Paulownia fortunei* var. Mikado is recognized worldwide for its rapid growth in homogeneous plantations, which has aroused the interest of producers in Brazil. The anatomical characteristics and quality indices of the fibers of *Paulownia fortunei* wood were evaluated to determine its potential for pulp and paper production. Five 5 and 8-year-old trees from the State of Santa Catarina were analyzed, considering three radial positions: close to the medulla, intermediate and close to the bark. The radial position significantly influenced the dimensions of the fibers, while the age showed an effect only associated with the position close to the bark for the lumen diameter, which was smaller in the eight-year-old wood. The fibers presented favorable technological indexes, indicating the potential of wood for the production of pulp and paper, highlighting the low values of the Runkel index, the high flexibility coefficients and the reduced wall fraction.

Keywords: Wood anatomy; Radial position; Juvenile wood.

1. Introdução

A taxa de crescimento é considerada uma das principais características de interesse em espécies florestais destinadas a plantações, em razão da crescente demanda global por matérias-primas para diferentes setores industriais. A espécie *Paulownia fortunei* var. Mikado, nativa da China, é mundialmente reconhecida pelo rápido crescimento em plantios homogêneos, o que, nos últimos anos, vem despertando interesse de produtores na região Sul do Brasil. A espécie já foi indicada como matéria-prima potencial para a produção de celulose e papel em diversos

países (Rai *et al*., 2000; Ashori & Nourbakhsh, 2009; Kiaei, 2013). Entretanto, no Brasil, os estudos sobre a tecnologia da madeira dessa espécie ainda são incipientes, não sendo encontrados trabalhos que avaliem as características anatômicas, os índices de qualidade das fibras e o potencial da madeira produzida em condições brasileiras para a produção de celulose e papel.

As características anatômicas das fibras desempenham papel fundamental na avaliação da aptidão de matérias-primas lignocelulósicas para a produção de celulose e papel, uma vez que as fibras constituem o principal componente estrutural do papel, sendo determinantes para suas propriedades físicas e mecânicas (Ashori & Nourbakhsh, 2009).

Com base nas dimensões das fibras, são obtidos índices amplamente utilizados para avaliar sua aptidão à produção de celulose e papel. Dentre eles, destacam-se o índice de Runkel, o coeficiente de flexibilidade, a fração parede e o índice de enfeltramento, os quais fornecem informações sobre o potencial de ligação entre as fibras e o desempenho esperado do papel produzido (Kiaei, 2013; Modes *et al*., 2019; Riki & Oluwafemi, 2020; Corrêa *et al*., 2026).

Neste contexto, o objetivo deste estudo foi avaliar as características anatômicas da madeira de *P. fortunei* aos 5 e 8 anos de idade, verificar a influência da posição radial sobre essas características e avaliar o potencial da espécie para a produção de celulose e papel por meio dos índices de qualidade das fibras.

2. Material e métodos

Foram utilizadas cinco árvores de *P. fortunei*, sendo três com 5 anos e duas com 8 anos, provenientes de um plantio comercial localizado no município de Riqueza, Santa Catarina. Dessas árvores, foram extraídos discos com 8 cm de espessura na posição correspondente ao DAP (1,30 m do solo). Posteriormente, de cada disco foi retirada uma bagueta radial, dividida em três partes para a obtenção de fragmentos próximos à medula (interno), na região intermediária (intermediário) e próximos à casca (externo), destinados à maceração (Figura 1).

O material macerado foi obtido a partir da dissociação dos elementos do lenho, seguindo a metodologia proposta por Franklin (1945), que consiste no armazenamento das amostras em frascos contendo uma solução de ácido acético glacial e peróxido de hidrogênio, na proporção de 1:1. Os frascos foram vedados e mantidos em estufa a 60 °C por 24 horas, visando à completa dissociação dos elementos celulares. Em seguida, o material foi lavado em água corrente para a remoção da solução e submetido à coloração com safranina a 1%. Posteriormente, foram montadas lâminas provisórias e realizadas 35 medições de cada parâmetro por posição radial em

cada árvore, totalizando 525 medições por parâmetro. Os parâmetros avaliados foram a largura, o comprimento e o diâmetro do lúmen das fibras, além do comprimento dos vasos.

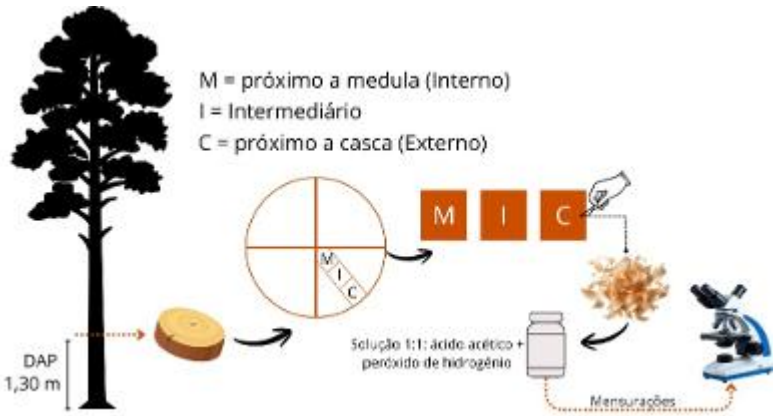


Figura 1 – Esquema metodológico de amostragem e obtenção do material macerado.

As mensurações dos elementos anatômicos foram realizadas utilizando o microscópio Leica DM500, equipado com câmera Leica ICC50 HD e o software Leica LAS Interactive Measurements, seguindo os procedimentos descritos pelo IAWA Committee (1989). Posteriormente, a espessura da parede da fibra foi determinada por meio da Equação 1 e, a partir das dimensões das fibras, foram calculados os seguintes índices de qualidade para produção de papel: índice de Runkel, coeficiente de flexibilidade, fração parede e índice de enfeltramento.

$$EP = \frac{(<- DU)}{2} \qquad (1)$$

Onde: EP = Espessura da parede da fibra; LT = Largura total da fibra; DU = Diâmetro do lúmen da fibra.

As análises estatísticas foram realizadas no software R, na interface RStudio. As variáveis anatômicas foram analisadas por meio de modelos lineares mistos, considerando a idade (5 e 8 anos), a posição radial (interno, intermediário e externo) e a interação entre esses fatores como efeitos fixos, e a árvore como efeito aleatório. Informando ao modelo que as observações provenientes da mesma árvore são correlacionadas, e que a posição é uma medida repetida dentro da árvore. A adequação dos modelos foi avaliada por meio da inspeção gráfica dos resíduos. Os efeitos dos fatores fixos foram avaliados por meio da ANOVA dos modelos lineares mistos, e quando foram identificados efeitos significativos, as comparações múltiplas foram realizadas pelo teste de Tukey. Em todas as análises, foi adotado o nível de significância de 5%.

3. Resultados e discussão

3.1 Dimensões dos elementos anatômicos

A Tabela 1 apresenta a estatística descritiva das variáveis anatômicas mensuradas na madeira de *P. fortunei* com 5 e 8 anos de idade, considerando, de forma conjunta, as três posições radiais. Observou-se que a espécie apresentou fibras com comprimento médio variando de 1019 µm a 1068 µm, para 5 e 8 anos, respectivamente, sendo classificadas como curtas em ambas as idades (IAWA Committee 1989). Os valores médios obtidos para o comprimento das fibras ficaram dentro do intervalo descrito na literatura internacional para a mesma espécie, entre 996 e 1420 µm (Rai *et al*., 2000; Ashori & Nourbakhsh, 2009; Kiaei, 2013).

Tabela 1 – Dimensões médias, mínimas, máximas, desvio padrão e coeficiente de variação para os elementos anatômicos da madeira de *P. fortunei* aos 5 e 8 anos de idade.

Idade	Variável (µm)	Média	Mínimo	Máximo	DP	CV%
5	Comprimento da fibra	1019,0	446,0	1686,0	265,0	26,0
	Largura da fibra	37,8	22,3	63,8	5,4	14,3
	Diâmetro do lúmen	31,3	18,6	55,8	5,2	16,7
	Espessura de parede	3,2	1,2	5,9	0,7	21,6
	Comprimento do vaso	373,0	210,0	556,0	66,0	17,7
8	Comprimento da fibra	1068,0	498,0	1737,0	250,0	23,4
	Largura da fibra	36,2	20,8	57,1	6,7	18,6
	Diâmetro do Lúmen	30,0	13,3	50,1	7,1	23,7
	Espessura de parede	3,1	1,1	7,2	1,1	34,6
	Comprimento do vaso	348,0	132,0	530,0	75,9	21,8

As fibras foram consideradas de parede delgada, pois, em ambas as idades, o diâmetro do lúmen foi aproximadamente cinco vezes maior que o dobro da espessura da parede da fibra (IAWA Committee 1989). Além disso, a largura média das fibras, o diâmetro médio do lúmen e a espessura da parede apresentaram valores muito semelhantes entre as duas idades. Os valores médios de largura das fibras e diâmetro do lúmen foram ligeiramente superiores aos descritos na literatura para a mesma espécie cultivada em outros países, cujos valores variaram entre 30 e 35,44 µm e entre 25,30 e 26,49 µm, respectivamente (Rai *et al*., 2000; Ashori & Nourbakhsh, 2009; Kiaei, 2013). Em contrapartida, os valores médios de espessura da parede obtidos neste estudo foram inferiores aos relatados pelos mesmos autores (5,25 a 6,47 µm). Essas diferenças entre madeiras da mesma espécie podem estar relacionadas às distintas condições de crescimento, bem como às diferenças na posição de amostragem ao longo do fuste.

O comprimento médio dos elementos de vaso variou de 348 µm a 373 µm, sendo ligeiramente inferior na madeira de 8 anos. De acordo com a classificação da IAWA, o valor obtido para a madeira de 8 anos enquadra-se na classe correspondente a elementos de vaso com comprimento ≤ 350 µm, enquanto o da madeira de 5 anos pertence à classe de 350 a 800 µm.

Ambos os valores estão dentro da variação previamente registrada para *P. fortunei* no banco de dados InsideWood (s.d.). Em comparação, esses valores foram superiores aos registrados por Tomczak *et al*. (2023) para o clone Shan Tong (*Paulownia fortunei* × *Paulownia tomentosa*) cultivado na Polônia, cujo comprimento médio dos elementos de vaso foi de 230 µm.



Figura 2 – Elementos anatômicos dissociados da madeira de *P. fortunei*: (A) fibra; (B) fibra; e (C) elemento de vaso.

3.2 Influência da idade e da posição radial

Para as variáveis comprimento da fibra, largura da fibra e espessura da parede, a análise de variância indicou ausência de efeito significativo do fator idade e da interação entre idade e posição radial. Em contrapartida, foi observado efeito principal significativo da posição radial. Assim, para essas variáveis, as comparações consideraram apenas o efeito principal da posição radial, agrupando as duas idades (Figura 3). Observou-se que o comprimento da fibra foi a variável mais influenciada pela posição radial, apresentando aumento significativo no sentido medula-casca e diferenças estatisticamente significativas entre as três posições avaliadas.

Esse comportamento de aumento do comprimento das fibras no sentido medula-casca já foi relatado para híbridos de *P. fortunei*, como o clone Shan Tong, no qual foi observada tendência de incremento no comprimento das fibras, variando de 748 µm no primeiro anel para 871 µm no quarto anel de crescimento (Tomczak *et al*., 2023). Tendência semelhante também foi descrita para outras espécies, como *Ochroma pyramidale* (Stange *et al*., 2021), *Pinus patula* (Modes *et al*., 2019) e *Eucalyptus grandis* (Trevisan *et al*., 2013).

A variação do comprimento das fibras na direção radial é atribuída à presença de uma zona de madeira juvenil próxima à medula, caracterizada, entre outros aspectos, por fibras mais curtas, paredes mais delgadas e maior ângulo microfibrilar na camada S2, características que influenciam diretamente a qualidade da madeira (Trevisan *et al*., 2013). De acordo com Ramos *et al*. (2011), o comprimento das fibras aumenta no sentido radial até determinado ponto, a partir do qual essa tendência deixa de ser linear, ocorrendo uma estabilização ou, em alguns casos, um discreto decréscimo.

É importante destacar que, embora tenha sido observado aumento do comprimento das fibras no sentido medula-casca, não foi verificada estabilização dessa variável nas posições avaliadas, indicando que a madeira de *P. fortunei* aos 5 e 8 anos ainda se encontra predominantemente na fase de formação de lenho juvenil.

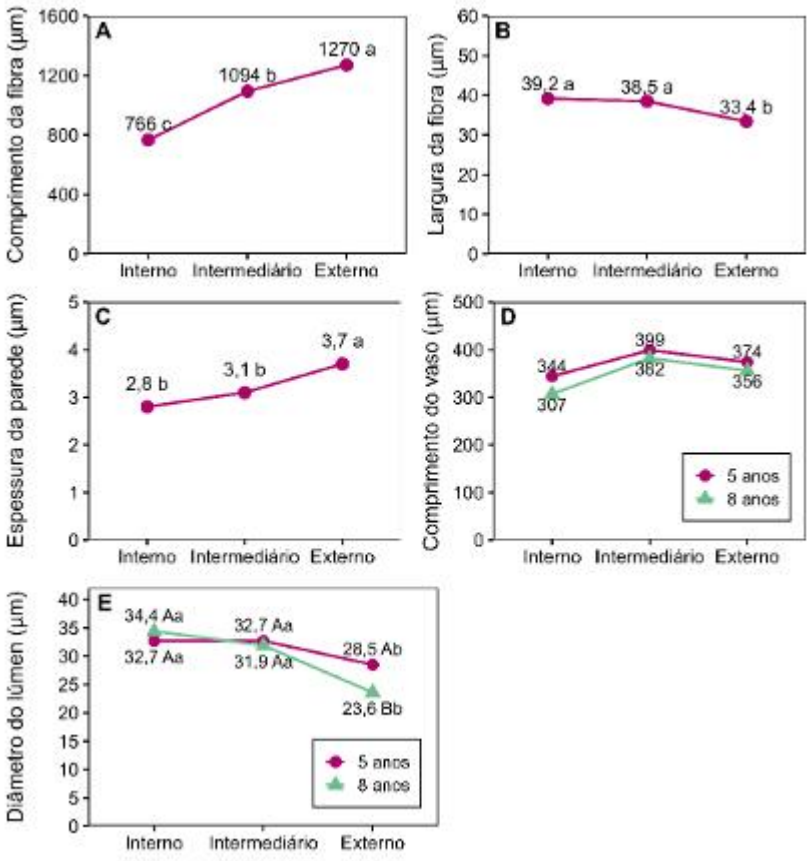


Figura 3 – Influência da posição radial e da idade nas características anatômicas das fibras e dos vasos da madeira de *P. fortunei*: (A) comprimento da fibra; (B) largura da fibra; (C) espessura da parede celular; (D) comprimento do vaso; e (E) diâmetro do lúmen da fibra. Nos painéis A, B e C, letras minúsculas distintas indicam diferenças significativas entre as posições radiais. No painel E, letras minúsculas diferentes indicam diferenças entre posições radiais dentro de cada idade, enquanto letras maiúsculas diferentes indicam diferenças entre as idades dentro de cada posição radial, segundo o teste de Tukey ($p < 0,05$).

Os valores de largura das fibras não apresentaram diferença significativa entre a posição próxima à medula (Interno) e a intermediária, mas ambas foram diferentes da posição mais próxima da casca (Externo), que apresentou média significativamente inferior. Comportamento semelhante foi observado para a espessura da parede, cujos valores médios também foram considerados iguais entre as posições Interno e Intermediário, diferindo da posição Externo, que apresentou média significativamente superior.

Para o diâmetro do lúmen, a análise de variância indicou efeito significativo da interação entre os fatores idade e posição radial. Dessa forma, foram realizadas comparações dentro dos

níveis de cada fator. Observou-se que a média dessa variável foi considerada igual entre as posições Interno e Intermediário em ambas as idades, com redução significativa na posição Externo. Entre as idades, a diferença foi observada apenas na posição Externo, em que a madeira de 8 anos apresentou menor diâmetro médio do lúmen em relação à madeira de 5 anos. Nas demais posições radiais, os valores não diferiram significativamente entre as idades.

Para a variável comprimento dos elementos de vaso, a análise de variância indicou ausência de efeito significativo dos fatores idade e posição radial, bem como da interação entre esses fatores. Resultado distinto foi relatado por Tomczak *et al*. (2023) para o clone Shan Tong, cultivado na Polônia, no qual foi observada tendência de aumento do comprimento dos elementos de vaso ao longo dos anéis de crescimento, variando de 212 µm no primeiro anel para 246 µm no quarto.

Em relação aos índices de qualidade das fibras para produção de papel (Tabela 2), observa-se que o índice de Runkel situou-se entre 0,25 e 0,50 na posição mais próxima da casca (Externo) e foi inferior a 0,25 nas demais posições (Interno e Intermediário), classificando a madeira de *P. fortunei*, em ambas as idades, nos grupos II e I, respectivamente. Conforme a classificação proposta por Runkel (1952) e citada por Paula (1999), madeiras pertencentes ao grupo I são consideradas excelentes para a produção de papel, enquanto aquelas enquadradas no grupo II são classificadas como muito boas. Esses resultados indicam que as fibras de *P. fortunei* apresentam elevada capacidade de colapso durante a formação da folha, proporcionando maior área de contato entre as fibras e, consequentemente, maior resistência à tração e ao estouro do papel, quando comparadas a espécies com índice de Runkel mais elevado (Modes *et al*., 2019).

O valor médio do índice de Runkel foi inferior ao obtido por Kiaei (2013) para a mesma espécie cultivada no Irã (0,42). Segundo Ashori e Nourbakhsh (2009), que também avaliaram a madeira de *P. fortunei* cultivada no Irã, as características de fibras curtas e paredes delgadas favorecem a produção de papéis mais densos, com menor resistência ao rasgo, porém com maior resistência ao estouro e à tração.

Tabela 2 – Valores médios dos índices de qualidade das fibras da madeira de *P. fortunei* em função da idade e da posição radial.

Idade	Parâmetros	Interno	Intermediário	Externo
5	Índice de Runkel	0,19	0,20	0,25
	Coeficiente de flexibilidade (%)	83,91	83,62	79,95
	Fração parede (%)	16,09	16,38	20,05
	Índice de enfeltramento	18,96	27,79	36,30
8	Índice de Runkel	0,15	0,19	0,34

Coeficiente de flexibilidade (%)	87,17	84,10	75,02
Fração parede (%)	12,83	15,90	24,98
Índice de enfeltramento	21,19	30,23	41,72

Os valores médios do coeficiente de flexibilidade superiores a 80% nas posições Interno e Intermediário indicam o elevado potencial de união entre as fibras durante a formação do papel, uma vez que o grau de ligação depende, em grande parte, da flexibilidade das fibras individuais (Kiaei, 2013). Na posição Externo, os valores desse índice foram ligeiramente inferiores, em decorrência do aumento da espessura da parede celular. Ainda assim, permaneceram elevados, indicando adequada capacidade de união entre as fibras.

A posição mais próxima à medula (Interno) e a intermediária apresentaram fração parede inferior a 20%, enquanto a posição mais próxima da casca (Externo) apresentou valores entre 20% e 24%, indicando fibras de rigidez muito baixa a baixa. De acordo com Riki e Oluwafemi (2020), fibras com baixa rigidez apresentam maior capacidade de conformação durante a formação da folha, resultando em papéis com maior brilho e menor porosidade, características desejáveis para papéis destinados à impressão, escrita, embalagem e acondicionamento. Shimoyama e Wiecheteck (1993) afirmam que o ideal é que a fração parede seja inferior a 40% para produção de papéis com adequada resistência à tração e ao estouro. Os valores de fração parede obtidos neste estudo são consistentes com aqueles descritos na literatura internacional. Fos *et al*. (2023), por exemplo, observaram que a fração parede do clone Cotevisa 2 (*Paulownia elongata* × *Paulownia fortunei*) cultivado na Espanha aumentou gradualmente do primeiro anel (14%) para o quinto e o sexto anéis (18% e 19%). Valor semelhante também foi registrado por Kiaei (2013) para *P. fortunei* cultivada no Irã, cuja fração parede foi de 17,41%.

O índice de enfeltramento também apresentou aumento no sentido medula-casca, decorrente do incremento do comprimento das fibras neste sentido, associado às pequenas variações na largura das fibras. Os valores médios obtidos para a posição Externo foram semelhantes aos descritos para a mesma espécie, variando entre 29,3 e 33,1, bem como ao valor de 34,9 registrado para o clone Cotevisa 2 (Ashori & Nourbakhsh, 2009; Kiaei, 2013; Kulak *et al*., 2024). Segundo Riki e Oluwafemi (2020), índices de enfeltramento reduzidos estão associados à presença de fibras mais curtas e relativamente mais espessas, o que tende a reduzir a resistência ao rasgo do papel. Assim, considerando que o índice de enfeltramento é inferior a 50, essa espécie tenderia a apresentar menor desempenho na produção de papéis com resistência ao rasgo (Souza Jr. *et al*., 2025).

Em comparação aos clones comerciais de *Eucalyptus* descritos por Souza Jr. *et al*. (2025), *P. fortunei* apresentou menores valores de índice de Runkel e fração parede e maior coeficiente de flexibilidade, indicando maior capacidade de colapso e de formação de ligações interfibras. Por outro lado, apresentou menor índice de enfeltramento, sugerindo menor potencial para resistência ao rasgo quando utilizada isoladamente.

4. Conclusões

Com base nos resultados obtidos, conclui-se que a madeira de *Paulownia fortunei* var. Mikado, aos 5 e 8 anos de idade, apresenta características anatômicas compatíveis com seu emprego na produção de celulose de fibra curta. As fibras apresentaram índices tecnológicos favoráveis, indicando o potencial da madeira para essa finalidade, destacando-se os baixos valores do índice de Runkel, os elevados coeficientes de flexibilidade e os reduzidos valores de fração parede. Para a produção de papéis que exijam maior resistência ao rasgo, uma possibilidade a ser avaliada é a utilização dessa matéria-prima em mistura com polpas de fibras longas, visando melhorar o desempenho mecânico do produto final. Entre as idades avaliadas, as diferenças foram pouco expressivas, enquanto a posição radial exerceu maior influência sobre as dimensões das fibras e os índices tecnológicos.

5. Referências bibliográficas

Ashori, A., & Nourbakhsh, A. (2009). Studies on Iranian cultivated *Paulownia*: A potential source of fibrous raw material for paper industry. *European Journal of Wood and Wood Products, 67*(3), 323–327. https://doi.org/10.1007/s00107-009-0326-0

Corrêa, C.A., da Cunha, A. B., da Silva Santos, S., de Camargo, T. F., Rodrigues, T. M., Souza, G. de O., Ribeiro, L. de L., Vieira, H. C., Rios, P. D., & Brand, M. A. (2026). Technological properties and uses of wood from *Paulownia fortunei* and its hybrids: a systematic review. *European Journal of Wood and Wood Products, 84*, 80. https://doi.org/10.1007/s00107-026-02441-1

Franklin, G. L. (1945). Preparation of thin sections of synthetic resins and wood-resin composites, and a new macerating method for wood. *Nature, 155*(3924), 51. https://doi.org/10.1038/155051a0

Fos, M., Oliver-Villanueva, J. V., & Vázquez, M. (2023). Radial variation in anatomical wood characteristics and physical properties of *Paulownia elongata x Paulownia fortunei* hybrid Cotevisa 2 from fast-growing plantations. *European Journal of Wood and Wood Products, 81*, 819–831. https://doi.org/10.1007/s00107-023-01941-8

IAWA Committee. (1989). IAWA list of microscopic features for hardwood identification. *IAWA Bulletin, 10*(3), 219–332.

InsideWood. (s.d.). *InsideWood database*. North Carolina State University. Recuperado em 27 de julho de 2026, de http://insidewood.lib.ncsu.edu/search

Kulak, P., Komorowicz, M., & Lachowicz, H. (2024). Fibre morphological characteristics, chemical composition and fuel properties of *Paulownia* COTEVISA-2 wood. *European Journal of Wood and Wood Products, 82*, 1605–1614. https://doi.org/10.1007/s00107-024-02108-9

Modes, K. S., Ludwig, R. L., Vivian, M. A., & Stolberg, J. (2019). Wood quality of *Pinus patula* Schltdl. & Cham. for pulp production. *Revista Árvore, 43*(2), e430207. https://doi.org/10.1590/1806-90882019000200007

Paula, J. E. (1999). Caracterização anatômica de madeiras nativas do cerrado com vistas à produção de energia. *Cerne, 5*(2), 26–40.

Ramos, L. M. A., Latorraca, J. V. F., Pastro, M. S., Souza, M. T., Garcia, R. A., & Carvalho, A. M. (2011). Variação radial dos caracteres anatômicos da madeira de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden e idade de transição entre lenho juvenil e adulto. *Scientia Forestalis, 39*(92), 411–418.

Riki, J., & Oluwadare, A. (2020). Fibre characteristics of *Delonix regia* (Hook.) Raf. wood as indices of its suitability for papermaking. *American Scientific Research Journal for Engineering, Technology, and Sciences, 70*(1), 34–54. https://asrjetsjournal.org/American_Scientific_Journal/article/view/5947

Shimoyama, V. R. S., & Wiecheteck, M. S. S. (1993). Características da madeira e da pasta termomecânica de *Pinus patula* var. *tecunumanii* para produção de papel de imprensa. *IPEF, 9*(27), 63–80.

Sousa Júnior, W. P., Carvalho, A. M. M. L., Carneiro, A. C. O., Demuner, I. F., Oliveira, R. S., Reis, L. A. C., & Moretti, S. A. (2025). Fiber quality indices of *Corymbia* spp. and *Eucalyptus* spp. wood for the selection of genetic materials for pulp production. *Revista Árvore, 49(1)*, e4904. https://doi.org/10.53661/1806-9088202549263840

Stange, R., Buss, R., Souza, L. M., Melo, N. D., Monteiro, T. C., & Rios, P. D. A. (2021). Variation of the technological properties of wood from *Ochroma pyramidale* in the longitudinal and radial sense of the slew. *Floresta, 51*(4), 820 -829. https://doi.org/10.5380/rf.v51i4.72952

Tomczak, K., Mania, P., Jakubowski, M., & Tomczak, A. (2023). Radial Variability of Selected Physical and Mechanical Parameters of Juvenile Paulownia Wood from Extensive Cultivation in Central Europe—Case Study. *Materials, 16*(7), 2615. https://doi.org/10.3390/ma16072615

Trevisan, R., Souza, J. T., Denardi, L., Haselein, C. R., & Santini, E. J. (2013). Efeito do desbaste no comprimento das fibras da madeira de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden. *Ciência Florestal, 23*(2), 461–473. https://doi.org/10.5902/198050989290

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Influência da composição química estrutural no poder calorífico de madeiras nativas da Mata Atlântica em restauração

Carolina Maria Filardi Cimino Silva[1]; Edna Lopes Mendes Rosado[1]; William Colatino Martins[1]; Gabriel Matos Diniz[1]; Ana Júlia Alves Pereira[1]; Evanderson Luis Capelete Evangelista[1]; Angélica de Cassia Oliveira Carneiro[1]; Vinicius Resende de Castro[1]

[1] Universidade Federal de Viçosa

Resumo: A ampliação de plantios com espécies nativas da Mata Atlântica representa uma estratégia para integrar restauração florestal, armazenamento de carbono e aproveitamento sustentável da biomassa. Entretanto, a limitada caracterização química e energética dessas espécies restringe a avaliação do seu potencial de utilização em cadeias produtivas sustentáveis. Neste contexto, este estudo avaliou a influência da composição química no poder calorífico superior da madeira de *Joannesia princeps*, *Cariniana legalis* e *Dalbergia nigra*, provenientes de plantios sustentáveis da Mata Atlântica, visando subsidiar o aproveitamento energético dos resíduos gerados durante o processamento industrial dessas espécies. Foram determinados os teores de extrativos, lignina e holoceluloses, relacionando-os ao desempenho energético. A espécie *Cariniana legalis* apresentou o maior PCS (19,23 MJ kg^{-1}), associado ao elevado teor de lignina (31,37%). A análise de correlação de Pearson confirmou associação significativa entre o PCS e a composição química, com correlação positiva com a lignina ($r = 0,78$; $p < 0,05$) e negativa com a holoceluloses ($r = -0,75$; $p < 0,05$), enquanto os extrativos não apresentaram correlação significativa ($r = 0,28$; $p > 0,05$). A composição química demonstrou papel fundamental na qualidade energética da biomassa, evidenciando o potencial desses resíduos como fonte renovável para sistemas de bioenergia.
Palavras-chave: Resíduos, potencial energético, sustentabilidade.

Influence of structural chemical composition on the heating value of native woods from the Atlantic Forest under restoration

Abstract: The expansion of plantings with native Atlantic Forest species represents a strategy for integrating forest restoration, carbon storage, and sustainable biomass utilization. However, the limited chemical and energetic characterization of these species restricts the assessment of their potential use in sustainable production chains. In this context, this study evaluated the influence of chemical composition on the higher heating value (HHV) of wood from *Joannesia princeps*, *Cariniana legalis*, and *Dalbergia nigra*, sourced from sustainable Atlantic Forest plantations, aiming to support the energy utilization of residues generated during the industrial processing of these species. Extractives, lignin, and holocellulose contents were determined and related to energy performance. *Cariniana legalis* presented the highest HHV (19.23 MJ kg^{-1}), associated with a high lignin content (31.37%). Pearson correlation analysis confirmed a significant association between HHV and chemical composition, with a positive correlation with lignin content ($r = 0.78$; $p < 0.05$) and a negative correlation with holocellulose content ($r = -0.75$; $p < 0.05$), while extractives showed no significant correlation ($r = 0.28$; $p > 0.05$). Chemical composition proved to play a fundamental role in the energy quality of the biomass, highlighting the potential of these residues as a renewable source for bioenergy systems.
Keywords: Residues, energy potential, sustainability.

1. Introdução

A crescente demanda mundial por energia, associada à necessidade de redução das emissões de gases de efeito estufa provenientes dos combustíveis fósseis, tem impulsionado a busca por fontes renováveis capazes de conciliar segurança energética, sustentabilidade ambiental e desenvolvimento econômico. Nesse contexto, a biomassa lignocelulósica destaca-se como uma alternativa estratégica por apresentar ampla disponibilidade, capacidade de armazenamento de carbono e potencial de conversão em diferentes formas de energia (Martins & Carrino, 2023). Paralelamente, iniciativas de restauração florestal com espécies nativas têm aumentado em diferentes regiões tropicais, especialmente na Mata Atlântica brasileira, um dos biomas mais biodiversos e ameaçados do planeta (Joly et al., 2014).

Embora esses plantios sejam comumente associados ao sequestro de carbono e recuperação ambiental (Azevedo et al., 2018), o seu manejo sustentável representa uma oportunidade para integrar conservação ambiental e bioeconomia florestal, ao disponibilizar madeira o longo do seu ciclo produtivo (Krainovic et al., 2025). Apesar dessa perspectiva, ainda existem limitações quanto ao conhecimento das características energéticas de madeiras e seus resíduos, provenientes de espécies nativas cultivadas em sistemas de restauração florestal. A composição química da madeira exerce papel fundamental na determinação do potencial energético, sendo a lignina, os extrativos e a proporção entre componentes estruturais da parede celular importantes indicadores da qualidade da biomassa (Vale et al., 2010), influenciando diretamente o poder calorífico e, consequentemente, a eficiência de conversão energética da madeira.

Dessa forma, a caracterização química torna-se essencial para identificar espécies nativas com maior aptidão para geração de energia e agregação de valor, tornando fundamental compreender a relação entre composição química estrutural e poder calorífico da madeira de espécies nativas da Mata Atlântica provenientes de manejo sustentável em sistemas de restauração produtiva, como Boleira (*Joannesia princeps*), Jacarandá-da-Bahia (*Dalbergia nigra*) e Jequitibá-rosa (*Cariniana legalis*), para ampliar as possibilidades de uso da biomassa florestal e fortalecer modelos de economia circular baseados em recursos renováveis. Assim, o presente estudo teve como objetivo estudar a correlação existente entre a composição química estrutural e o poder calorífico superior de madeiras de espécies nativas da Mata Atlântica, visando obter seu potencial energético, em sistema de manejo sustentável, principalmente a partir de seus resíduos.

2. Material e métodos

2.1 Área de estudo e seleção das espécies

O estudo foi realizado utilizando madeiras provenientes de plantios comerciais de espécies nativas da Mata Atlântica conduzidos pela empresa Symbiosis Investimentos, localizados no município de Porto Seguro, estado da Bahia, Brasil. Foram avaliadas três espécies arbóreas nativas: *J. princeps* (boleira), *C. legalis* (jequitibá-rosa) e *D. nigra* (jacarandá-da-Bahia).

Foram selecionadas dez árvores por espécie, totalizando 30 indivíduos amostrados. A seleção considerou árvores representativas dos povoamentos, sem presença de defeitos aparentes ou danos fitossanitários. Após o abate, foram coletados discos representativos ao longo do fuste nas posições correspondentes a 0, 25, 50 e 75% da altura comercial.

2.2 Preparação das amostras

Os materiais coletados foram encaminhados ao Laboratório de Painéis e Energia da Madeira (LAPEM/UFV), onde, de cada disco, foi utilizado 1/4 da seção transversal. As frações dos discos correspondentes às quatro posições ao longo do fuste (0, 25, 50 e 75% da altura comercial) foram homogeneizadas, constituindo uma amostra composta por árvore. Em seguida, o material foi processado em moinho de facas e peneirado, sendo utilizada, nas análises químicas, a fração de serragem que passou pela peneira de 40 mesh e ficou retida na peneira de 60 mesh.

2.3 Caracterização química estrutural

Os teores de extrativos totais foram determinados conforme a norma TAPPI 264 cm-22, utilizando extração em solvente etanol/tolueno. O teor de lignina insolúvel foi determinado pelo método Klason, conforme TAPPI T222 om-88, enquanto a lignina solúvel foi quantificada por espectrofotometria de acordo com TAPPI UM-250. O teor de lignina total foi obtido pela soma das frações insolúvel e solúvel.

O teor de holoceluloses foi calculado pela diferença entre os componentes estruturais da biomassa, considerando a soma dos teores de extrativos, lignina total e cinzas.

2.4 Determinação do poder calorífico superior

O poder calorífico superior (PCS) foi determinado conforme a norma DIN EN 14918 utilizando bomba calorimétrica, com amostras previamente secas e homogeneizadas. As análises foram realizadas em duplicata e os resultados expressos em MJ kg^{-1} de biomassa seca.

2.5 Análise estatística

O experimento foi conduzido em delineamento inteiramente casualizado, considerando as espécies como tratamentos e as árvores como unidades experimentais. Os dados foram submetidos à análise de variância (ANOVA) e, quando observadas diferenças significativas, as médias foram comparadas pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$). Adicionalmente, foi realizada análise de correlação de Pearson para avaliar a associação linear entre o poder calorífico superior e os constituintes químicos estruturais da biomassa.

3. Resultados e discussão

Os resultados da caracterização química estrutural e energética demonstraram diferenças significativas entre as espécies avaliadas, evidenciando que a composição química da biomassa exerce influência direta sobre seu potencial para utilização energética. O poder calorífico superior variou entre 18,60 e 19,23 MJ kg^{-1}, sendo o maior valor observado para o resíduo de Jequitibá-rosa (*C. legalis*), enquanto o Jacarandá-da-Bahia (*D. nigra*) apresentou o menor desempenho energético (Tabela 1).

Tabela 1. Resultados médios da caracterização energética (PCS – poder calorífico superior) e da análise química estrutural (EXT – extrativos; LIG – lignina total; e HOL – holoceluloses) das três espécies nativas avaliadas.

Parâmetro	**Boleira** *J. princeps*	**Jequitibá-rosa** *C. legalis*	**Jacarandá-da-Bahia** *D. nigra*
PCS (MJ kg^{-1})	18,84 ± 0,18 b	19,23 ± 0,14 a	18,60 ± 0,19 c
EXT (%)	6,23 ± 0,38 a	6,68 ± 1,16 a	6,30 ± 1,17 a
LIG (%)	27,51 ± 1,06 b	31,37 ± 0,90 a	27,86 ± 0,94 b
HOL (%)	66,26 ± 1,30 a	61,95 ± 1,49 b	65,85 ± 1,71 a

O maior potencial energético do Jequitibá-rosa esteve associado ao elevado teor de lignina (31,37%), significativamente superior às demais espécies avaliadas. A lignina apresenta estrutura aromática rica em carbono e menor grau de oxidação em comparação aos carboidratos estruturais, favorecendo maior liberação de energia durante processos termoquímicos. Dessa

forma, o aumento da participação da fração de lignina contribui para elevar a eficiência energética da biomassa, conforme observado em estudos anteriores com diferentes espécies florestais (Protásio et al., 2014).

O menor valor de poder calorífico observado para o Jacarandá-da-Bahia está associado ao maior teor de holoceluloses dessa espécie. As holoceluloses correspondem à fração formada por celulose e hemiceluloses, polímeros que apresentam maior teor de oxigênio e menor estabilidade térmica comparados à lignina, resultando em menor potencial energético durante a conversão termoquímica da biomassa (Teixeira, 2018). Esses resultados evidenciam que diferenças na composição química estrutural influenciam diretamente o desempenho energético das espécies avaliadas.

Com o objetivo de complementar a interpretação das diferenças observadas entre as espécies, foi realizada uma análise de correlação de Pearson entre o poder calorífico superior e os constituintes químicos estruturais das biomassas (Figura 1).

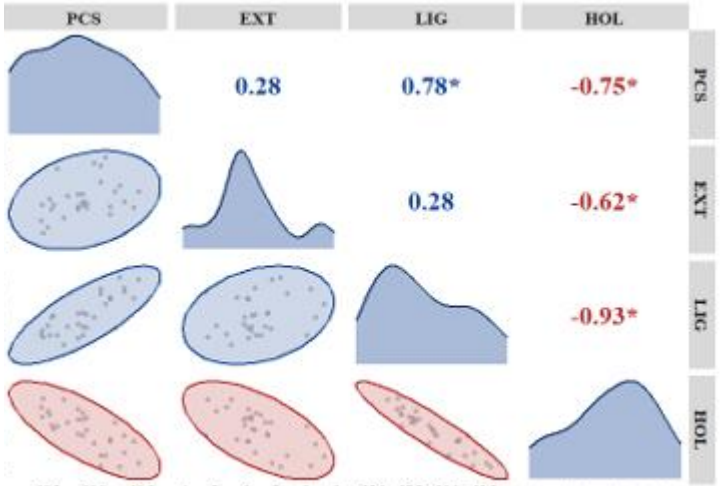


Figura 1. Matriz de correlação de Pearson entre o poder calorífico superior (PCS) e os parâmetros da composição química estrutural das espécies nativas avaliadas. O asterisco (*) indica correlação significativa a 5% de probabilidade

O poder calorífico superior apresentou forte correlação positiva com o teor de lignina ($r = 0,78$; $p < 0,05$) e forte correlação negativa com o teor de holoceluloses ($r = -0,75$; $p < 0,05$), evidenciando que biomassas com maior proporção de lignina tendem a apresentar maior potencial energético. Em contrapartida, os extrativos não apresentaram correlação significativa com o poder calorífico superior ($r = 0,28$; $p > 0,05$), indicando que essa fração não exerceu influência relevante sobre as diferenças energéticas observadas entre as espécies avaliadas.

Além disso, a forte correlação negativa entre lignina e holoceluloses ($r = -0,93$; $p < 0,05$) evidencia a relação inversa entre esses constituintes estruturais, característica típica de biomassas lignocelulósicas.

Os resultados demonstram que as espécies nativas avaliadas apresentam características energéticas distintas, reforçando a necessidade de sua caracterização antes da definição de rotas tecnológicas para aproveitamento energético. Esses achados são particularmente relevantes para sistemas de manejo sustentável e restauração florestal, nos quais a geração de resíduos pode representar uma oportunidade de agregação de valor por meio da produção de bioenergia.

Os valores encontrados neste estudo estão dentro da faixa reportada para biomassas florestais utilizadas energeticamente, demonstrando que a madeira de espécies nativas da Mata Atlântica apresenta composição química favorável ao aproveitamento energético dos resíduos gerados ao longo de seu processamento industrial. Entretanto, a seleção da biomassa para aplicações industriais deve considerar não apenas o poder calorífico, mas também propriedades complementares como densidade energética, teor de cinzas, composição elementar e comportamento durante processos termoquímicos. Assim, os resultados evidenciam que a composição química estrutural da madeira constitui um importante indicador da qualidade energética dos resíduos dela derivados, permitindo direcionar estratégias de aproveitamento energético de biomassa oriunda do processamento de madeira de espécies nativas cultivadas em plantios sustentáveis.

4. Conclusões

As três madeiras provenientes de manejo sustentável em plantios de restauração produtiva de espécies nativas da Mata Atlântica apresentaram potencial energético significativo, evidenciando a possibilidade de sua valorização como matéria-prima para geração de bioenergia. Entre as espécies avaliadas, o Jequitibá-rosa (*C. legalis*) apresentou o maior poder calorífico superior (19,23 MJ kg^{-1}), resultado associado ao maior teor de lignina (31,37%) e à menor proporção de holoceluloses, confirmando, por meio da correlação de Pearson, a influência direta da lignina ($r = 0,78$) e das holoceluloses ($r = -0,75$) sobre o poder calorífico da biomassa ($p < 0,05$).

A variação observada entre as espécies demonstra que a caracterização química da madeira é fundamental para a seleção de resíduos florestais destinados a aplicações energéticas, uma vez que características como teor de lignina, carbono estrutural e composição dos polímeros da parede celular determinam a eficiência do processo de conversão energética.

Os resultados obtidos contribuem para ampliar o conhecimento sobre o aproveitamento de resíduos oriundos de sistemas de manejo florestal sustentável, agregando valor a materiais que frequentemente apresentam baixo aproveitamento econômico. Dessa forma, a utilização desses resíduos como fonte renovável de energia representa uma estratégia alinhada aos princípios da bioeconomia circular, associando conservação florestal, redução de desperdícios e substituição parcial de fontes energéticas fósseis.

5. Agradecimentos

Ao Departamento de Engenharia Florestal (DEF/UFV), ao Laboratório de Painéis e Energia da Madeira (LAPEM), e à Universidade Federal de Viçosa (UFV) pela infraestrutura e suporte concedidos. Os autores agradecem também à EMBRAPII Unidade Fibras Florestais, e à empresa Symbiosis Investimentos.

6. Referências bibliográficas

Demirbas, A. (2017). Higher heating values of lignin types from wood and non-wood lignocellulosic biomasses. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, *39*(6), 592-598. https://doi.org/10.1080/15567036.2016.1248798

Deutsches Institut für Normung. (2010). *Solid biofuels: Determination of calorific value* (Standard No. DIN EN 14918).

Azevedo, A. D., Camara, R., Francelino, M. R., Pereira, M. G., & Leles, P. S. S. (2018). Estoque de carbono em áreas de restauração florestal da Mata Atlântica. *Floresta*, *48*(2), 183–194. https://doi.org/10.5380/rf.v48i2.54447

Joly, C. A., Metzger, J. P., & Tabarelli, M. (2014). Experiences from the Brazilian Atlantic Forest: Ecological findings and conservation initiatives. *New phytologist*, *204*(3), 459-473. https://doi.org/10.1111/nph.12989

Krainovic, P. M., Brandão, D. O., Resende, A. F., Schons, S. Z., Munhoz, L., Metzger, J. P., Nascimento, N. C., Rodrigues, R. R., Brancalion, P. H. S., Guillemot, J., & de-Miguel, S. (2025). Current constraints to reconcile tropical forest restoration and bioeconomy. *Sustainability Science*, *20*(1), 219–229. https://doi.org/10.1007/s11625-024-01573-8

de Paula Protásio, T., Goulart, S. L., Neves, T. A., Trugilho, P. F., Ramalho, F. M. G., & de Souza Brites, L. M. R. (2014). Qualidade da madeira e do carvão vegetal oriundos de

floresta plantada em Minas Gerais. *Pesquisa florestal brasileira, 34*(78), 111-123. https://doi.org/10.4336/2014.pfb.34.78.657

Martins, L. R., & Carrino, A. L. (2023). Um estudo sobre a biomassa: uma fonte renovável de energia limpa. *Revista Interface Tecnológica*, *20*(2), 531–544. https://doi.org/10.31510/infa.v20i2.1728

Technical Association of the Pulp and Paper Industry. (2022). *Preparation of wood for chemical analysis* (Test Method T 264 cm-22). TAPPI.

Technical Association of the Pulp and Paper Industry. (1996). *Acid-insoluble lignin in wood and pulp* (Test Method T 222 om-88). TAPPI.

Teixeira, V. L. (2018). *Seleção de genótipos de eucalipto para produção de carvão vegetal utilizando análise multivariada e redes neurais* [Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Viçosa]. Locus UFV.

Vale, A. T. do, Dias, Íris S., & Santana, M. A. E. (2010). Relações entre propriedades químicas, físicas e energéticas da madeira de cinco espécies de cerrado. *Ciência Florestal*, *20*(1), 137–145. https://doi.org/10.5902/198050981767

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Influência da face de ensaio no Módulo de Elasticidade de lamelas de *Pinus* sp. em flexão a quatro pontos

Melissa Lago de Jesus S. Silva[1]; Lucas de Mello Sikora[1]; Francisco Antonio Rocco Lahr[1]

[1] Universidade de São Paulo (USP)

Resumo: O módulo de elasticidade (MOE) é propriedade essencial para a classificação mecânica de lamelas destinadas à fabricação de madeira lamelada colada (MLC). Este estudo investigou se a face específica de uma lamela, ensaiada na direção da maior inércia, influencia o valor do módulo de elasticidade obtido em ensaio de flexão a quatro pontos, regime elástico. Foram avaliadas 38 lamelas de *Pinus* sp., ensaiadas em duas faces opostas, totalizando 76 medições. Os resultados levaram à diferença média, estatisticamente significativa, de 4,33% entre as faces, sendo essa diferença estatisticamente significativa ($p < 0,000001$) e com tamanho de efeito médio (Cohen's $d = 0,780$). Ao intervalo de confiança de 95% [194; 476] MPa, o zero não pertence, confirmando que a escolha da face afeta sistematicamente os resultados de classificação mecânica. Este estudo fornece um indicativo, cuja confirmação passa pelo aumento da amostragem para que se possa propor uma relação para ser usada na classificação de lamelas destinadas à madeira lamelada colada.

Palavras-chave: Classificação mecânica; Ensaio não destrutivo; Madeira lamelada colada (MLC).

Influence of the Tested Face on the Modulus of Elasticity of Pinus sp. Lamellas subjected to Four-Point Bending

Abstract: Modulus of elasticity (MOE) is an essential property for mechanical grading of lamellae intended for glued laminated timber (glulam) manufacture. This study investigated whether the specific face of a lamella, tested in the greatest inertia direction influences MOE value obtained in a four-point bending test, within elastic range. Thirty-eight *Pinus* sp. lamellae were evaluated, with tests performed on two opposite faces, totaling 76 measurements. Results showed a statistically significant mean difference of 4.33% between the faces ($p < 0.000001$), with a medium effect size (Cohen's $d = 0.780$). The 95% confidence interval [194; 476] MPa does not include zero, confirming that the choice of face systematically affects mechanical grading results. This study provides an indication that warrants further confirmation through an increased sample size.

Keywords: Mechanical grading; Non-destructive testing (NDT); Glued laminated timber (GLT)

1. Introdução

A madeira é um material anisotrópico com propriedades mecânicas que variam em função da direção de aplicação de carga e da posição na árvore (Kurul *et al.*, 2025). Para aplicações estruturais, especialmente na fabricação de madeira lamelada colada (MLC), a classificação mecânica das lamelas é essencial para garantir o desempenho adequado das vigas produzidas (Calil Júnior *et al.*, 2003). O módulo de elasticidade (MOE) é uma das propriedades mais importantes para essa classificação, pois está diretamente relacionado à rigidez da estrutura final (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2022a).

Esse parâmetro é essencial para otimizar as propriedades mecânicas do elemento estrutural final, destinando-se as lamelas de maior qualidade para as regiões sujeitas às maiores tensões (Cunha & Matos, 2010). Para que o dimensionamento em MLC seja seguro e econômico, é imprescindível o conhecimento preciso das propriedades elásticas.

O módulo de elasticidade (MOE) é o principal indicador da rigidez da madeira, sendo fundamental para a determinação das deformações (flechas) sob carregamento em serviço e para a avaliação da estabilidade global das estruturas. Deste modo, para uma otimização verdadeira e um melhor aproveitamento do material na fabricação da MLC, recomenda-se que os parâmetros de rigidez sejam determinados em condições que simulem o mais fielmente possível o estado de tensões que a lamela será submetida na estrutura final. No caso desse estudo, optou-se pela posição da lamela em pé, a fim de obter o módulo para uma peça estrutural que trabalhe nessa posição.

A determinação do MOE em madeira é tipicamente realizada através de ensaios de flexão estática, conforme estabelecido pela norma brasileira NBR 7190-4 (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2022b). O ensaio de flexão a quatro pontos é amplamente utilizado por permitir a determinação precisa do MOE no regime elástico, sem interferência de efeitos de cisalhamento presentes em ensaios de três pontos (Hein & Brancheriau, 2018). Neste tipo de ensaio, a peça é posicionada com uma face específica voltada para cima (em contato com o carregamento), e a outra face voltada para baixo (em contato com os apoios).

Nesse estudo optou-se pelo ensaio de flexão a quatro pontos para obter melhor representação do comportamento real, pois a distribuição de tensão no ensaio de quatro pontos melhor simula o comportamento de uma viga em uma estrutura real, visto que nesse ensaio, a tensão máxima se distribui pela área entre os pontos de aplicação da carga (Hein & Brancheriau,

2018). Além disso, reduz os efeitos de cisalhamento e indentação que podem disfarçar as propriedades reais, a maior área sob tensão máxima aumenta a probabilidade de detectar defeitos críticos (Kurul *et al.*, 2025).

Uma questão prática importante na classificação mecânica de lamelas é se a face específica ensaiada influencia o resultado do MOE obtido. Ou seja, se uma lamela é ensaiada com a Face 1 voltada para cima, o resultado será o mesmo se a mesma lamela for ensaiada com a Face 2 voltada para cima? Esta pergunta é relevante pois, em ambiente industrial, a padronização de procedimentos é importante para garantir consistência, mas a flexibilidade operacional também é desejável para otimizar o fluxo de produção.

A variabilidade natural da madeira, incluindo a presença de defeitos como nós, fissuras e variações na densidade, pode resultar em diferenças nas propriedades mecânicas entre diferentes regiões e faces de uma peça (Ferro *et al.*, 2015).

O objetivo deste estudo foi investigar se há diferença significativa no módulo de elasticidade de lamelas de Pinus sp. ensaiadas em pé quando diferentes faces são submetidas ao ensaio de flexão a quatro pontos, a fim de fornecer recomendações práticas para padronização de procedimentos de classificação mecânica em indústrias de MLC.

2. Material e métodos

O programa experimental contemplado neste estudo foi desenvolvido no Laboratório de Madeiras e de Estruturas em Madeira (LaMEM), do Departamento de Engenharia de Estruturas (SET), da Escola de Engenharia de São Carlos (EESC), da Universidade de São Paulo (USP). Foram utilizadas lamelas de *Pinus* sp. que foram classificadas visualmente e submetidas ao ensaio de flexão a quatro pontos no regime elástico para a obtenção de MOE nas duas faces de cada lamela, cuja posição de ensaio foi na direção de maior inércia.

Foram utilizadas 40 lamelas de *Pinus* sp., dimensões nominais médias 71,58 mm (altura) × 15,21 mm (largura) × 1500 mm (comprimento). As tábuas que deram origem às lamelas foram selecionadas aleatoriamente de um lote, representando a variabilidade típica do material utilizado comercialmente. De cada tábua foram obtidas quatro lamelas (A, B, C, D). As tábuas ficaram expostas ao ambiente, a fim de atingir a umidade de aproximadamente 12%, após foram beneficiadas, obtendo-se as 40 lamelas (Figura 1).



Figura 31 – Beneficiamento de lamelas.

A classificação visual das lamelas foi realizada de acordo com os critérios estabelecidos pelo documento 2 da Norma brasileira NBR 7190-2 (ABNT, 2022). A classificação visual considerou a presença de defeitos como nós, fissuras, desvio de fibra e outras características que pudessem afetar as propriedades mecânicas da madeira. Esta etapa foi importante para caracterizar a qualidade das lamelas e correlacionar os resultados de MOE com os parâmetros visuais observados.



Figura 32 – Defeitos típicos das lamelas.

O ensaio de flexão a quatro pontos foi realizado conforme a norma ABNT NBR 7190-4, em regime elástico. O vão livre respeitou a relação de 18h, com aproximadamente 1300 mm e a distância entre pontos de carregamento foi de 430 mm (6h). Utilizou-se uma máquina universal de ensaios (Figura 3), o deslocamento foi medido com transdutor de deslocamento linear (LVDT) posicionado no centro do vão.



Figura 33 – Configuração do ensaio de flexão a quatro pontos.

Cada lamela foi ensaiada em suas duas faces opostas, designadas como Face 1 e Face 2. Para cada ensaio, foram realizados ciclos de carregamento e descarregamento entre 10% e 40% da carga de ruptura estimada, conforme preconizado pela norma. O MOE foi calculado a partir da relação entre tensão e deformação neste intervalo de carregamento.

Foram calculadas estatísticas descritivas para cada face ensaiada. A normalidade dos dados foi testada utilizando o teste de Shapiro-Wilk e Anderson-Darling. O teste de Wilcoxon foi utilizado como teste primário para comparar o MOE entre as duas faces, com nível de significância $\alpha = 0,05$. O teste t pareado foi realizado como análise complementar. O tamanho do efeito foi quantificado utilizando Cohen's d para dados pareados.

3. Resultados e discussão

3.1. Classificação visual

A Tabela 1 apresenta a classificação visual das lamelas, onde predominou a Classe 3 devido à presença de defeitos, especialmente pela presença de nós. Após a classificação duas lamelas foram descartadas, sendo obtido o módulo de elasticidade para 38 lamelas.

Tabela 20 – Classificação visual de lamelas

Lamela	Classe (defeitos)	ρteste (kg/m³)	ρ12%	Umidade (%)	Classe (densidade)	Classe final
2A	3	471,8	475,7	10,3	2	3
2B	1	505,0	513,0	8,8	1	1
2C	3	466,2	469,7	10,5	2	3
2D	3	495,3	498,8	10,6	2	3
4A	3	505,6	512,5	9,3	1	3
4B	3	481,2	483,6	11,0	2	3
4C	3	543,2	549,7	9,6	1	3

4D	3	535,3	541,1	9,8	1	3
7A	3	542,2	549,4	9,3	1	3
7B	3	530,8	536,7	9,8	1	3
7C	1	558,9	564,4	10,0	1	1
7D	1	577,5	584,7	9,5	1	1
11A	3	481,5	484,4	10,8	2	3
11B	3	472,3	475,0	10,9	2	3
11C	3	481,8	485,7	10,4	2	3
11D	1	498,9	500,6	11,3	1	1
12A	3	514,6	522,6	8,9	1	3
12B	3	501,3	508,6	9,1	1	3
12C	3	538,9	547,1	8,9	1	3
12D	3	514,1	521,6	9,1	1	3
13A	3	419,8	422,4	10,8	2	3
13B	3	461,6	464,7	10,6	2	3
13C	3	477,4	480,0	10,9	2	3
13D	2	486,3	489,7	10,6	2	2
16A	1	596,3	601,6	10,2	1	1
16B	2	569,1	577,9	8,9	1	2
16C	2	612,2	623,9	8,2	1	2
16D	1	503,4	510,4	9,2	1	1
19A	3	514,0	521,7	9,0	1	3
19B	2	541,5	547,2	9,9	1	2
19C	1	445,9	448,5	10,8	2	1
19D	3	570,9	575,1	10,5	1	3
22A	1	546,6	551,2	10,3	1	1
22B	3	506,2	512,6	9,5	1	3
22C	3	543,7	550,0	9,7	1	3
23D	2	422,4	422,2	12,1	2	2
24A	3	575,0	579,9	10,3	1	3
24B	3	654,8	665,8	8,6	1	3
24C	3	557,3	558,6	11,5	1	3
24D	3	563,6	569,6	9,9	1	3

3.2. Módulo de elasticidade

A Tabela 2 apresenta os resultados do módulo de elasticidade para as duas faces ensaiadas e a relação entre o menor valor obtido e o maior, a fim de comparar os dados da mesma lamela. Pode-se observar que o valores da relação, em média, ficaram próximos de um, indicando homogeneidade dos resultados. A tabela também apresenta as estatísticas descritivas do módulo de elasticidade para cada face ensaiada.

Tabela 21 – Resultados do módulo de elasticidade de duas faces das lamelas

Lamela	Face 1 E0 (MPa)	Face 2 E0 (MPa)	Menor/maior
2A	5664	5582	0,99
2B	8777	9042	0,97
2C	5977	5928	0,99
4A	7273	7687	0,95
4B	8404	8453	0,99
4C	10892	10948	0,99
4D	8914	8794	0,99
7A	8071	7834	0,97
7B	9399	10251	0,92
7C	7922	7915	1,00
7D	12345	12257	0,99
11B	6117	5916	0,97
11C	5055	5212	0,97
11D	9399	9365	1,00
12A	3862	6158	0,63
12B	11478	11214	0,98
12C	6916	7017	0,99
12D	7968	7915	0,99
13A	5307	5625	0,94
13B	6132	6646	0,92
13C	6041	6262	0,96
13D	6875	6568	0,96
16A	6956	6936	1,00
16B	6315	5732	0,91
16C	8303	8548	0,97
16D	6858	7173	0,96
19A	8479	9010	0,94
19B	9649	9886	0,98
19C	9978	9098	0,91
19D	9599	9663	0,99
22A	7835	7876	0,99
22B	9869	10075	0,98
22C	8107	6928	0,85
22D	8413	7842	0,93
24A	9521	10272	0,93
24B	13043	13080	1,00
24C	9978	10336	0,97
24D	10276	10218	0,99
Média	8210	8296	-
Mediana	8205	7915	-
DP	2046,21	1977,02	-
CV (%)	24,92	23,83	-

Mínimo	3862	5212	-
Máximo	13043	13080	-
n	38	38	-

O módulo de elasticidade médio foi de 8.210 MPa (DP = 2046,21) para a Face 1 e 8.296 MPa (DP = 1977,02) para a Face 2 de lamelas ensaiadas em pé. A diferença média entre as faces foi de 335,22 MPa, sendo praticamente relevante para a classificação mecânica. Os coeficientes de variação foram similares entre as faces (24,92% e 23,83%, respectivamente), indicando variabilidade comparável.

A Tabela 3 apresenta os resultados referentes ao intervalo de confiança de 95% para a diferença média que demonstraram que o intervalo não contém zero [194,41;476,03] MPa. Com 95% de confiança, a verdadeira diferença média entre as faces está dento desse intervalor, confirmando que a diferença é significativa.

Tabela 22 – Intervalo de confiança 95% para a diferença média

Parâmetro	**Valor**
Diferença Média (MPa)	335,22
Erro Padrão (MPa)	69,46
Limite inferior (MPa)	194,41
Limite superior (MPa)	476,03
Amplitude (MPa)	281,62

A Tabela 4 apresenta os testes estatísticos realizados para verificar se há diferença significativa no módulo de elasticidade (MOE) entre as duas faces de lamelas de Pinus ensaiadas em pé, a fim de definir se a face específica ensaiada influencia os resultados de classificação mecânica para fabricação de madeira lamelada colada.

Tabela 23 - Resultados dos testes de hipóteses

Teste	**Estatística**	**p-valor**	**Resultado**
Shapiro-Wilk	0,685	<0,000001	Não normal
Anderson-Darling	3,206	0,7360 (crítico - 5%)	Não normal
Teste de Wilcoxon	0,00	<0,000001	Significativo
Teste t	t = 4,8236	0,000024	Significativo
Cohen's d	0,7825	-	Médio
IC 95% da diferença	[194,41; 476,03]	-	Não contém zero

Os resultados demonstraram que há diferença estatisticamente significativa no módulo de elasticidade entre as duas faces (teste t: p = 0,000024; Wilcoxon: p < 0,000001). O intervalo

de confiança 95% [194,41;476,03] MPa não contém o zero, confirmando significância. O tamanho do efeito (Cohen's d = 0,78) foi classificado como médio, indicando relevância prática importante.

Os resultados deste estudo indicam que há diferença estatisticamente significativa no módulo de elasticidade de lamelas de Pinus sp. ensaiadas em pé quando diferentes faces são submetidas ao ensaio de flexão a quatro pontos. Esta conclusão é suportada por múltiplas linhas de evidência: teste de Wilcoxon significativo, teste t pareado significativo, intervalo de confiança não contendo zero e tamanho do efeito médio. Portanto, tais resultados apresentam um indicativo de que a padronização de qual face ensaiar pode ser crítica para fins de classificação de lamelas em madeira laminada colada. Porém, é necessário aprofundar o estudo com uma maior amostragem.

4. Conclusões

Com base na análise dos dados, conclui-se que há indicativo de diferença estatisticamente significativa no módulo de elasticidade entre as duas faces de lamelas de Pinus sp. ensaiadas em pé. Entretanto, para o desenvolvimento de uma possível padronização no procedimento é necessário aumentar a amostragem e investigar causas da variabilidade, como relação com defeitos, correlação com a densidade e outros parâmetros de qualidade.

5. Agradecimentos

Os autores agradecem ao LaMEM - Laboratório de Madeiras e de Estruturas em Madeira pelo suporte técnico e infraestrutura disponibilizados. À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio financeiro concedido por meio da bolsa de doutorado (Processo n. 88887.311234/2026-00) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pelo apoio financeiro concedido por meio da bolsa de produtividade em pesquisa (Processo n. 313198/2023-3).

6. Referências bibliográficas

Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2022a). ABNT NBR 7190-1: Projeto de estruturas de madeira - Parte 1: Requisitos gerais. Rio de Janeiro: ABNT.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2022c). ABNT NBR 7190-2: Projeto de estruturas de madeira - Parte 2: Métodos de ensaio para classificação visual e mecânica de peças estruturais de madeira. Rio de Janeiro: ABNT.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2022b). ABNT NBR 7190-4: Projeto de estruturas de madeira - Parte 4: Métodos de ensaio para caracterização de peças estruturais de madeira. Rio de Janeiro: ABNT.

Calil Júnior, C., Lahr, F. A. R., & Dias, A. A. (2003). Dimensionamento de elementos estruturais de madeira. Manole.

Cunha, A. B., & Matos, J. L. M. (2010). Determinação do módulo de elasticidade em madeira laminada colada por meio de ensaio não destrutivo (stress wave timer). Revista Árvore, 34(2), 345–354.

Ferro, F. S., Almeida, T. H., Christoforo, A. L., & Lahr, F. A. R. (2015). Influência da posição dos instrumentos de medida na determinação do módulo de elasticidade da madeira na compressão paralela às fibras. Revista Árvore, 39(4), 743-749.

Hein, P. R. G., & Brancheriau, L. (2018). Comparison between three-point and four-point flexural tests to determine wood strength of Eucalyptus specimens. Maderas. Ciencia y Tecnología, 20(3), 1-9. https://doi.org/10.4067/s0718-221x2018005003401.

Kurul, F., Görgün, H. V., Şeker, S., Yılmaz, T., Dündar, T., & Ayrılmış, N. (2025). Experimental and numerical modeling of bending characteristics of fir and black pine wood from different forest regions in Türkiye. *Forests*, *16*(5), 844. https://doi.org/10.3390/f16050844

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Influência da intensidade de tosta em dornas de *Amburana cearensis* no perfil sensorial da bebida armazenada

Natalia Durigon Melo[1]; Thâmara dos Santos Osaki[1]; José Fellip Catique Marinho[1]; Rodrigo Schmitz[1]; Alexsandro Bayestorff da Cunha[1]; Cecilia Roratto Köhn[1]; Alessandro de Oliveira Rios[2]; Polliana D'Angelo Rios[1]

[1] Universidade do Estado de Santa Catarina – Centro de Ciências Agroveterinárias
[2] Universidade Federal do Rio Grande do Sul – Instituto de Ciência e Tecnologia em Alimentos

Resumo: O presente estudou buscou avaliar o efeito de três diferentes intensidades de tosta em dornas de *Amburana cearensis* sobre a influência no perfil sensorial da aguardente de cana-de-açúcar armazenada pelo período de seis meses. Foram produzidas nove dornas com um volume de aproximadamente 5,5 litros, submetidos a três níveis de tratamento térmico (tosta) interno: sem tosta, tosta leve (500ºC, 15s) e tosta moderada (500ºC, 60s), em triplicatas. A análise sensorial foi conduzida com 154 provadores não treinados, aplicando um delineamento em blocos casualizados, onde foram avaliados oito atributos da bebida em uma escala hedônica de 9 pontos. A tosta moderada apresentou médias superiores quando avaliados aroma, sabor, sabor residual e aceitação global. Enquanto os atributos de cor, turbidez e corpo, não apresentaram diferenças significativas entre os tratamentos. Apenas a bebida armazenada em dornas com tosta moderada atingiu um índice de aceitabilidade superior a 70% em todos os atributos avaliados. Deste modo, conclui-se que a intensidade de tosta proporciona um melhor perfil sensorial à aguardente de cana-de-açúcar armazenada, portanto sendo indicado para agregar qualidade ao produto.

Palavras-chave: análise sensorial, tratamento térmico, madeira nativa, escala hedônica.

Influence of toasting intensity in *Amburana cearensis* casks on the sensory profile of the stored beverage

Abstract: This study aimed to evaluate the effect of three different toasting intensities in *Amburana cearensis* casks on the sensory profile of sugarcane spirit stored for a six-month period. Six casks with a volume of approximately 5.5 liters were produced and subjected to three levels of internal thermal treatment (toasting): no toast, light toast (500 °C, 15 s), and moderate toast (500 °C, 60 s), in triplicate. The sensory analysis was conducted with 154 untrained tasters, applying a randomized block design, in which eight attributes of the beverage were evaluated on a 9-point hedonic scale. The moderate toast showed higher means for aroma, flavor, residual flavor, and overall acceptance, whereas the attributes of color, turbidity, and body showed no significant differences among treatments. Only the beverage stored in moderately toasted casks reached an acceptability index above 70% for all evaluated attributes. Thus, it is concluded that toasting intensity provides a better sensory profile to the stored sugarcane spirit, and is therefore recommended to add quality to the product.

Keywords: sensory analysis, thermal treatment, native wood, hedonic scale.

1. Introdução

Dentre as bebidas alcóolicas comercializadas em território nacional, destaca-se a aguardente de cana-de-açúcar, oriunda da fermentação do caldo de mosto de cana-de-açúcar. De acordo com Instrução Normativa n° 539 de 26 de dezembro de 2022, o teor alcóolico permitido para comercialização de aguardente de cana de açúcar fica entre as faixas de 38% a 58%. Podendo ser classificada como envelhecida quando 50% do seu volume é armazenado por no mínimo um ano em recipientes de madeira, com capacidade máxima de 700L, quando não atende esses critérios é denominada de armazenada (Brasil, 2022).

Embora o armazenamento da aguardente de cana em recipientes de madeira seja optativo no processo produtivo, ele exerce um papel fundamental na modificação de suas características sensoriais contribuindo para o valor agregado do produto (Castro et al 2015; Miranda et al. 2008).

Estima-se que cerca de 60% dos compostos aromáticos presentes em bebidas destiladas armazenadas resultam da interação entre bebida e madeira. Além disso, existem compostos voláteis e não voláteis desejáveis que são liberados durante o processo de tosta da madeira utilizada na produção dos barris, o que altera as propriedades aromáticas da madeira juntamente as organolépticas da bebida (Conner; Reid, Jack, 2003, Chatonett et al., 1999, Zhang et al, 2015).

Ainda, ressalta-se a importância da utilização de madeiras nativas no armazenamento de aguardente de cana-de-açúcar, com objetivo de atribuir sabores distintos e agregar uma maior originalidade a essas bebidas brasileiras (Catão et al. 2011; Mori et al., 2003; Alcarde et al., 2010).

Dentre as espécies nativas brasileiras, surge a *Amburana cearensis* A. C. Smith, popularmente conhecida como amburana ou cerejeira, possuí porte arbóreo e sua distribuição majoritariamente fica na região nordeste do Brasil. Atualmente já apresenta grande popularidade no armazenamento de aguardentes de cana-de-açúcar e outras bebidas alcóolicas, conferindo-lhes alta aceitabilidade sensorial (Cipriano, 2024). Contudo, são escassas as informações sobre a influência do tratamento térmico na aceitação sensorial de bebidas armazenadas nessa madeira.

A análise sensorial é uma metodologia científica composta por técnicas utilizadas para avaliar, medir e interpretar as características individuais na experimentação de alimentos e/ou bebidas por meio dos sentidos (visão, olfato, paladar, tato e audição). Ainda, há a divisão dos testes entre qualitativos (abordagem afetiva) e quantitativos (testes de aceitação ou preferência) (Della Lúcia, Denin, Carneiro, 2013; Reis, Minim, 2013). Dentre esses, destaca-se o teste de

aceitação, no qual os provadores utilizam uma escala hedônica estruturada variando de 1 a 9 pontos variando entre extremamente desgostar (1) e extremamente gostar (9).

Diante ao exposto, o presente trabalho objetivou-se na condução de uma avaliação sensorial pública de amostras de aguardente de cana-de-açúcar armazenadas pelo período de seis meses em dornas fabricadas com madeira de *Amburana cearenses* com diferentes intensidades de tosta interna, com a finalidade de avaliar seu efeito de aceitabilidade.

2. Material e métodos

Obtenção da bebida e das dornas de madeira e armazenamento

A aguardente de cana-de-açúcar utilizada no neste estudo foi obtida de uma empresa regulamentada pelo Ministério da Agricultura e Pecuária (MAPA), localizada na cidade de Luiz Alves – Santa Catarina. A etapa de fermentação do mosto contou com a utilização de leveduras selvagens e a destilação realizada em um alambique de cobre.

Para produção das dornas foi selecionada madeira de *Amburana cearenses*. Foram produzidas 9 dornas com volume aproximado de 5,5L (Figura 1), estas foram submetidas à diferentes níveis tostas interna aplicadas utilizando maçarico, onde: três dornas sem tosta, três com tosta leve – 500°C por 15 segundos e três com tosta moderada – 500°C por 60 segundos.



Figura 1. Dornas produzidas com madeira de *A. cearensis*.

O período de armazenamento da bebida durou 180 dias (agosto de 2024 a fevereiro de 2025) e foi realizado em uma sala com controle de ambiente: temperatura de 20°C±5°C e umidade relativa de 60%±5% e luminosidade reduzida.

Análise Sensorial

A análise sensorial das amostras de aguardente de cana-de-açúcar armazenadas foi realizada no Laboratório de Anatomia da Madeira do Centro de Ciências Agroveterinárias da Universidade do Estado de Santa Catarina (UDESC) na data de 30/05/2025, utilizando-se de uma escala hedônica de 9 pontos, onde: 1 – desgostei extremamente e 9 – gostei extremamente.

Para tal, foram convocados 154 provadores não treinados, todos maiores de 18 anos, com comprovação da idade mediante a apresentação documento de identidade (cópia armazenada e mantida em sigilo). Os participantes foram convocados por meio de folders de divulgação espalhados pelo campus da UDESC e nas redes sociais.

Cada um dos provadores recebeu três amostras numeradas aleatoriamente, um formulário para avaliação e um Termo de Esclarecimento e Livre Consentimento. Para cada amostra os convocados pontuaram os seguintes atributos: intensidade de cor, turbidez, corpo, aroma, sabor, sabor residual e aceitação geral (Meilgaard et al., 2007).

Conforme a atribuição de notas pelos provadores, foi calculado o índice de aceitabilidade das amostras com a utilização da Equação I:

Equação 2. Índice de aceitabilidade das amostras

$$IA(\%) = A \times \frac{100}{B} \quad \text{(I)}$$

Onde:

IA: Índice de Aceitabilidade

A: nota média obtida para cada tratamento

B: nota máxima dada a cada tratamento

Aspectos éticos do trabalho

Este estudo foi submetido ao Comitê de Ética e Pesquisa por meio da plataforma Brasil (CEP/CENEP), conforme a Resolução 466/2012 do Conselho Nacional de Saúde. Atribuído ao protocolo n° 79442524.5.0000.5347 no Certificado de Apresentação de Apreciação Ética (CAAE).

As informações detalhadas sobre as bebidas e os procedimentos foram dadas previamente à solicitação da assinatura do Termo de Consentimento Livre e Esclarecimento de acordo com as Diretrizes e Normas regulamentadores de pesquisas com seres humanos.

Análise estatística

O trabalho foi desenvolvido em um delineamento em blocos casualizados, no qual cada um dos 154 provadores constituiu um bloco, avaliando os três tratamentos (sem tosta, tosta leve e tosta moderada) uma única vez cada. As dornas foram produzidas em triplicatas.

A verificação da aderência dos dados a distribuição normal, foi realizado o teste de Shapiro Wilk e a homogeneidade das variâncias avaliada pelo teste de Bartlett. Após a validação dos pressupostos da estatística paramétrica, realizou-se a análise de variância (ANOVA) com fator de dupla entrada com 5% de significância, para os dados de compostos fenólicos. Quando comprovada interação entre os fatores, foi aplicado o teste de Tukey à 5% de significância.

Além disso, foi utilizada estatística descritiva qual engloba cálculos como: média, desvios padrões e o coeficiente de variação. Todos esses testes, foram realizados utilizando planilhas do aplicativo Microsoft Office Excel 2016® para organização dos dados e o software RStudio® (v. 4.6.0) para análises estatísticas.

3. Resultados e discussão

Os resultados apresentados para as médias apresentaram comportamentos consistentes nos oito atributos avaliados na análise sensorial, como está apresentado na Figura 2. Pode-se observar que a bebida armazenada em dornas de intensidade de tosta moderada obteve médias superiores quando comparadas com as demais quando avaliados aroma ($p = 0,0087$), sabor ($p < 0,0001$), sabor residual ($p < 0,0001$), aceitação global ($p < 0,0001$) e intenção de compra ($p < 0,0001$), enquanto os atributos de intensidade de cor, turbidez e corpo ($p>0,05$) não apresentam diferenças significativas entre a intensidade de tosta.

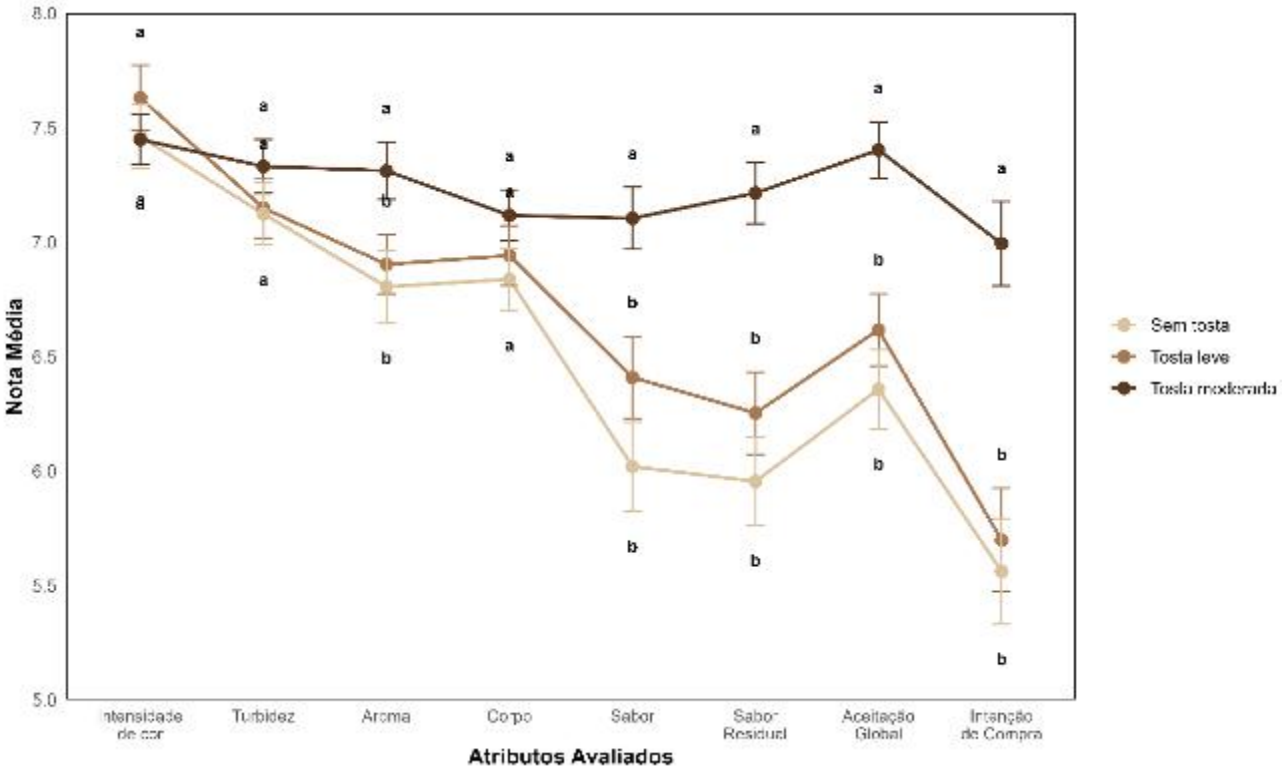


Figura 2. Gráfico de linhas com resultados médios para notas atribuídas a bebida armazenada em dornas com diferentes intensidades de tosta (letras iguais não se diferenciam no teste de Tukey a 5%)

O efeito do provador, apresentou alta significância durante a avaliação dos oito atributos, confirmando a adequação do delineamento em blocos para o controle da variabilidade interindividual inerente à análise sensorial ($p < 2 \times 10^{-16}$), o que confirma a aderência do delineamento em blocos para o controle da variabilidade interindividual inerente à análise sensorial.

O comportamento sem diferenças significativas na avaliação de intensidade de cor, turbidez e corpo corrobora com o padrão descrito para cinética de extração de compostos estruturais da madeira, pois os compostos que estão relacionados a cor e corpo da bebida apresentam tendencia de estabilização em tostas médias à intensas (Oliveira-Alves et al., 2024).

As diferenças retratadas nas amostras com tosta moderada em aroma, sabor, sabor residual, aceitação global e intenção de compra, relacionam-se na degradação térmica da lignina, onde é descrita a liberação de compostos como vanilina, siringaldeído e, em temperaturas mais altas, guaiacol (Canas, 2017), juntamente a hidrotérmolise da hemicelulose que resulta em furfural, este, podendo atribuir notas de caramelo e certa doçura a bebida

armazenada (Oliveira-Alves et al., 2024). Ma *et al*. 2014, também afirma que a tosta também despolimeriza taninos de baixo-peso molecular, resultando em uma redução no amargor da bebida. Essa combinação explica a diferença expressa nas médias encontradas para Aceitação Global e Intenção de Compra, sendo as maiores observadas no presente estudo (1 e 1,4 pontos em uma escala de 9).

Também foram calculados os índices de aceitabilidade das amostras e apartir destes valores, gerado um gráfico radar, com os valores encontrados para os três tratamentos (Figura 3)

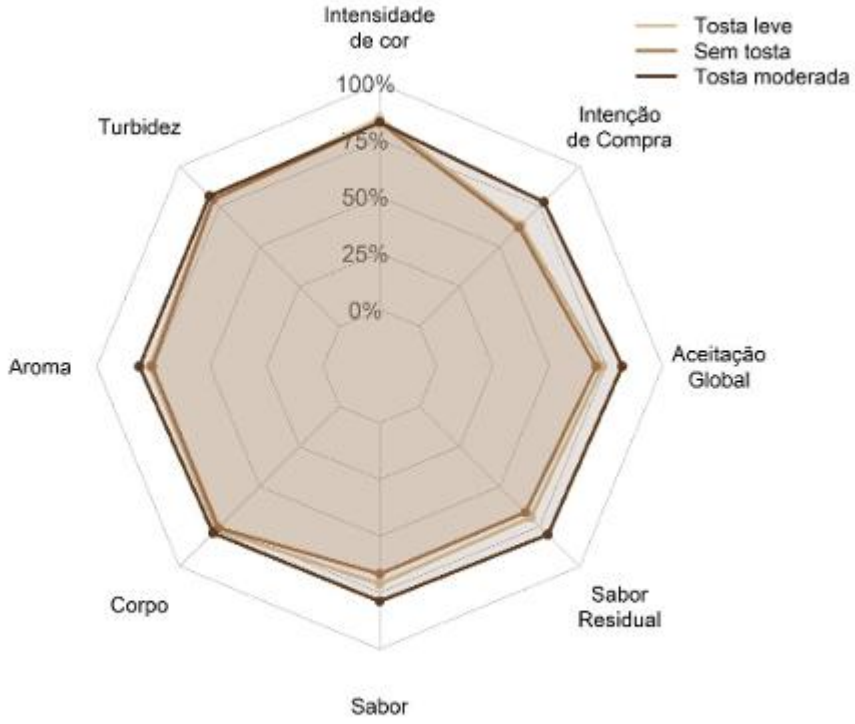


Figura 3. Índice de Aceitabilidade (%) dos oito atributos sensoriais avaliados para as amostras sem tosta, tosta leve e tosta moderada de cachaça envelhecida em *Amburana cearensis*. IA% calculado como a razão entre a nota média atribuída pelos provadores (n = 154) e a nota máxima da escala hedônica (9 pontos), multiplicada por 100.

Considerando o índice de aceitabilidade, somente a amostra armazenada em dornas com tosta moderada atendeu o valor de 70% de aceitabilidade para todos os atributos avaliados, sendo esse valor convencionalmente adotado como indicativo de boa aceitação sensorial (Dutcosky, 2013).

Já os tratamentos com tosta leve e sem tosta, ficaram abaixo do valor limiar nos quesitos como sabor, sabor residual e intenção de compra.

Em conjunto, os resultados encontrados indicam que a tosta moderada se destacou das demais no perfil sensorial da bebida armazenada, sendo estatisticamente superior em cinco dos oito atributos avaliados e com um Índice de Aceitabilidade superior a 70% em todos eles.

4. Conclusões

As amostras armazenadas em dornas com tosta moderada apresentaram o melhor desempenho sensorial quando comparadas com as demais nos atributos de aroma, sabor, sabor residual, aceitação global e intenção de compra.

Em relação ao índice de aceitabilidade das amostras, a tosta moderada apresentou valores superiores a 70% nos oito atributos avaliados.

Em contraste a intensidade de cor, turbidez e corpo não sofreram influência da intensidade de tosta.

Recomenda-se, em estudos futuros, avaliar níveis de tosta forte e carbonizada (char) para verificar se a tendência de melhora se mantém além da tosta moderada.

5. Agradecimentos

Os autores agradecem o Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal da Universidade do Estado de Santa Catarina (UDESC) pelo apoio institucional e à Fundação de Amparo à Pesquisa de Santa Catarina (FAPESC) pela concessão de bolsa durante a realização do estudo.

6. Referências bibliográficas

Alcarde, A. R., Souza, P. A., & Belluco, A. E. S. (2010). Aspectos da composição química e aceitação sensorial da aguardente de cana-de-açúcar envelhecida em tonéis de diferentes madeiras. Ciência e Tecnologia de Alimentos, 30, 226–232.

Brasil. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. (2022). Instrução Normativa n° 539, de 26 de dezembro de 2022. Diário Oficial da União.

Canas, S. (2017). Phenolic composition and related properties of aged wine spirits: Influence of barrel characteristics. A review. Beverages, 3(4), 55. https://doi.org/10.3390/beverages3040055

Castro, J. P., et al. (2015). Uso de espécies amazônicas para envelhecimento de bebidas destiladas: análises física e química da madeira. Cerne, 21(2), 215–222. https://doi.org/10.1590/01047760201521021567

Catão, C. G., et al. (2011). Qualidade da madeira de cinco espécies florestais para o envelhecimento da cachaça. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, 15(7), 749–753. https://doi.org/10.1590/S1415-43662011000700013

Chatonnet, P., Cutzach, I., & Dubourdieu, D. (1999). Monitoring toasting intensity of barrels by chromatographic analysis of volatile compounds from toasted oak wood. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 47(10), 4310–4318.

Cipriano, D. S. (2024). Propriedades químicas, físicas, anatômicas e tecnológicas de Amburana cearensis (Allemão) A.C. Smith visando a produção de recipientes para envelhecimento de cachaça [Tese de doutorado, Universidade de São Paulo].

Conner, J., Reid, K., & Jack, F. (2003). Maturation and blending. In I. Russel, G. Stewart, & C. Bamforth (Eds.), Whisky, technology and marketing (pp. 209–410). Elsevier.

Della Lucia, S. M., Minim, V. P. R., & Carneiro, J. D. S. (2013). Análise sensorial de alimentos. In V. P. R. Minim (Ed.), Análise sensorial: estudo com consumidores (3ª ed., pp. 13–48). Editora UFV.

Dutcosky, S. D. (2013). Análise sensorial de alimentos (4ª ed.). Champagnat.

Ma, W., Guo, A., Zhang, Y., Wang, H., Liu, Y., & Li, H. (2014). A review on astringency and bitterness perception of tannins in wine. Trends in Food Science & Technology, 40(1), 6–19. https://doi.org/10.1016/j.tifs.2014.08.001

Meilgaard, M., Civille, G. V., & Carr, B. T. (2007). Sensory evaluation techniques (4th ed.). CRC Press.

Miranda, M. B., Martins, N. G. S., Belluco, A. E. S., Horii, J., & Alcarde, A. R. (2008). Chemical profile of aguardente: Brazilian sugar cane alcoholic drink, aged in oak casks. Ciência e Tecnologia de Alimentos, 28(Supl.), 84–89. https://doi.org/10.1590/S0101-20612008000500014

Mori, F. A., Mendes, L. M., Trugilho, P. F., & Cardoso, M. G. (2003). Utilização de eucaliptos e de madeiras nativas no armazenamento da aguardente de cana-de-açúcar. Ciência e Tecnologia de Alimentos, 23, 396–400.

Oliveira-Alves, S., Lourenço, S., Fernandes, T. A., & Canas, S. (2024). Coumarins in spirit beverages: Sources, quantification, and their involvement in quality, authenticity and food safety. Applied Sciences, 14(3), 1010. https://doi.org/10.3390/app14031010

Reis, R. C., & Minim, V. P. R. (2013). Testes de aceitação. In V. P. R. Minim (Ed.), Análise sensorial: estudos com consumidores (3ª ed., pp. 65–81). Editora UFV.

Zhang, B., Cai, J., Duan, C. Q., Reeves, M., & He, F. (2015). A review of polyphenolics in oak woods. International Journal of Molecular Sciences, 16, 6978–7014. https://doi.org/10.3390/ijms16046978

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Influência da luz nas propriedades da madeira em enriquecimento de floresta secundária na Amazônia Central

Sara Bonete Souza[1]; Gabriel Assis-Pereira[2]; Mario Tomazello-Filho[2]; Francisco Tarcísio Moraes Mady[1]; Debora Coelho-Silva[3]; Marciel José Ferreira[1] Guilherme Silva Modolo[1]

[1] Universidade Federal do Amazonas
[2] Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz/Universidade de São Paulo
[3] Universidade do Quebec à Chicoutimi

Resumo: Analisar o efeito da disponibilidade de luz nas propriedades da madeira é importante para subsidiar a escolha de tratamentos silviculturais e espécies para produção madeireira em sistemas de enriquecimento. Neste trabalho, investigamos como a disponibilidade de luz afeta as propriedades da madeira (diâmetro médio de vasos, frequência de vasos e densidade básica) em árvores jovens (5 anos) de seis espécies florestais plantadas ao longo de um gradiente de luz em um sistema de enriquecimento de floresta secundária. O efeito da disponibilidade de luz nas propriedades da madeira dependeu das espécies. No geral, o diâmetro dos vasos aumentou e a frequência diminuiu de em função do aumento da disponibilidade de luz. A densidade básica foi pouco afetada pela luz e pouco relacionada à variação no diâmetro e na frequência de vasos para a maioria das espécies. Estudos futuros devem considerar a idade das árvores e a análise de outras características anatômicas.

Palavras-chave: Qualidade da madeira; Anatomia da madeira; Física da madeira.

Effects of light availability on wood properties in a Central Amazon secondary forest enrichment planting

Abstract: Analyzing the effects of light availability on wood properties is important to support the selection of silvicultural treatments and species for enrichment planting systems. We investigated how light availability affects wood properties (vessel diameter, vessel frequency, and basic wood density) of five-year-old trees from six forest species planted along a light gradient in a secondary forest enrichment planting. The effects of light availability on wood properties were species-dependent. Overall, vessel diameter increased and vessel frequency decreased with increasing light availability. Basic wood density was little affected by light availability and was weakly related to variations in vessel diameter and frequency for most species. Future studies should consider tree age and investigate other anatomical traits associated with wood density variation.

Keywords: Wood quality, Wood anatomy, Wood physics.

1. Introdução

Enriquecer florestas secundárias com espécies comerciais é uma forma de aumentar o seu valor econômico e ecológico. Esse tipo de iniciativa pode incentivar os produtores à conservação das florestas secundárias ao criar oportunidades de geração de renda. Como consequência, contribui para a manutenção dos serviços ecossistêmicos prestados por essas

florestas (Modolo et al., 2025). O sucesso do estabelecimento de espécies em sistemas de enriquecimento depende da criação, por meio de tratamentos silviculturais, de condições adequadas de disponibilidade de luz para as espécies selecionadas (Santos et al., 2020; Santos; Ferreira, 2020).

O nível de disponibilidade de luz adequado é dependente da espécie, tornando essencial identificar a condição ideal para cada uma delas e aplicar tratamentos silviculturais com intensidade suficiente para criar um ambiente de luz favorável ao seu desenvolvimento (Santos; Ferreira, 2020). A definição do nível ideal de disponibilidade de luz deve considerar seus efeitos sobre a sobrevivência, o crescimento, a intensidade do ataque de pragas e a qualidade do fuste, além da qualidade da madeira, um aspecto ainda pouco investigado em sistemas de enriquecimento (Modolo et al., 2025).

O aumento da disponibilidade de luz promovido por tratamentos silviculturais tende a favorecer o crescimento das espécies plantadas em sistemas de enriquecimento (Santos; Ferreira, 2020). Esse maior crescimento pode alterar a estrutura anatômica do xilema, favorecendo a formação de células de maior dimensão e paredes celulares mais finas, com potencial redução da densidade da madeira (Shmulsky; Jones, 2019). Assim, visando à produção de madeira, é fundamental selecionar um tratamento silvicultural que promova um equilíbrio entre o crescimento das árvores e a formação de um lenho de qualidade.

O efeito da disponibilidade de luz nas propriedades da madeira pode ser espécie-dependente (Coelho-Silva, 2024). Modolo et al. (2025) observaram que o aumento da disponibilidade de luz, decorrente da intensificação dos tratamentos silviculturais, promoveu redução na densidade da madeira de apenas duas entre seis espécies avaliadas. Coelho-Silva (2024) observou que, no geral, o diâmetro de vasos aumentou e a frequência de vasos diminuiu em função do aumento da disponibilidade de luz. Todavia, a magnitude e a presença do efeito dependeram da espécie. Assim, torna-se oportuno investigar como a disponibilidade de luz está afetando as propriedades da madeira e, como elas estão correlacionadas. Dessa forma, será possível entender a capacidade e a estratégia das espécies em fazer ajustes anatômicos, trazendo uma fundamentação importante para a seleção de espécies florestais para sistemas de enriquecimento.

Diante dos potenciais benefícios da produção madeireira em florestas secundárias por meio de plantios de enriquecimento e das incertezas sobre os efeitos da disponibilidade de luz, promovida por tratamentos silviculturais, na qualidade da madeira de diferentes espécies, este estudo avaliou seis espécies florestais estabelecidas ao longo de um gradiente de

disponibilidade de luz, com os seguintes objetivos: (1) analisar se a disponibilidade de luz afeta as propriedades da madeira (diâmetro médio de vasos, frequência de vasos e densidade básica) de seis espécies florestais; e (2) analisar se as variações nas propriedades da madeira induzidas pela disponibilidade de luz estão relacionadas entre si.

Nossa hipótese é que as propriedades da madeira variarão em função da disponibilidade de luz. Entretanto, a magnitude desse efeito e as propriedades afetadas dependerão da espécie analisada. Além disso, as variações nas propriedades da madeira induzidas pelo gradiente de disponibilidade de luz estarão relacionadas entre si, embora a magnitude e a significância dessas relações também dependam da espécie.

2. Material e métodos

2.1. Experimento de enriquecimento de floresta secundária

As amostras foram coletadas de árvores plantadas em um experimento de enriquecimento de floresta secundária. O experimento foi conduzido em delineamento de blocos casualizados, em esquema de parcelas subdivididas, com cinco repetições, no qual foram aplicados os seguintes tratamentos: **Redução da área basal** – aplicada às parcelas principais, consistiu na remoção de árvores com DAP ≥ 5 cm por meio de corte com motosserra, em seis níveis de redução da área basal (0, 20, 40, 60, 80 e 100%); **Remoção do sub-bosque** – aplicada às subparcelas, consistiu na remoção da vegetação com DAP < 5 cm, estabelecendo dois níveis de tratamento: remoção do sub-bosque e controle.

Em 2017, foram plantadas no experimento seis espécies florestais: *Bertholletia excelsa*, *Cedrela fissilis*, *Carapa guianensis*, *Hymenaea courbaril*, *Swietenia macrophylla* e *Tabebuia rosea*. Foram plantadas cinco mudas de cada espécie em cada subparcela, em covas de 30 × 30 × 30 cm, no espaçamento de 3 × 3 m, totalizando 30 mudas por subparcela e 1.800 mudas em todo o experimento. A correção da acidez do solo foi realizada 30 dias antes do plantio, por meio da aplicação de calcário dolomítico. No momento do plantio, realizou-se a adubação de base com fontes de nitrogênio, fósforo, potássio e micronutrientes. Durante os cinco primeiros anos após o plantio, foi realizado o controle da matocompetição para manter os efeitos dos tratamentos silviculturais. Informações detalhadas sobre a implantação e condução do experimento podem ser consultadas em Santos et al. (2020), Santos e Ferreira (2020) e Modolo et al. (2025).

2.2. Amostragem

Cinco anos após o plantio (2022), foram coletados discos da base do caule (~10 cm acima do solo) de árvores das seis espécies. Os indivíduos coletados estavam distribuídos ao longo do gradiente de disponibilidade de luz formado pela aplicação dos tratamentos silviculturais. Em média, foram coletadas 36 amostras por espécie, variando de 28 a 42 amostras entre as espécies.

2.3. Transmitância de luz

A transmitância de luz corresponde ao percentual da luz total (sem cobertura vegetal) que atinge a copa das árvores. Essa variável foi mensurada em todos os indivíduos selecionados. Para tal, foi instalado um sensor de irradiância (MQS B/ULM-500 logger; Heinz Walz, Alemanha) em uma área aberta próxima ao experimento (sensor externo) e um outro sensor de irradiância em uma vara telescópica (sensor interno), ambos programados para registro a cada 10 segundos. Foram tomadas medidas pontuais de irradiância simultaneamente no sensor externo e no sensor interno entre às 11 e 13 horas (máxima irradiância). O sensor interno foi posicionado acima da copa da árvore durante um minuto por indivíduo, com o auxílio da vara telescópica. As medidas foram tomadas cinco anos após o plantio. A transmitância de luz em porcentagem para cada indivíduo amostral foi calculada pela fórmula: Transmitância (%) = (irradiância do sensor interno / irradiância do sensor externo) * 100 (Santos et al., 2020).

2.4. Propriedades da madeira

2.4.1. Densidade da madeira

A densidade da madeira foi analisada utilizando a técnica de microdensitometria de raios-x. Primeiro, foi cortada uma fatia diametral de 1 mm de espessura de cada amostra com o auxílio de uma serra metalográfica. As fatias foram acondicionadas em câmara climática ajustada para temperatura de 20 °C e umidade relativa de 60% até atingirem teor de umidade de 12% (Tomazello-Filho et al., 2008). Em seguida, as amostras foram radiografadas em uma câmara de microdensitometria de raios X (Faxitron MX20-DC12, Faxitron X-ray, Illinois, EUA), juntamente com uma cunha de acetato de densidade conhecida, utilizada para a calibração dos valores de densidade dos pixels. A distância entre a fonte de raios X e as amostras foi ajustada de modo a garantir um campo de imagem suficiente para abranger integralmente tanto a amostra quanto a cunha de acetato.

As imagens obtidas foram analisadas no software WINDENDRO Density 2017 (Regent Instruments Inc., Quebec, Canadá), permitindo a obtenção do perfil radial de microdensidade com resolução de 15 µm entre pontos consecutivos. Para cada amostra, foram analisados dois perfis radiais de microdensidade. A partir dos perfis de microdensidade, foi determinada a densidade aparente média da madeira. Posteriormente, os valores de densidade aparente foram multiplicados pelo fator 0,828 para sua conversão em densidade básica (Vieilledent et al., 2018).

2.4.2. Diâmetro e frequência dos vasos

As amostras utilizadas para análise do diâmetro e frequência dos vasos consistiram em fatias radiais de 0,3 mm retiradas em serra metalográfica. Após o corte, as amostras foram acondicionadas em câmara climática a 20 °C de temperatura e 60% de umidade relativa por pelo menos 48 horas. Então, as amostras foram radiografadas na câmara de microdensitometria de raios X (Faxitron MX20-DC12, Faxitron X-ray, Illinois, EUA). As amostras foram posicionadas a aproximadamente 5 cm da fonte de raios X para maximizar a resolução das imagens. A aquisição foi direcionada à região próxima à camada de crescimento mais externa do lenho, correspondente ao lenho formado mais recentemente. Mantendo-se a configuração e posição das amostras, foi radiografada uma escala de referência para o escalonamento das imagens.

Das imagens de cada amostra, foram recortadas três subamostras de 1 mm^2 da camada de crescimento mais externa do lenho. A seleção dessa região teve como objetivo padronizar as condições climáticas às quais o xilema esteve submetido durante sua formação, reduzindo a influência do efeito da variabilidade ambiental entre os anos de crescimento. O diâmetro médio dos vasos e a frequência de vasos foram mensurados no software ImageJ.

2.5. Análise de dados

O efeito da disponibilidade de luz nas propriedades da madeira foi analisado por meio de modelos lineares mistos. As propriedades da madeira (diâmetro médio de vasos, frequência de vasos e densidade básica) foram utilizadas como variável dependente, a transmitância de luz como variável independente e as espécies como covariável. O bloco experimental e o tratamento de remoção de sub-bosque foram utilizados como variáveis aleatórias.

Para analisar a relação entre as propriedades da madeira nós também utilizamos modelos lineares mistos. As propriedades da madeira foram utilizadas como variável

dependente e independente em três combinações: 1) densidade básica ~ diâmetro médio de vasos; 2) densidade básica ~ frequência de vasos; 3) diâmetro médio de vasos ~ frequência de vasos. As espécies foram utilizadas como variável categórica e o bloco experimental e o tratamento de remoção de sub-bosque como variáveis aleatórias. Todas as análises foram realizadas no pacote *lmerTest* do software R versão 4.2.1 (R Core Team, 2022).

3. Resultados e discussão

3.1. Efeito da transmitância de luz nas propriedades da madeira

Houve efeito estatístico de interação ($p < 0,001$) entre a transmitância de luz e a espécie no diâmetro médio de vasos, na frequência de vasos e na densidade básica. O diâmetro médio de vasos aumentou em função da transmitância de luz para todas as espécies, todavia, em diferentes magnitudes (Figura 1A). A frequência de vasos reduziu conforme aumentou a transmitância de luz para todas as espécies. Similarmente, a magnitude do efeito foi espécie-dependente (Figura 1B). *B. excelsa* e *C. guianensis* estiveram entre as espécies que mais aumentaram o diâmetro médio de vasos e mais reduziram a frequência de vasos. A magnitude e o sentido do efeito da transmitância de luz na densidade básica da madeira dependeram da espécie. *C. fissilis* foi a espécie que mais mudou a densidade da madeira (reduziu) em função transmitância de luz. As demais espécies tiveram pouca variação na densidade da madeira ao longo do gradiente de luz (Figura 1C).

Os resultados corroboram a hipótese de que o efeito do gradiente de luz sobre as propriedades da madeira é dependente da espécie. Espécies florestais podem responder de maneira distinta às variações ambientais em função de suas diferentes estratégias funcionais (Coelho-Silva, 2024). A reduzida influência da disponibilidade de luz sobre a densidade básica da madeira na maioria das espécies avaliadas (com exceção de *C. fissilis*) sugere que tratamentos silviculturais voltados à promoção de maiores taxas de crescimento não comprometem, necessariamente, essa propriedade da madeira. No entanto, é importante destacar que as avaliações foram realizadas em árvores jovens, com cinco anos de idade, cuja madeira é predominantemente composta por lenho juvenil. Dessa forma, são necessários estudos de longo prazo para verificar se as tendências observadas persistem ao longo do desenvolvimento das árvores e durante a formação do lenho maduro.

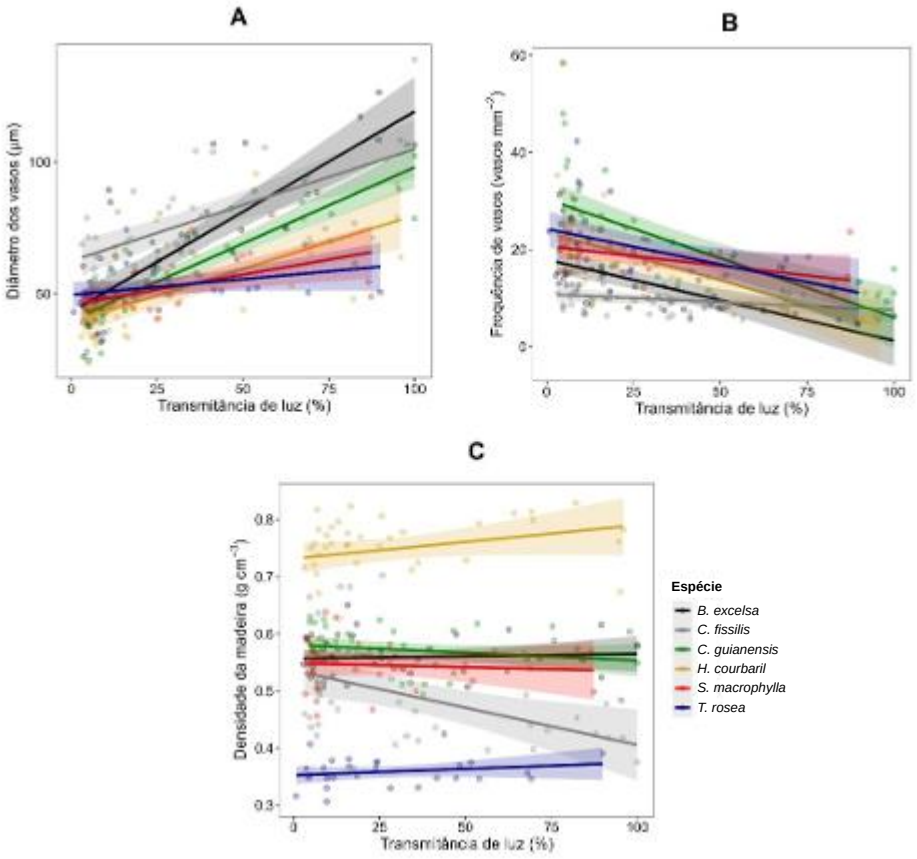


Figura 1 – Efeito da transmitância de luz e das espécies no diâmetro médio dos vasos (A), frequência de vasos (B) e densidade básica da madeira (C). As linhas representam os ajustes dos modelos, o sombreamento representa o intervalo de confiança à 95%, os pontos representam as repetições (árvores).

3.2. Relação entre as propriedades da madeira ao longo do gradiente de luz

A relação entre as propriedades da madeira dependeu das espécies. Foi observado efeito significativo da interação para a relação entre o diâmetro médio dos vasos–frequência de vasos ($p < 0,001$) e para a relação densidade básica da madeira–frequência de vasos ($p = 0,004$). A interação da relação entre a densidade básica da madeira e o diâmetro médio dos vasos foi marginalmente significativa ($p = 0,075$). O diâmetro médio dos vasos diminuiu conforme aumentou a frequência dos vasos para todas as espécies, porém, em diferentes magnitudes (Figura 2A). Na relação entre a densidade básica da madeira e o diâmetro médio dos vasos não foi possível observar um padrão geral. Destaca-se a redução na densidade da madeira conforme aumentou o diâmetro médio dos vasos para *C. fissilis* (Figura 2B). Similarmente, não observamos uma tendência generalista para a relação entre a densidade básica da madeira e a

frequência de vasos. Para *C. fissilis* foi possível observar um aumento da densidade da madeira conforme aumentou a frequência de vasos (Figura 2C).

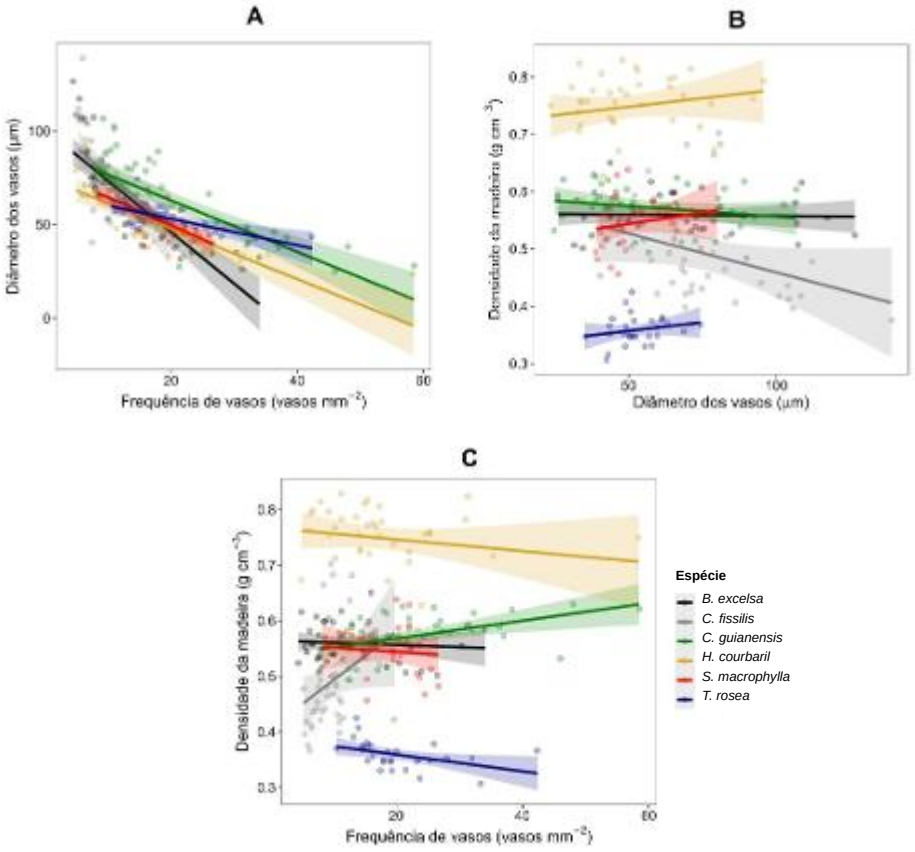


Figura 2 – Relação entre propriedades da madeira de árvores plantadas ao longo de um gradiente de luz para seis espécies florestais. As linhas representam os ajustes dos modelos, o sombreamento representa o intervalo de confiança à 95%, os pontos representam as repetições (árvores).

A relação negativa entre a o diâmetro e a frequência de vasos reflete o trade-off entre eficiência no transporte de água e segurança hidráulica (Fichtler; Worbes, 2012). Embora haja uma tendência geral esperada de que a densidade da madeira reduza conforme aumenta o diâmetro de vasos (Preston et al., 2006), em nosso estudo essa tendência só foi observada para a espécies *C. fissilis*. A densidade da madeira depende principalmente da fração de paredes celulares no xilema (Ziemińska et al., 2013). Assim, estudos futuros devem investigar outras características anatômicas do xilema para elucidar os fatores que determinam a variação da densidade básica da madeira, incluindo a espessura das paredes das fibras e a proporção dos diferentes tecidos xilemáticos, como fibras, parênquima, vasos e raios.

4. Conclusões

O efeito da disponibilidade de luz sobre as propriedades da madeira, bem como a relação entre essas propriedades ao longo do gradiente de luz, foi dependente da espécie. Para a maioria das espécies, a densidade básica não foi afetada pela variação na disponibilidade de luz, embora as propriedades anatômicas (diâmetro e frequência de vasos) tenham sido fortemente afetadas. Além disso, para a maior parte das espécies, a variação na densidade básica foi pouco explicada pelas alterações nessas propriedades anatômicas. Estudos futuros devem investigar a consistência desses resultados em árvores com lenho maduro e analisar outras propriedades anatômicas que possam estar relacionadas com a densidade da madeira.

5. Agradecimentos

Agradecemos à Fazenda Experimental da UFAM, ao Laboratório de Silvicultura da UFAM e ao Laboratório de Anatomia, Identificação e Densitometria de Raios X em Madeira da Esalq/USP pelo apoio durante a coleta e análises. Este trabalho contou com financiamento das seguintes fontes: CHAMADA PÚBLICA Nº 001/2020 – FAPESP/FAPEAM (Processo nº 01.02.016301.00280/2021); EDITAL Nº 001/2023 – UNIVERSAL – FAPEAM 20 ANOS (Processo nº 01.02.016301.04320/2023-77); EDITAL PROCAD/AMAZÔNIA 2018 – LINHA 2 (Processo nº 88881.199859/2018-01). S. B. Souza agradece à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Amazonas (FAPEAM) pela concessão da bolsa de iniciação científica (PAIC, EDITAL Nº 001/2025).

6. Referências bibliográficas

Coelho-Silva, D. (2025). Efeito da luz na resistência e estrutura do xilema ao embolismo em espécies amazônicas (Tese de doutoramento). Universidade Estadual Paulista.

Fichtler, E., & Worbes, M. (2012). Wood anatomical variables in tropical trees and their relation to site conditions and individual tree morphology. IAWA Journal, 33(2), 119–140. https://doi.org/10.1163/22941932-90000084

Modolo, G. S., Silva, T. V. M., Santos, V. A. H. F. dos, Neves, A. H. B., Carvalho, A. de O., Assis-Pereira, G., Tomazello-Filho, M., & Ferreira, M. J. (2025). Enrichment planting to restore secondary forests in Central Amazon: A perspective on timber production and carbon sequestration. Forest Ecology and Management, 594, 122936. https://doi.org/10.1016/j.foreco.2025.122936

Preston, K. A., Cornwell, W. K., & DeNoyer, J. L. (2006). Wood density and vessel traits as distinct correlates of ecological strategy in 51 California coast range angiosperms. New Phytologist, 170(4), 807–818. https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2006.01712.x

R Core Team. (2022). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing. https://www.R-project.org/

Santos, V. A. H. F., & Ferreira, M. J. (2020). Initial establishment of commercial tree species under enrichment planting in a Central Amazon secondary forest: Effects of silvicultural treatments. Forest Ecology and Management, 460, 117822. https://doi.org/10.1016/j.foreco.2019.117822

Santos, V. A. H. F., Modolo, G. S., & Ferreira, M. J. (2020). How do silvicultural treatments alter the microclimate in a Central Amazon secondary forest? A focus on light changes. Journal of Environmental Management, 254, 109816. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.109816

Shmulsky, R., & Jones, P. D. (2019). *Forest products and wood science: An introduction* (7th ed.). John Wiley & Sons. https://doi.org/10.1002/9781119426400

Tomazello-Filho, M., Brazolin, S., Chagas, M. P., Oliveira, J. T. da S., Ballarin, A. W., & Benjamin, C. A. (2008). Application of X-ray technique in nondestructive evaluation of eucalypt wood. Maderas. Ciencia y Tecnología, 10(2), 139–149. https://doi.org/10.4067/S0718-221X2008000200006

Ziemińska, K., Butler, D. W., Gleason, S. M., Wright, I. J., & Westoby, M. (2013). Fibre wall and lumen fractions drive wood density variation across 24 Australian angiosperms. AoB PLANTS, 5, plt046. https://doi.org/10.1093/aobpla/plt046

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Influência da temperatura de pirólise nas propriedades de biochar de resíduo de eucalipto

Letícia Costa Peres[1], Angélica de Cássia Oliveira Carneiro[1], Iara Fontes Demuner[1], Antônio José Vinha Zanuncio[2], Braulio da Silva de Oliveira[1]

[1] Universidade Federal de Viçosa
[2] Universidade Federal de Uberlândia

Resumo: O biochar é um material rico em carbono produzido por meio da pirólise, com crescente interesse para o armazenamento estável de carbono no solo a longo prazo. Pode ser produzido com diversos materiais, como os resíduos de eucalipto, uma fonte de biomassa amplamente disponível no Brasil. Este estudo teve como objetivo caracterizar biochar produzido a partir de resíduo de eucalipto em três temperaturas (450, 600 e 750 °C), visando identificar condições de pirólise que permitam obter biochar de maior qualidade para uso como condicionador de solo. Foi realizada análise de componentes principais (ACP) considerando as propriedades do biochar: razões O/Corg e H/Corg, condutividade elétrica, pH, teor de cinzas e carbono armazenado (Carm). O biochar produzido em temperaturas mais altas apresentou menores proporções de H/Corg e O/Corg, e maiores valores de pH, condutividade elétrica e carbono armazenado ($tCO_2eq/1t$ biochar). O biochar produzido em 450 °C não atende a todas as normas, devido a maior relação H/Corg, com valor superior a 0,4. A análise de componentes principais mostrou que a variação da temperatura de pirólise produziu três biochar distintos, sendo os de temperatura intermediária (600 °C) e alta (750 °C) os mais promissores para uso no solo.

Palavras-chave: Análise de Componentes Principais; Carbono; Condicionador de solo.

Influence of pyrolysis temperature on the properties of eucalypt residue biochar

Abstract: Biochar is a carbon-rich material produced through pyrolysis, and it is of growing interest for the long-term stable storage of carbon in soil. It can be produced from various materials, such as eucalypts residues, a widely available biomass source in Brazil. This study aimed to characterize biochar produced from eucalypts residue at three temperatures (450, 600, and 750 °C), seeking to identify pyrolysis conditions that allow obtaining higher quality biochar for use as a soil conditioner. Principal component analysis (PCA) was performed considering the properties of the biochar: O/Corg and H/Corg ratios, electrical conductivity, pH, ash content and stored carbon (Carm). The biochar produced at higher temperatures showed lower H/Corg and O/Corg ratios, and higher values of pH, electrical conductivity, and stored carbon ($tCO_2eq/1t$ biochar). Biochar produced at 450 °C does not meet all the standards, due to a higher H/Corg ratio, with a value greater than 0.4. The principal component analysis showed that the variation in pyrolysis temperature produced three distinct biochar, with those from intermediate (600 °C) and high (750 °C) temperatures being the most promising for use in soil.

Keywords: Principal Component Analysis; Carbon; Soil Conditioner.

1. Introdução

O biochar é um material rico em carbono produzido por meio da pirólise, um processo de conversão termoquímica que ocorre com disponibilidade limitada de oxigênio. A crescente preocupação global com as mudanças climáticas motivou acordos internacionais para a mitigação dessas mudanças, estabelecendo metas de emissões líquidas zero e aumentando o interesse no biochar para o armazenamento estável de carbono no solo a longo prazo (Azzi et al., 2024; Gross et al., 2021; Sun et al., 2023; Yin et al., 2022). Embora o conceito não seja novo, para alcançar tal objetivo é necessário garantir que o material seja rico em carbono e possa ser armazenado de forma estável no solo a longo prazo. Por isso, é importante estudar como diferentes fontes de biomassa e parâmetros de pirólise afetam o biochar.

Os resíduos de eucalipto constituem uma fonte de biomassa amplamente disponível no Brasil, visto que o país possui uma vasta área de florestas plantadas (10,52 milhões de hectares), sendo a maior parte composta por eucalipto (8,1 milhões de hectares) (IBA, 2025), e uma vez que os resíduos florestais do eucalipto podem chegar a 20% (Pena-Vergara et al., 2022), esse material pode ser utilizado como fonte de biomassa para a produção de biochar destinado ao condicionamento do solo, podendo agregar valor à cadeia produtiva florestal.

O biochar é benéfico quando incorporado ao solo, pois aumenta a capacidade de troca catiônica (CTC), corrige o pH de solos ácidos e melhora a estrutura do solo. Ele também pode ser utilizado como parte de substratos para mudas em viveiros. Além de melhorar as propriedades do solo, o potencial de sequestro de carbono do biochar possibilita sua utilização em mercados de crédito de carbono (Adhikari et al., 2024; Fawzy et al., 2021; Salma et al., 2024).

Um dos parâmetros do processo que influencia diretamente o biochar é a temperatura de pirólise, visto que valores mais elevados tendem a produzir biochar com maior teor de carbono e menores teores de hidrogênio e oxigênio, o que pode determinar se o produto atende aos valores normativos (Amenaghawon et al., 2021; Hoang et al., 2021; Liu et al., 2023). A temperatura de pirólise é particularmente importante quando se considera o biochar para o sequestro de carbono; estudos indicam que ela pode ser um fator mais determinante para a qualidade do biochar do que a própria biomassa utilizada. Isso ocorre porque a temperatura de pirólise afeta a química dos grupos funcionais superficiais e a estrutura dos poros, resultando em maior sequestro de carbono, independentemente da biomassa empregada (Enebe et al., 2025). Por essa razão, a temperatura de pirólise na produção de biochar merece investigações mais aprofundadas.

Assim, este estudo teve como objetivo caracterizar biochar produzido a partir de resíduo de eucalipto em três temperaturas (450, 600 e 750 °C), visando identificar, através de análise de componentes principais, a temperatura que permita obter biochar de maior qualidade para uso como condicionador de solo e em aplicações ambientais.

2. Material e métodos

2.1 Pirólise

A biomassa utilizada neste estudo consistiu em resíduo de madeira de eucalipto, em forma de pequenos cavacos, com a maioria das partículas apresentando dimensões entre 12,5 e 8 mm. A pirólise foi realizada durante uma hora, a temperaturas fixas de 450, 600 e 750 °C, utilizando 1500 g de biomassa previamente seca em estufa (100 ± 5 °C). Para cada tratamento, uma mufla elétrica (GP Científica 2000) foi pré-aquecida até a temperatura de pirólise, e um reator metálico de 16x16x42 cm foi inserido no equipamento, provocando uma queda na temperatura. A contagem do tempo teve início assim que a mufla recuperou a temperatura de pirólise desejada, estendendo-se por uma hora. Posteriormente, o reator metálico foi retirado da mufla e resfriado até a temperatura ambiente; em seguida, foi aberto para a recuperação do biochar.

2.2 Propriedades do biochar

Para determinar o pH e a condutividade elétrica, uma amostra do biochar foi moído e peneirado para obter partículas menores que 2 mm. Em um recipiente de vidro, 5 gramas de biochar e 50 mL de água deionizada foram agitados por 1 hora em agitador orbital, a 285 rpm e 25 °C. Em seguida, a suspensão foi deixada em repouso para decantação por 30 minutos. Por fim, foram medidos a condutividade elétrica e o pH.

Uma porção do biochar então moído e peneirado para obter uma granulometria entre 40 e 60 mesh para a composição química elementar, que foi determinada utilizando o equipamento TruSpec Micro (LECO), de acordo com a norma ISO 16948 (ISO, 2015). Para o enxofre (S), utilizou-se o módulo TruSpec S, e para o carbono (C), hidrogênio (H) e nitrogênio (N), utilizou-se o módulo TruSpec Micro. O teor de cinzas foi determinado em mufla de acordo com ASTM D1762 – 84 (2021). O teor de oxigênio (O) foi estimado subtraindo-se de 100 a soma dos teores de carbono, nitrogênio, hidrogênio, enxofre. Os valores foram ajustados proporcionalmente retirando a fração do teor de cinzas. Os teores estimados de carbono inorgânico e orgânico foram calculados utilizando um fator fixo da norma PURO.EARTH (2025) para madeira. As

razões H/Corg e O/Corg foram calculadas dividindo-se a porcentagem de cada elemento pela sua massa atômica. O armazenamento de carbono no biochar (Carm) foi determinado de acordo a norma PURO.EARTH (2025), considerando 1 tonelada de biochar.

2.3 Análise dos dados

O experimento foi realizado em Delineamento Inteiramente Casualizado, com três temperaturas de pirólise e três repetições. As análises foram realizadas em duplicata para o biochar produzido em cada pirólise. A análise de componentes principais (ACP) foi realizada utilizando o software R e os pacotes ggplot2 (Wickham, 2026), FactoMineR (Lê et al., 2008) e factoextra (Kassambara e Mundt, 2026). Para essa análise, foram consideradas as seguintes propriedades do biochar: razões O/Corg e H/Corg; condutividade elétrica; pH; teor de cinzas e carbono armazenado (Carm). Os componentes 1 e 2 foram plotados juntamente com vetores e pontos de dados para observar as relações entre eles.

3. Resultados e discussão

Na análise de componentes principais os autovalores, a porcentagem de variância e a porcentagem de variância cumulativa para os componentes principais foram calculados, e 6 componentes foram necessários para explicar 100% dos dados; no entanto, os componentes 1 e 2 têm variância cumulativa de 99,65% e foram selecionados para a análise subsequente (Tabela 1).

Tabela 1 - Autovalores, percentual de variância e percentual de variância acumulada associada as componentes principais

	Autovalor	**Variância (%)**	**Variância acumulada (%)**
Componente 1	5,573	92,881	92,881
Componente 2	0,406	6,772	99,653
Componente 3	0,013	0,225	99,878
Componente 4	0,005	0,080	99,958
Componente	0,002	0,041	99,999

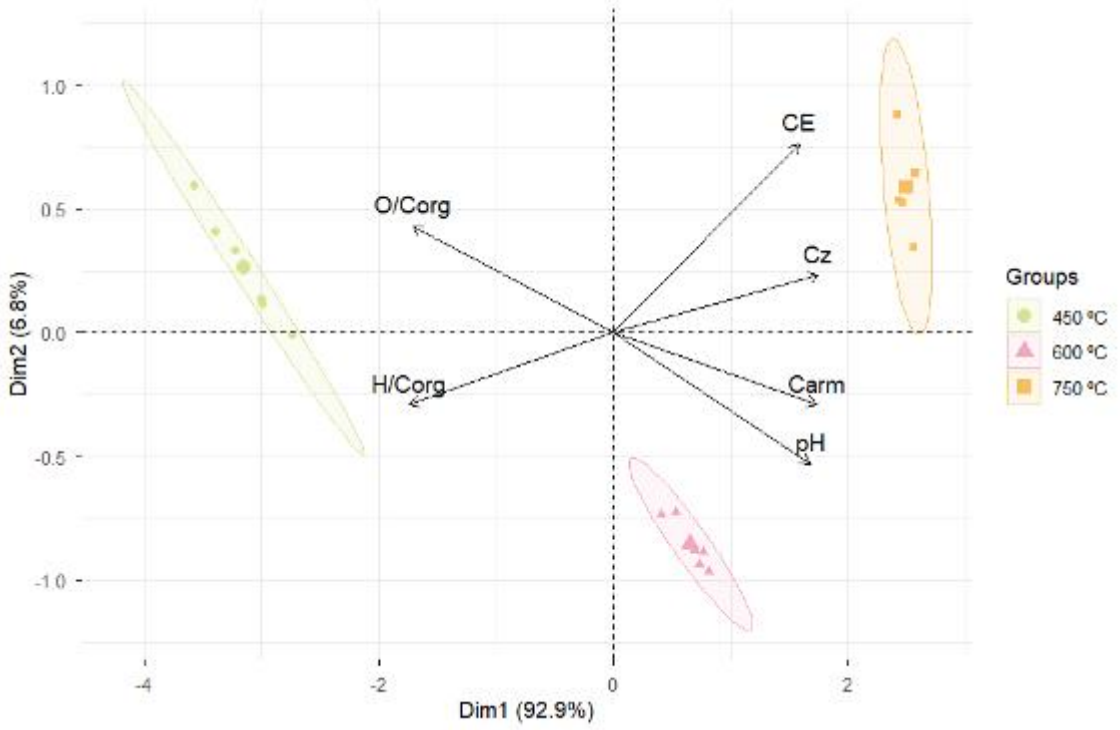
5 Componente 6	0,000	0,001	100,000

O componente 1 sozinho tem uma variância cumulativa de 92,88% e os valores dos autovetores foram distribuídos entre as propriedades, indicando que contribuíram para explicar a maior parte da variação dos dados. Quanto ao componente 2, os maiores valores para os autovetores foram para condutividade elétrica, pH e O/Corg, respectivamente.

Tabela 2 - Autovetores das propriedades dos biochar

Propriedades	**Componente 1**	**Componente 2**
Teor de cinzas (%) (Cz)	17,58	4,31
Razão molar entre teor de oxigênio e teor de carbono orgânico (O/Corg)	16,82	14,60
Razão molar entre teor de hidrogênio e teor de carbono orgânico (H/Corg)	17,41	6,60
Carbono armazenado (tCO_2eq) para 1 tonelada de biochar (Carm)	17,42	6,60
potencial hidrogeniônico (pH)	16,20	22,00
Condutividade elétrica (µS/cm) (CE)	14,56	45,89

Um biplot de análise de componentes principais (PCA) entre os componentes 1 e 2 foi construído para visualizar os dados e observar as relações entre as propriedades do biochar. Além disso, os dados para os diferentes biochar de pirólise foram plotados com elipses para visualizar a distribuição espacial dos dados e como ela diferencia os tratamentos (Figura 1).



Legenda: Cz = Teor de cinzas (%); O/Corg = Razão molar entre teor de oxigênio e teor de carbono orgânico; H/Corg = Razão molar entre teor de hidrogênio e teor de carbono orgânico; Carm = Carbono armazenado (tCO2eq) para 1 tonelada de biochar; pH = potencial hidrogeniônico; CE = Condutividade elétrica (µS/cm)

Figura 1 - Vetores das propriedades do biochar e dispersão dos escores classificados pela temperatura de pirólise com elipses em relação aos componentes principais 1 e 2

As amostras de biochar pirolisadas em diferentes temperaturas foram evidenciadas por três elipses distintas. A disposição dos vetores demonstra correlação positiva do biochar pirolisado em menor temperatura (450 °C) com maiores valores das razões molares O/Corg e H/Corg. Já os biochar pirolisados nas temperaturas intermediária (600 °C) e mais alta (750 °C) demonstraram correlação positiva com as demais propriedades.

Ao longo do processo de pirólise há a concentração de carbono por meio da degradação dos demais componentes. Além do carbono, os materiais inorgânicos não são degradados e se concentram, demonstrado pelo aumento no teor de cinzas. Por este motivo, há correlação negativa entre os vetores das razões molares e do teor de cinzas. O aumento do teor de cinzas viabiliza a maior concentração de ions em solução, de forma que há um aumento na condutividade elétrica. O aumento do pH e da CE pode ser atribuído à degradação térmica de grupos funcionais ácidos e à concentração de materiais inorgânicos ao longo da pirólise (Babu et al., 2024). Estudos demonstraram que o biochar pode elevar o pH do solo e que o biochar

pirolisado a temperaturas mais baixas não teve efeito significativo no pH do solo (Yu et al., 2024).

O carbono armazenado ($tCO_2eq/1t$ biochar) também aumentou com maiores temperaturas de pirólise, demonstrando que para créditos de carbono maiores temperaturas favorecem maior quantidade de carbono armazenado pelo mesmo volume de biochar.

Os padrões internacionais de biochar para uso do solo A maioria das normas exige que a relação entre hidrogênio e carbono orgânico (H/Corg) seja inferior a 0,7 ou 0,4, dependendo da categoria, sendo que as normas mais rigorosas exigem o valor mais baixo, e que a razão molar entre teor de oxigênio e teor de carbono orgânico (O/Corg) seja inferior a 0,4 (WBC, 2024). Estes valores podem ser visualizados no diagrama de Van Krevelen (Figura 2).

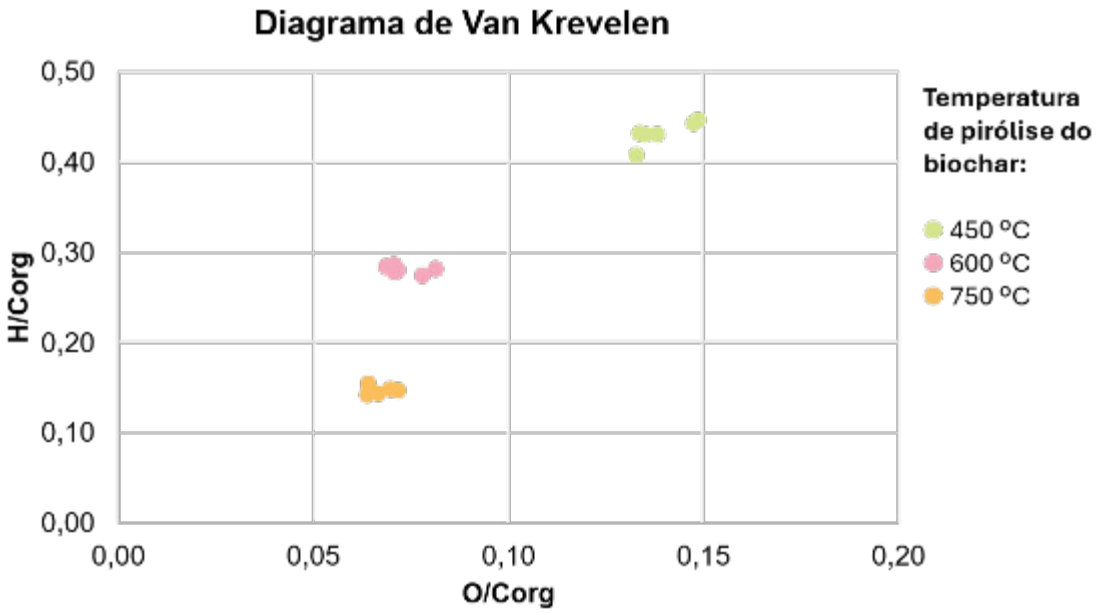


Figura 2 - Diagrama de Van Krevelen para biochar produzido em diferentes temperaturas.

Os valores observados para H/Corg para todos os biochar são menores que 0,5, portanto, apenas o biochar produzido a 450 °C não atende às normas mais rigorosas, que exigem valores menores que 0,4 (WBC, 2024). O biochar produzido em 750 °C apresentou valor inferior de H/Corg que o produzido em 600 °C. A razão O/Corg em todos os biochar está bem abaixo do valor limite de 0,4 (WBC, 2024), também diminuindo em biochar de temperaturas mais altas, o que no geral demonstra a concentração do teor de carbono orgânico em maiores temperaturas de pirólise.

4. Conclusões

O biochar produzido em temperaturas mais altas apresentou menores proporções de H/Corg e O/Corg, e maiores valores de pH, condutividade elétrica e carbono armazenado ($tCO_2eq/1t$ biochar). Os resultados da análise de componentes principais mostraram que a variação da temperatura de pirólise produziu três biochar distintos, sendo os de temperatura intermediária (600 °C) e alta (750 °C) os mais promissores para uso no solo. Apenas o biochar produzido em 450 °C não atende a todas as normas, devido à maior relação entre hidrogênio e carbono orgânico (H/Corg).

5. Agradecimentos

Este trabalho foi viabilizado, em parte, pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) – Processos APQ-05311-24 e APQ-04599-25, pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) – Processo n° 444395/2024-5, e pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) Código de Financiamento 001. Os autores expressam sua gratidão ao Laboratório de Painéis de Madeira e Energia (LAPEM-UFV) e ao Laboratório de Celulose e Papel (LCP-UFV) da Universidade Federal de Viçosa (UFV), e à Universidade Federal de Uberlândia (UFU) pelo auxílio nas análises.

6. Referências bibliográficas

Adhikari, S., Moon, E., Paz-Ferreiro, J., & Timms, W. (2024). Comparative analysis of biochar carbon stability methods and implications for carbon credits. *Science of the Total Environment*, *914*, 169607–169607. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.169607

Amenaghawon, A. N., Anyalewechi, C. L., Okieimen, C. O., & Kusuma, H. S. (2021). Biomass pyrolysis technologies for value-added products: A state-of-the-art review. *Environment, Development and Sustainability*, *23*. https://doi.org/10.1007/s10668-021-01276-5

American Society for Testing and Materials. (2021). *ASTM D1762 – 84: Standard Test Method for Chemical Analysis of Wood Charcoal*. West Conshohocken, USA.

Azzi, E. S., Li, H., Cederlund, H., Karltun, E., & Sundberg, C. (2024). Modelling biochar long-term carbon storage in soil with harmonized analysis of decomposition data. *Geoderma*, *441*, 116761–116761. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2023.116761

Babu, K. K. B. S., Nataraj, M., Tayappa, M., Vyas, Y., Mishra, R. K., & Acharya, B. (2024). Production of biochar from waste biomass using slow pyrolysis: Studies of the effect of pyrolysis temperature and holding time on biochar yield and properties. *Materials Science for Energy Technologies*. https://doi.org/10.1016/j.mset.2024.05.002

Enebe, M. C., Ray, R. L., & Griffin, R. W. (2025). The Impacts of Biochar on Carbon Sequestration, Soil Processes, and Microbial Communities: A Review. *Biochar*, *7*(1). https://doi.org/10.1007/s42773-025-00499-3

Fawzy, S., Osman, A. I., Yang, H., Doran, J., & Rooney, D. W. (2021). Industrial Biochar Systems for Atmospheric Carbon Removal: A Review. *Environmental Chemistry Letters*, *19*(4), 3023–3055. https://doi.org/10.1007/s10311-021-01210-1

Gross, A., Bromm, T., & Glaser, B. (2021). Soil Organic Carbon Sequestration after Biochar Application: A Global Meta-Analysis. *Agronomy*, *11*(12), 2474. https://doi.org/10.3390/agronomy11122474

Hoang, A. T., Ong, H. C., Fattah, I. M. R., Chong, C. T., Cheng, C. K., Sakthivel, R., & Ok, Y. S. (2021). Progress on the lignocellulosic biomass pyrolysis for biofuel production toward environmental sustainability. *Fuel Processing Technology*, *223*, 106997. https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2021.106997

Indústria Brasileira de Árvores. (2025). *Relatório Anual Ibá 2025*. São Paulo, SP.

International Organization for Standardization. (2015). *ISO 16948:2015: Solid biofuels — Determination of total content of carbon, hydrogen and nitrogen*.

Kassambara, A., & Mundt, F. (2026). *Factoextra: Extract and Visualize the Results of Multivariate Data Analyses.*

Lê, S., Josse, J., & Husson, F. (2008). FactoMineR: AnRPackage for Multivariate Analysis. *Journal of Statistical Software*, *25*(1). https://doi.org/10.18637/jss.v025.i01

Liu, J., Chen, X., Chen, W., Xia, M., Chen, Y., Chen, H., … Yang, H. (2023). Biomass Pyrolysis Mechanism for Carbon-Based High-Value Products. *Proceedings of the Combustion Institute*, *39*(3), 3157–3181. https://doi.org/10.1016/j.proci.2022.09.063

Pena-Vergara, G., Castro, L. R., Gasparetto, C. A., & Bizzo, W. A. (2022). Energy from Planted Forest and Its Residues Characterization in Brazil. *Energy*, *239*, 122243. https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.122243

PURO.EARTH. (2025). *Biochar Methodology for CO2 Removal*. Puro Standard.

Salma, A., Fryda, L., & Djelal, H. (2024). Biochar: A Key Player in Carbon Credits and Climate Mitigation. *Resources*, *13*(2), 31. https://doi.org/10.3390/resources13020031

Sun, J., Lu, X., Chen, G., Luo, N., Zhang, Q., & Li, X. (2023). Biochar promotes soil aggregate stability and associated organic carbon sequestration and regulates microbial community structures in Mollisols from northeast China. *SOIL*, *9*(1), 261–275. https://doi.org/10.5194/soil-9-261-2023

Wickham, H., Chang, W., Henry, L., Pedersen, T. L., TTakahashi,K., Wilke, C., … van den Brand, T. (2026). *ggplot2: Create Elegant Data Visualisations Using the Grammar of Graphics*. https://doi.org/10.32614/CRAN.package.ggplot2

Yin, J., Zhao, L., Xu, X., Li, D., Qiu, H., & Cao, X. (2022). Evaluation of long-term carbon sequestration of biochar in soil with biogeochemical field model. *Science of The Total Environment, 822*, 153576. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.153576

Yu, B., Yang, K., Cui, M., Chen, Z., Dai, Y., Qian, X., & Chen, Z. (2024). Meta-analysis study on the role of biochar on soil nitrogen cycling. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, *24*(3), 5644–5660. https://doi.org/10.1007/s42729-024-01931-6

WBC (2023): World Biochar Certificate – *Guidelines for a Sustainable Production of Biochar and its Certification*.' Carbon Standards International, Frick, Switzerland, (http://www.european-biochar.org), version 1.1 from 20th December 2024

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Influência das características anatômicas na propagação de ondas ultrassônicas em sete madeiras brasileiras

Davi Rogério Guimarães[1]; Fernanda Alves Catein[1]; Nathalia Gabriele Franca Dias Polido[1]; Henzza Ferreira Rocha[1]; Náthali dos Santos Toniatto Alves[1]; Maria Eduarda Meira Pratti[1]; Daniele Ingrid Moreira Damásio[1]; Rejane Costa Alves[1]

[1] Universidade Federal do Espírito Santo 01

Resumo: O uso de técnicas não destrutivas para avaliação da qualidade da madeira tem crescido nos últimos anos, destacando-se a propagação de ondas ultrassônicas. Este estudo avaliou a relação entre características anatômicas e a propagação de ondas em sete madeiras brasileiras: angelim-pedra (*Hymenolobium petraeum*), angelim-vermelho (*Dinizia excelsa*), castanheira (*Bertholletia excelsa*), garapa (*Apuleia leiocarpa*), muiracatiara (*Astronium lecointei*), pequi (*Caryocar villosum*) e roxinho (*Peltogyne discolor*). Foram analisadas as dimensões e frequência dos vasos, as dimensões dos raios e espessura de parede das fibras, além da velocidade de propagação de ondas ultrassônicas na direção longitudinal, utilizando frequência de 150 kHz. Os resultados evidenciaram diferenças entre as espécies quanto às características anatômicas e à velocidade de propagação. O roxinho e o angelim-pedra apresentaram as maiores velocidades de propagação, enquanto o angelim-vermelho apresentou a menor velocidade entre as espécies estudadas. Os resultados indicam que a variabilidade anatômica entre as espécies está associada às diferenças na transmissão das ondas ultrassônicas.

Palavras-chave: Longitudinal; Anatomia; Espécies nativas.

Influence of anatomical characteristics on ultrasonics wave propagation in seven Brazilian woods species

Abstract: **Abstract:** The use of non-destructive techniques for assessing wood quality has increased in recent years, with ultrasonic wave propagation standing out among them. This study evaluated the relationship between anatomical characteristics and wave propagation in seven Brazilian woods: angelim-pedra (*Hymenolobium petraeum*), angelim-vermelho (*Dinizia excelsa*), castanheira (*Bertholletia excelsa*), garapa (*Apuleia leiocarpa*), muiracatiara (*Astronium lecointei*), pequi (*Caryocar villosum*), and roxinho (*Peltogyne discolor*). Vessel dimensions and frequency, ray dimensions, and fiber wall thickness were analyzed, as well as the propagation velocity of ultrasonic waves in the longitudinal direction, using a frequency of 150 kHz, were analyzed. The results showed differences among the species regarding anatomical characteristics and propagation velocity. Roxinho and angelim-pedra presented the highest propagation velocities, while angelim-vermelho presented the lowest velocity among the species studied. The results indicate that anatomical variability among species is associated with differences in ultrasonic wave transmission.

Keywords: Longitudinal; Anatomy; Native Species.

1. Introdução

A avaliação não destrutiva da madeira vem crescendo nos setores científico e industrial, uma vez que possibilita a estimativa de propriedades físicas, mecânicas e estruturais, sem comprometer sua integridade, destacando-se especialmente os métodos baseados na propagação de ondas acústicas (Bucur, 2023). Desde a década de 1980, pesquisadores investigam a relação entre as constantes elásticas da madeira e sua estrutura interna. Bucur (1983) foi uma das primeiras a apontar que as diferenças entre as constantes elásticas de madeiras com baixa densidade poderiam estar associadas à anatomia microscópica. Essa relação, no entanto, varia conforme a direção de propagação da onda em relação ao grão da madeira.

Na direção longitudinal, a propagação das ondas ultrassônicas ocorre paralelamente às fibras, e sua velocidade pode ser influenciada pela anisotropia e pela heterogeneidade estrutural da madeira (Xu et al., 2014). Nesse sentido, elementos anatômicos orientados perpendicularmente às fibras, como os raios, podem interferir na trajetória das ondas (Espinosa et al., 2019).Nas direções tangencial e radial, a anatomia exerce maior influência sobre a propagação da onda do que na longitudinal, na qual fatores como a geometria do corpo de prova parecem ser mais determinantes (Espinoza-Herrera et al., 2025). Outros parâmetros, como densidade da madeira, teor de umidade, ângulo microfibrilar e composição química da parede celular, também exercem influência significativa sobre a transmissão das ondas, uma vez que afetam diretamente a rigidez, a elasticidade e o comportamento viscoelástico do material (Dijoux et al., 2026; Van Duong et al., 2025).

Estudos mais recentes passaram a investigar a propagação de ondas em espécies plantadas, com foco na estimativa de propriedades como umidade, densidade e módulos de elasticidade e de ruptura (Acuña et al., 2023; Dijoux et al., 2026; Sirswal et al., 2025). No entanto, trabalhos que relacionem os caracteres anatômicos microscópicos com a velocidade de propagação de onda em madeiras comerciais brasileiras ainda são escassos na literatura. Diante desse contexto, o presente trabalho buscou caracterizar anatomicamente sete espécies de madeiras brasileiras de importância comercial e investigar de que forma seus parâmetros anatômicos, como dimensões dos vasos, raios e fibras, influenciam a velocidade de propagação de onda ultrassônica na direção longitudinal.

2. Material e métodos

Foram estudadas sete espécies de madeiras brasileiras: angelim-pedra (*Hymenolobium petraeum*), angelim-vermelho (*Dinizia excelsa*), castanheira (*Bertholletia excelsa*), garapa (*Apuleia leiocarpa*), muiracatiara (*Astronium lecointei*), pequi (*Caryocar villosum*) e roxinho (*Peltogyne discolor*), conforme ilustrado na Figura 1. Para cada espécie, foram utilizadas sete vigas de origem comercial, as vigas foram desdobradas para corpos de prova, que foram submetidos a uma secagem natural até atingir a umidade de 12% e com dimensões de 5 x 5 x 15 cm. A densidade aparente das madeiras, determinada a 12% de umidade, apresentou variação entre as espécies avaliadas. O angelim-vermelho apresentou a maior densidade aparente, com 1.131 kg/m³, seguido pela garapa, com 946 kg/m³, e pelo roxinho, com 933 kg/m³. A muiracatiara apresentou densidade de 780 kg/m³, enquanto o pequi apresentou 783 kg/m³. Já o angelim-pedra apresentou densidade aparente de 761 kg/m³. A menor densidade foi observada para a castanheira, com 696 kg/m³.



Figura 1 - Fluxograma do desenho experimental: espécies estudadas, caracterização anatômica e ensaio de propagação de ondas ultrassônicas.

Caracterização anatômica

A caracterização anatômica foi realizada de acordo com as recomendações da Comissão Panamericana de Normas Técnicas (COPANT, 1974) e da lista de características microscópicas para a identificação da madeira da Associação Internacional de Anatomistas de Madeira (IAWA et al., 1989).

Para medir a frequência vascular (n° de vasos), diâmetro tangencial de vasos (µm), altura, largura e frequência dos raios (µm), o comprimento da fibra, largura, diâmetro do lume e espessura de parede (µm) o microscópio Zeiss, modelo Axio Scope.A1 acoplado ao software Axio Vision SE64 foi utilizado. Para cada parâmetro, foram realizadas trinta repetições. Para a mensuração das fibras, realizou-se a dissociação dos elementos anatômicos, utilizando o método proposto por Nicholls e Dadswell, descrito por Andrade Bueno et al., (2020).

Para a espécie garapa (*Apuleia leiocarpa*), não foi possível preparar a lâmina anatômica, inviabilizando a obtenção dos dados de diâmetro e frequência de vasos. Dessa forma, essa espécie foi excluída das análises relacionadas a esses dois parâmetros específicos, sendo mantida nas demais avaliações anatômicas e na análise de propagação de onda.

Ensaio de propagação de ondas

A análise de propagação de onda seguiu as recomendações da ASTM E494 (2020), utilizada como referência metodológica e adaptada às características anisotrópicas e heterogêneas da madeira. Para a realização do teste, foi utilizado o equipamento de ultrassom James Instruments, modelo V-Meter MK IV, com transdutores operando a uma frequência de 150 kHz, pelo método direto de transmissão de sinal. O equipamento emite pulsos elétricos, que são convertidos em ondas ultrassônicas pelo cristal piezelétrico do transdutor emissor. As ondas atravessam o corpo de prova e, após se propagarem, os sinais são detectados pelo transdutor receptor, o que permite evidenciar o tempo de propagação em microssegundos. Foram realizadas sete leituras ultrassônicas em cada corpo de prova, sendo utilizadas as mesmas para as avaliações das características anatômicas. Os corpos de prova apresentavam teor de umidade de aproximadamente 12% durante a realização dos ensaios. Os ensaios foram realizados na direção longitudinal, paralela às fibras da madeira, mantendo a mesma orientação das fibras em todos os corpos de prova. A velocidade de propagação foi calculada por meio da Equação (1), com base no tempo de propagação e na distância percorrida.

$$V = \frac{d}{t}$$ Equação 1

em que:

V = velocidade de propagação da onda (m/s);

d = distância percorrida, correspondente ao comprimento do corpo de prova (m);

t = tempo de propagação (s).

Análise estatística

As médias foram comparadas pelo teste de Tukey, ao nível de 5% de significância ($p < 0,05$). A relação entre os parâmetros anatômicos (dimensões de vasos, raios e fibras) e a velocidade de propagação de onda ultrassônica na direção longitudinal foi avaliada por meio de análise de regressão, com base no coeficiente de determinação (R^2). As análises estatísticas foram realizadas no software Minitab (2019).

3. Resultados e discussão

A Tabela 1 apresenta os valores médios de diâmetro e frequência dos vasos, além das dimensões dos raios, para cada espécie. O pequi e o angelim-pedra destacaram-se pelos maiores diâmetros de vasos, associados a menores frequências, enquanto muiracatiara e roxinho apresentaram o padrão inverso, com vasos de menor diâmetro em maior frequência por área.

Tabela 1 – Valores médios e desvio padrão (parênteses) dos caracteres anatômicos dos vasos e raios nas sete espécies de madeiras estudadas.

	Vasos		**Raio**		
	Diâmetro	**Frequência**	**Altura**	**Largura**	**Frequência**
	µm	**vasos/ mm²**	**µm**	**µm**	**raios/ mm²**
Angelim-pedra	264,25 B	2 D	445,21 B	52,16 A	1 C
	(37,04)	(0,69)	(70,11)	(13,98)	(0,31)
Angelim-vermelho	198,24 C	3 C	313,94 D	44,08 B	2 B
	(41,23)	(1,02)	(53,61)	(11,10)	(0,35)
Castanheira	171,41 D	3 C	305,39 D	31,55 D	2 B
	(36,59	(1,01)	(76,45	(7,26)	(0,26)

	)		)		
Garapa	-		256,75 E	35,98 CD	2 B
	-	-	(25,80)	(7,10)	(0,25)
Muiracatiara	144,20 E	6 A	305,65 D	34,11 CD	1 C
	(25,56)	(1,69)	(93,26)	(13,37)	(0,40)
Pequi	285,56 A	2 D	690,89 A	32,77 D	3 A
	(38,34)	(0,83)	(215,74)	(9,17)	(0,60)
Roxinho	143,28 E	5 B	402,84 C	34,24 CD	2 B
	(30,10)	(3,09)	(160,14)	(10,16)	(0,30)

Médias seguidas pela mesma letra na vertical, não diferem estatisticamente entre si (Tukey; $p < 0,05$).

Chen et al., (2025) destacam a existência de uma relação inversa entre diâmetro e frequência de vasos, nomeando essa compensação anatômica como "packing rule" ou “regra de empacotamento”. Esse termo se refere ao fato de que vasos mais largos tendem a ocorrer em menor número por área. Esse padrão foi observado de forma geral entre as espécies estudadas, com as madeiras de maior diâmetro de vasos tendendo a apresentar menor frequência, e vice-versa.

Quanto aos raios, o pequi apresentou a maior altura, superando em 169,1% o menor valor observado, registrado na garapa. Em relação à largura, o angelim-pedra apresentou o maior valor, 65,3% superior ao da castanheira. Já para a frequência, o pequi novamente se destacou com o maior valor, enquanto angelim-pedra e muiracatiara registraram as menores frequências. Por serem elementos orientados perpendicularmente ao eixo longitudinal, os raios não exercem influência direta na propagação da onda ultrassônica nessa direção (Bucur, 2006), sendo aqui caracterizados como parte da descrição anatômica geral das espécies. As fibras, por outro lado, alinham-se paralelamente à direção de propagação e influenciam diretamente esse processo (Pahnabi et al., 2024), razão pela qual as dimensões das fibras também foram avaliadas neste estudo.

Na Tabela 2 são mostrados os valores espessura da parede das fibras de cada espécie.

Tabela 2 – Valores médios e desvio padrão (parênteses) da espessura de parede das fibras, nas sete espécies de madeiras estudadas.

Madeiras	Espessura µm
Angelim-pedra	9,9616 A (2,23)
Angelim-vermelho	5,7267 C (1,60)
Castanheira	4,1344 D (0,91)
Garapa	5,2633 C (0,97)
Muiracatiara	3,6799 D (0,75)
Pequi	8,0349 B (2,14)
Roxinho	5,1772 C (0,92)

Médias seguidas pela mesma letra na vertical, não diferem estatisticamente entre si (Tukey; $p < 0,05$).

A espessura da parede das fibras se mostrou relevante nesse contexto. O angelim-pedra apresentou o maior valor (9,96 µm), 63,1% superior ao da muiracatiara, que novamente registrou o menor valor (3,68 µm). Conforme demonstrado por Newton (2018) em seu estudo sobre o pinheiro-de-banks (*Pinus banksiana*), características como espessura da parede celular e ângulo microfibrilar também estão associadas à velocidade acústica da madeira, uma vez que influenciam sua rigidez estrutural. Dessa forma, os caracteres anatômicos das fibras contribuem para a propagação de ondas, podendo exercer influência tão ou mais relevante do que a densidade da madeira (Mason et al., 2017).

A Tabela 3 apresenta os valores médios de velocidade de propagação na direção longitudinal para cada espécie. O roxinho (5531,1 m/s) e o angelim-pedra (5318,4 m/s) apresentaram as maiores velocidades de propagação dentre as espécies. Esse resultado pode ser

associado à maior espessura de parede das fibras do angelim-pedra (9,96 µm) e ao menor diâmetro de vasos do roxinho (143,28 µm), ambos fatores relacionados ao aumento da rigidez estrutural e à maior velocidade de transmissão da onda (Dahlen et al., 2023). O pequi, apesar de apresentar as fibras mais longas (2262,5 µm) e a segunda maior espessura de parede (8,03 µm), obteve velocidade relativamente baixa frente às espécies mais rígidas (4750,7 m/s), resultado atribuído ao seu maior diâmetro de vasos (285,56 µm), o que reforça a atuação combinada, e não isolada, dos parâmetros anatômicos sobre a velocidade de propagação (Bucur, 2023).

Tabela 3 – Valores médios e desvio padrão (parênteses) da velocidade de propagação de ondas ultrassônicas na direção longitudinal de cada espécie.

Madeiras	Médias da velocidade
Roxinho	5531,132 A
	(167,1)
Angelim-pedra	5318,393 A
	(110,5)
Garapa	4920,149 B
	(176,9)
Castanheira	4863,097 B
	(182,6)
Pequi	4750,721 B
	(201,3)
Muiracatiara	4688,733 BC
	(379,0)
Angelim-vermelho	4377,699 C
	(142,1)

Médias seguidas pela mesma letra na vertical, não diferem estatisticamente entre si (Tukey; $p < 0,05$).

As menores velocidades foram observadas no angelim-vermelho (4377,7 m/s), 20,9% inferior à do roxinho, e na muiracatiara (4688,7 m/s), 15,2% inferior à do roxinho. A muiracatiara também apresentou a menor espessura de parede (3,68 µm) e o menor comprimento de fibra (1025,6 µm) entre as espécies estudadas, características associadas à menor resistência estrutural e à redução da velocidade de transmissão do sinal acústico (Yang et

al., 2025). A variação observada entre espécies reflete a heterogeneidade anatômica intrínseca às madeiras tropicais, cuja organização tecidual influencia diretamente a anisotropia acústica do material (Espinosa et al., 2019; Xu et al., 2014). Essa variação entre espécies já era esperada, uma vez que a madeira é um material heterogêneo (Esteban et al., 2024).

Os valores de velocidade média de propagação de ondas ultrassônicas na direção longitudinal foram próximos aos encontrados na literatura para algumas espécies. Para a garapa (*Apuleia leiocarpa*), foi obtido 4920,15 m s^{-1}, enquanto Gonçalves et al., (2011) registraram 5408 m s^{-1}, sendo o valor da literatura 9,0% superior. Para a castanheira (*Bertholletia excelsa*), a velocidade de 4863,10 m s^{-1} foi 3,5% inferior aos 5038,79 m s^{-1} encontrados por Hélio de Novais Miranda et al., (2022). Já o angelim-vermelho (*Dinizia excelsa*) apresentou 4377,70 m s^{-1}, 14,8 a 16,2% inferior aos valores de 5137, 5227 e 5183 m s^{-1} encontrados por Bertoldo et al., (2023). Essas diferenças podem estar relacionadas às diferentes condições de ensaio, como frequência dos transdutores, dimensões dos corpos de prova e condições da madeira.

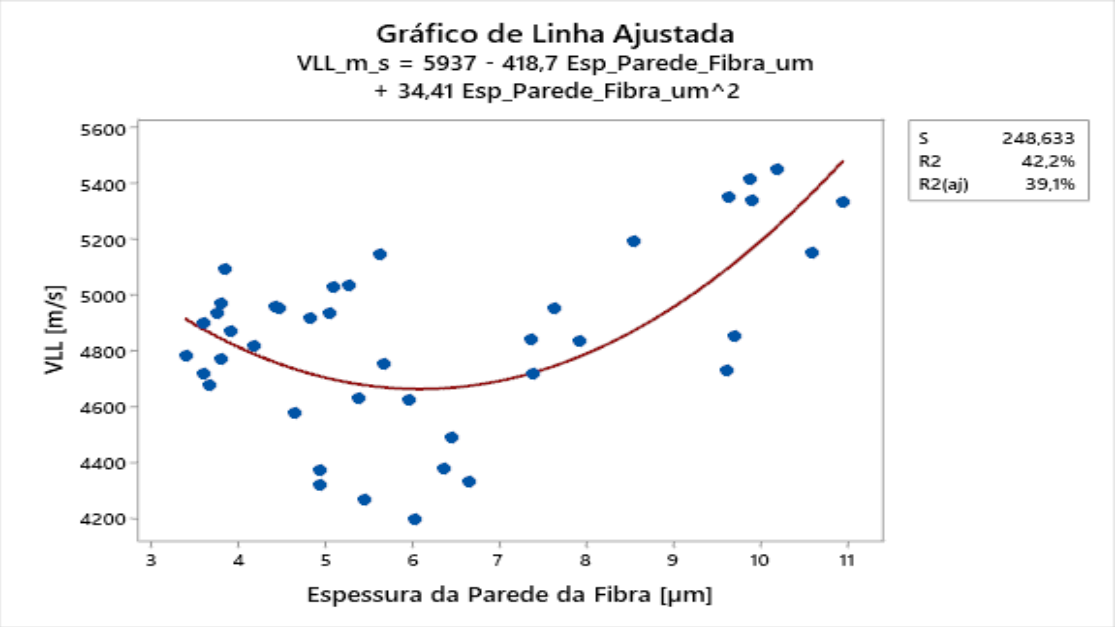


Figura 2 - Relação quadrática entre a velocidade de propagação ultrassônica longitudinal e a espessura da parede da fibra.

Ao avaliar essa relação no nível de amostra individual (n = 41), constatou-se que a associação entre a espessura de parede da fibra e a VLL não é linear, mas quadrática (R^2 = 42,2%; R^2 ajustado = 39,2%; $p < 0,001$), indicando que tanto fibras de parede mais fina quanto mais espessa estão associadas a velocidades de propagação mais elevadas, com um ponto de

menor velocidade em espessuras intermediárias, próximas a 6 µm. Esse padrão sugere a atuação de mecanismos distintos nos dois extremos da variação anatômica: em fibras mais espessas, como as do angelim-pedra, o aumento da rigidez estrutural parece favorecer diretamente a velocidade de propagação (Newton, 2017; Vladimiro et al., 2003); já em fibras muito finas, outros fatores anatômicos ou estruturais possivelmente compensam a menor rigidez, resultando em velocidades igualmente elevadas (Vladimiro et al., 2003). A propagação das ondas ultrassônicas na madeira não deve ser atribuída a um único parâmetro de forma isolada, uma vez que resulta da interação entre diferentes características anatômicas, físicas e estruturais da madeira (Bucur, 2006).

4. Conclusões

As sete espécies apresentaram diferenças anatômicas entre vasos, raios e fibras, com ocorrência do padrão de compensação entre diâmetro e frequência dos vasos (packing rule). O roxinho apresentou a maior VLL, enquanto o angelim-vermelho apresentou a menor. A espessura da parede da fibra apresentou relação quadrática significativa com a VLL, com R^2 = 42,2% e R^2 ajustado = 39,2% ($p < 0,001$), indicando associação moderada, enquanto os demais parâmetros anatômicos não apresentaram correlações significativas. Os resultados contribuem para a compreensão da influência da anatomia na propagação ultrassônica e para o uso potencial de métodos não destrutivos na caracterização da madeira. Para a garapa (*Apuleia leiocarpa*), não foi possível obter as dimensões dos vasos e raios, sendo necessários estudos futuros com maior número de espécies e amostras, incluindo diferentes direções de propagação e propriedades mecânicas.

5. Agradecimentos

Os autores agradecem, à Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação do Espírito Santo (FAPES) e à Universidade Federal do Espírito Santo (UFES) pelo apoio técnico, institucional e financeiro que possibilitou a realização deste estudo.

6. Referências bibliográficas

Acuña, L., Martínez, R., Spavento, E., Casado, M., Álvarez-Martínez, J., O'Ceallaigh, C., Harte, A. M., & Balmori, J.-A. (2023). Modulus of elasticity prediction through transversal vibration in cantilever beams and ultrasound technique of different wood species. *Construction and Building Materials*, *371*, 130750. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.130750

Andrade Bueno, I. G., Picoli, E. A. de T., Isaias, R. M. dos S., Barbosa Lopes-Mattos, K. L., Cruz, C. D., Naomi Kuki, K., & Valverde Zauza, E. A. (2020). Wood anatomy of field grown eucalypt genotypes exhibiting differential dieback and water deficit tolerance. *Current Plant Biology*, *22*, 100136. https://doi.org/10.1016/j.cpb.2020.100136

ASTM E494-20; Standard Practice for Measuring Ultrasonic Velocity in Materials. ASTM International: West Conshohocken, PA, USA, 2020.

Bertoldo, C., Pereira, G. A., & Gonçalves, R. (2023). Effect of Reducing the Size and Number of Faces of Polyhedral Specimen on Wood Characterization by Ultrasound. *Materials*, *16*(13), 4870. https://doi.org/10.3390/ma16134870

Bucur, V. (2006). *Acoustics of Wood*. Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/3-540-30594-7

Bucur, V. (2023). A Review on Acoustics of Wood as a Tool for Quality Assessment. *Forests*, *14*(8), 1545. https://doi.org/10.3390/f14081545

Chen, X., Li, J., Niklas, K. J., Peñuelas, J., Hu, D., Zhong, Q., & Cheng, D. (2025). Universal trade-off between vessel size and number and its implications for plant hydraulic function. *Oecologia*, *207*(10), 161. https://doi.org/10.1007/s00442-025-05801-5

Dahlen, J., Auty, D., Eberhardt, T. L., Schimleck, L., & Pokhrel, N. R. (2023). Determination of ring-level dynamic modulus of elasticity in loblolly pine from measurements of ultrasonic velocity and specific gravity. *Forestry*, *96*(4), 588–604. https://doi.org/10.1093/forestry/cpac063

Dijoux, R., Brancheriau, L., Jossic, M., Wilkie-Chancellier, N., & Arciniegas, A. (2026). Ultrasonic study of the influence of moisture content on the viscoelastic behavior of tropical wood. *Wood Science and Technology*, *60*(3), 55. https://doi.org/10.1007/s00226-026-01772-9

Espinosa, L., Prieto, F., Brancheriau, L., & Lasaygues, P. (2019). Effect of wood anisotropy in ultrasonic wave propagation: A ray-tracing approach. *Ultrasonics*, *91*, 242–251. https://doi.org/10.1016/j.ultras.2018.07.015

Espinoza-Herrera, R., Olmos, L., Arreola-García, E., Carrillo-Gómez, M. I., Murillo-Sánchez, I. E., & Arteaga, D. (2025). Investigating the relationship between acoustic sound and wood anatomy by coupling computed tomography and ultrasonic wave propagation. *MRS Advances*, *10*(5), 683–687. https://doi.org/10.1557/s43580-025-01216-9

Esteban, L. G., de Palacios, P., Gasson, P., García-Iruela, A., García-Fernández, F., & García-Esteban, L. (2024). Hardwoods: Anatomy and Functionality of Their Elements—A Short Review. *Forests*, *15*(7), 1162. https://doi.org/10.3390/f15071162

Gonçalves, R., Trinca, A. J., Guilherme, D., & Cerri, P. (2011). COMPARISON OF ELASTIC CONSTANTS OF WOOD DETERMINED BY ULTRASONIC WAVE PROPAGATION AND STATIC COMPRESSION TESTING. *Wood and Fiber Science*.

Hélio de Novais Miranda, E., Pathele Ferreira, R., Pereira, R. A., Oliveira Guedes, T., Pujaico Rivera, F., & Correa Gomes, D. A. (2022). Particle image velocimetry technique and ultrasound method to obtain the modulus of elasticity of Bertholletia excelsa wood. *Maderas. Ciencia y Tecnología*, *24*. https://doi.org/10.4067/S0718-221X2022000100413

Mason, E. G., Hayes, M., & Pink, N. (2017). Validation of ultrasonic velocity estimates of wood properties in discs of radiata pine. *New Zealand Journal of Forestry Science*, *47*(1), 16. https://doi.org/10.1186/s40490-017-0098-y

Newton, P. F. (2017). Predictive Relationships between Acoustic Velocity and Wood Quality Attributes for Red Pine Logs. *Forest Science*, *63*(5), 504–517. https://doi.org/10.5849/FS-2016-049

Newton, P. F. (2018). Acoustic Velocity—Wood Fiber Attribute Relationships for Jack Pine Logs and Their Potential Utility. *Forests*, *9*(12), 749. https://doi.org/10.3390/f9120749

Pahnabi, N., Schumacher, T., & Sinha, A. (2024). Imaging of Structural Timber Based on In Situ Radar and Ultrasonic Wave Measurements: A Review of the State-of-the-Art. *Sensors*, *24*(9), 2901. https://doi.org/10.3390/s24092901

Sirswal, N. S., Nolan, G., Kotlarewski, N., & Taoum, A. (2025). Non-Destructive Evaluation of Plantation Eucalyptus nitens Logs and Recovered Samples to Analyse the Stiffness Property. *Applied Sciences*, *15*(20), 10973. https://doi.org/10.3390/app152010973

Van Duong, D., Hasegawa, M., Yamauchi, S., & Do, C. H. (2025). Within-tree variation regarding ultrasonic velocity, wood density and compressive strength of the eucalypt hybrid (*Eucalyptus urophylla* × *E. pellita*). *Wood Material Science & Engineering*, *20*(2), 420–426. https://doi.org/10.1080/17480272.2024.2352615

Vladimiro, E., Carrasco, M., Pires, A., & Júnior, A. (2003, November 20). AVALIAÇÃO NÃO DESTRUTIVA DE PROPRIEDADES MECÂNICAS DE MADEIRAS ATRAVÉS DE ULTRA-SOM-FUNDAMENTOS FÍSICOS E RESULTADOS EXPERIMENTAIS NON DESTRUCTIVE EVALUATION OF WOOD MECHANICAL PROPERTIES THROUGH ULTRASONIC SOUND WAVES-PHYSICAL FOUNDATIONS AND EXPERIMENTAL RESULTS. *CERNE*, (9), 178–191.

Wheeler, E. A., Baas, P., & Gasson, P. E. (1989). IAWA List of Microscopic Features for Hardwood Identification with an Appendix on Non-anatomical Information. *IAWA Bulletin New Series*, *10*(3), 219–332. https://doi.org/10.1163/22941932-90000496

Xu, H., Xu, G., Wang, L., & Yu, L. (2014). Propagation behavior of acoustic wave in wood. *Journal of Forestry Research*, *25*(3), 671–676. https://doi.org/10.1007/s11676-014-0506-6

Yang, B., Gamstedt, E. K., & Mousavi, M. (2025). Acoustic analysis of wood cell structures. *Wood Science and Technology*, *59*(4), 74. https://doi.org/10.1007/s00226-025-01674-2

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Influência de soluções salinas na retratibilidade da madeira de híbrido de *Eucalyptus gradis* GPC 23

Nilson Costa Neto[1]; Gabrieli Schultz de Paula[1]; Kassiani de Fatima Bueno Ruth[1]; Flávia Alves Pereira[1]; Luana Maria dos Santos[1]; Erick Martins Nieri[1]; Elisabete Vuaden[1]; Veridiana Padoin Weber[1]

[1] Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Resumo: O objetivo deste trabalho foi avaliar a influência de soluções salinas na retratibilidade da madeira do híbrido de *Eucalyptus grandis* GPC 23. As dimensões dos corpos de prova foram mensuradas nos sentidos tangencial, radial e longitudinal, sendo posteriormente submetidos à saturação em soluções aquosas de sulfato de cobre ($CuSO_4$), cloreto de sódio (NaCl) e sulfato de zinco ($ZnSO_4$), nas concentrações de 2,5% e 5% (m/v). Após a saturação, os corpos de prova foram secos em estufa nas temperaturas de 40, 60, 80 e 100 ºC. A retratibilidade da madeira foi determinada de acordo com os procedimentos estabelecidos pela ABNT NBR 7190 (2022). Os tratamentos com sulfato de zinco promoveram as maiores contrações radial e volumétrica da madeira. As maiores contrações tangenciais ocorreram nos tratamentos com sulfato de cobre, sulfato de zinco a 5% e na testemunha. O tratamento com sulfato de zinco a 2,5% apresentou o menor coeficiente de anisotropia, indicando maior uniformidade entre as retrações radial e tangencial. As soluções salinas influenciaram a retratibilidade da madeira, alterando as contrações radial, tangencial e volumétrica, bem como o coeficiente de anisotropia.

Palavras-chave: Sulfato de Cobre; Cloreto de Sódio; Sulfato de Zinco.

Influence of saline solutions on the dimensional shrinkage of *Eucalyptus grandis* hybrid GPC 23 wood

Abstract: The objective of this study was to evaluate the influence of saline solutions on the shrinkage behavior of *Eucalyptus grandis* hybrid GPC 23 wood. Specimen dimensions were measured in the tangential, radial, and longitudinal directions and subsequently subjected to saturation in aqueous solutions of copper sulfate ($CuSO_4$), sodium chloride (NaCl), and zinc sulfate ($ZnSO_4$) at concentrations of 2.5% and 5% (w/v). After saturation, the specimens were oven-dried at temperatures of 40, 60, 80, and 100 °C. Wood shrinkage was determined according to the procedures established by ABNT NBR 7190 (2022). Treatments with zinc sulfate resulted in the highest radial and volumetric shrinkage values. The highest tangential shrinkage values were observed in the copper sulfate treatments, the 5% zinc sulfate treatment, and the control. The 2.5% zinc sulfate treatment showed the lowest anisotropy coefficient, indicating greater uniformity between radial and tangential shrinkage. It was concluded that saline solutions influenced wood shrinkage, affecting radial, tangential, and volumetric shrinkage, as well as the anisotropy coefficient.

Keywords: Copper Sulfate; Sodium Chloride; Zinc Sulfate.

1. Introdução

A madeira apresenta grande versatilidade de uso, sendo empregada em aplicações estruturais e industriais em razão de sua elevada relação resistência, disponibilidade e caráter renovável. Sua natureza higroscópica ocasiona alterações dimensionais decorrentes das variações da umidade do ambiente, afetando sua estabilidade dimensional e, consequentemente, seu desempenho (He et al., 2019). Essa higroscopicidade está associada à elevada concentração de grupos hidroxila (OH) presentes nos polímeros da parede celular, especialmente na celulose e nas hemiceluloses, que atuam como sítios de sorção para moléculas de água (Xie et al., 2011; Hill et al., 2021).

A avaliação da estabilidade dimensional da madeira pode ser realizada por diferentes metodologias, geralmente baseadas na exposição do material à água líquida ou ao vapor d'água. No entanto, diferenças nos procedimentos experimentais empregados podem influenciar significativamente os resultados obtidos, dificultando a comparação entre estudos e a interpretação dos efeitos dos tratamentos aplicados (Sargent, 2019).

Diversas estratégias de modificação têm sido desenvolvidas com o objetivo de reduzir a higroscopicidade da madeira e, consequentemente, minimizar suas variações dimensionais. Em geral, esses tratamentos atuam por meio da redução dos sítios disponíveis para a sorção de água, seja pelo bloqueio dos grupos hidroxila da parede celular, seja pelo preenchimento de sua estrutura (bulking), reduzindo o espaço disponível para a adsorção e absorção de umidade (Stamm, 1974).

Os tratamentos à base de soluções salinas destacam-se entre as alternativas propostas com potencial para melhorar a estabilidade dimensional da madeira por meio de diferentes mecanismos de interação com a parede celular. A eficiência desses tratamentos está relacionada à capacidade de determinados íons se associarem aos grupos hidroxila dos polímeros lignocelulósicos, reduzindo a disponibilidade desses sítios para a ligação com moléculas de água (Rowell, 2006). Adicionalmente, alguns sais podem interagir com a lignina, contribuindo para a fotoproteção do material e reduzindo processos de degradação induzidos pela radiação ultravioleta (Rowell, 2013). A deposição desses compostos nos lumens celulares e, potencialmente, na parede celular também pode alterar o comportamento higroscópico da madeira, favorecendo uma maior estabilidade dimensional (Kumar; Jain, 1978).

Diferentes classes de sais inorgânicos têm sido investigadas visando à modificação das propriedades tecnológicas da madeira. Entre elas destacam-se os fosfatos (Wen et al., 2014), cloretos (Kumar; Jain, 1978; Paes et al., 2017), sulfatos (Souza; Vale, 2021) e boratos (Galvão et al., 2004), os quais têm sido associados à redução da higroscopicidade, ao aumento da

estabilidade dimensional, à melhoria da resistência biológica e ao incremento da resistência ao fogo.

Os tratamentos salinos quando comparados aos outros métodos de modificação, apresentam vantagens relacionadas ao baixo custo, à facilidade de aplicação e ao potencial de utilização em escala industrial, tornando-se uma alternativa para a melhoria das propriedades da madeira. Apesar dos avanços observados na literatura, ainda são necessários estudos que avaliem a influência da natureza química dos sais, de suas concentrações, das características anatômicas e químicas das diferentes espécies florestais e da resistência dos tratamentos à lixiviação, fatores que podem afetar significativamente sua eficiência e durabilidade.

O objetivo deste trabalho foi determinar a influência de soluções salinas sobre a retratibilidade da madeira do híbrido de *Eucalyptus grandis* GPC 23.

2. Material e métodos

Obtenção dos corpos de prova

A madeira utilizada foi proveniente de híbridos de *Eucalyptus grandis* GPC 23, com aproximadamente 12 anos de idade, implantados em espaçamento de 3 x 3 m no município de Quedas do Iguaçu, Paraná, Brasil. A área experimental localiza-se nas coordenadas aproximadas de 25º27' S e 52º55' O, a uma altitude média de 520 m. Segundo a classificação de Köppen-Geiger, o clima da região é do tipo Cfa (subtropical úmido), caracterizado pela ausência de estação seca e verões quentes, com temperatura média anual entre 19 e 21 ºC e precipitação anual entre 1.800 e 2.000 mm.

As tábuas foram fornecidas pela empresa Millpar (Guarapuava, PR) e processadas no Laboratório de Processamento e Produtos de Madeira da Universidade Tecnológica Federal do Paraná - Campus Dois Vizinhos (UTFPR). A partir dessas tábuas, foram confeccionados corpos de prova com dimensões nominais de 2,0 × 3,0 × 5,0 cm (sentidos tangencial, radial e longitudinal), retirados de diferentes posições ao longo das peças.

A densidade básica da madeira foi determinada de acordo com os procedimentos estabelecidos pela ABNT NBR 7190 (2022). Posteriormente, os corpos de prova foram secos até massa constante e preparados para os tratamentos de saturação em soluções salinas.

Tratamentos com soluções salinas e secagem

As dimensões dos corpos de prova foram mensuradas nos sentidos tangencial, radial e longitudinal, após a climatização, utilizando paquímetro com precisão de 0,01 mm. Em seguida, as amostras foram submetidas à saturação em soluções salinas de sulfato de cobre ($CuSO_4$), cloreto de sódio (NaCl) e sulfato de zinco ($ZnSO_4$), nas concentrações de 2,5% e 5% (m/v), conforme tabela abaixo (Tabela 1).

Tabela 1 - Descrição dos tratamentos aplicados às madeiras de híbrido de *Eucalyptus gradis* GPC 23

Tratamentos	Soluções salinas
T1	Testemunha (sem tratamento)
T2	Sulfato de cobre (5%)
T3	Sulfato de cobre (2,5%)
T4	Cloreto de sódio (5%)
T5	Cloreto de sódio (2,5%)
T6	Sulfato de zinco (5%)
T7	Sulfato de zinco (2,5%)

A impregnação foi realizada em dessecadores sob vácuo durante 10 minutos. Após 48 horas de imersão, o procedimento de aplicação de vácuo foi repetido. Novas medições dimensionais foram realizadas a cada 2, 4, 6, 8 e 10 dias, mantendo-se o vácuo após essa etapa.

Os corpos de prova foram submetidos à secagem em estufa com circulação forçada de ar, nas temperaturas de 40, 60, 80 e 100 ºC, de acordo com metodologia proposta por Paes et al. (2015). As dimensões dos espécimes foram determinadas em intervalos de 48 horas durante todo o processo de secagem.

A retratibilidade da madeira e o teor de umidade foram determinados conforme os procedimentos descritos na ABNT NBR 7190 (2022). As medições foram realizadas sempre nos mesmos pontos de referência, permitindo o acompanhamento da evolução da variação dimensional ao longo da secagem.

Análise estatística

O experimento foi conduzido em delineamento inteiramente casualizado, com 10 repetições por tratamento. A normalidade dos resíduos foi verificada pelo teste de Shapiro-

Wilk. Os dados foram submetidos à análise de variância (ANOVA) e, quando constatado efeito significativo dos tratamentos, as médias foram agrupadas pelo teste de Scott-Knott a 5% de probabilidade.

3. Resultados e discussão

A estabilidade dimensional é considerada uma importante propriedade tecnológica da madeira, sendo influenciada pela organização celular, que afeta o comportamento de retração durante o processo de secagem (Bossu et al., 2016). Os valores médios de retração radial ($F = 18,38$; $p < 0,0001$), tangencial ($F = 5,58$; $p < 0,0001$), volumétrica ($F = 11,75$; $p < 0,0001$) e do coeficiente de anisotropia da madeira do híbrido de *Eucalyptus grandis* GPC 23 ($F = 7,06$; $p < 0,0001$) diferiram entre os tratamentos salinos (Tabela 2).

Tabela 2 - Retração radial, tangencial, volumétrica e coeficiente de anisotropia da madeira de híbrido de *Eucalyptus grandis* GPC 23 submetida a tratamentos salinos

Tratamento	Retração (%)			Anisotropia
	radial	tangencial	volumétrica	
T1	2,71 a	3,99 a	6,73 a	1,55 b
T2	2,81 a	4,52 b	7,32 a	1,62 b
T3	2,82 a	4,38 b	7,05 a	1,61 b
T4	2,81 a	4,02 a	6,77 a	1,72 b
T5	2,57 a	3,61 a	6,48 a	1,52 b
T6	3,90 b	4,59 b	8,41 b	1,38 b
T7	3,92 b	4,08 a	8,13 b	1,05 a
CV (%)	25,69	20,79	17,32	31,97

Médias seguidas pela mesa letra na coluna não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott a 5% de probabilidade. Os tratamentos avaliados foram: T1 (testemunha), T2 (sulfato de cobre II a 5%), T3 (sulfato de cobre II a 2,5%), T4 (cloreto de sódio a 5%), T5 (cloreto de sódio a 2,5%), T6 (sulfato de zinco a 5%) e T7 (sulfato de zinco a 2,5%)

Os maiores valores de retração radial foram observados nos tratamentos T6 e T7, enquanto as maiores retrações tangenciais foram registradas nos tratamentos T2, T3 e T6. A retração volumétrica apresentou comportamento semelhante, com as maiores médias também verificadas nos tratamentos T6 e T7. Esses resultados indicam que, de modo geral, a impregnação com sulfato de zinco não contribuiu para a redução das variações dimensionais da madeira durante a secagem.

Embora alguns tratamentos tenham apresentado menores valores para retrações específicas, T1 (testemunha), T4 e T5 foram os únicos a apresentar baixas retrações radial,

tangencial e volumétrica de forma simultânea. Resultados semelhantes foram relatados por Paes et al. (2015), que observaram menor contração tangencial em madeira de *Eucalyptus cloeziana* tratada com cloreto de sódio. Além disso, os autores verificaram que as contrações tangencial e volumétrica da madeira de *Corymbia torelliana* submetida ao mesmo tratamento foram semelhantes às da testemunha.

A redução das retrações nos tratamentos com cloreto de sódio pode estar relacionada à deposição de sais na estrutura porosa da madeira, limitando parcialmente as variações dimensionais associadas à perda de água. Além disso, a presença do sal pode ter alterado a dinâmica de movimentação da água, influenciando as tensões desenvolvidas durante a secagem. Entretanto, os tratamentos com cloreto de sódio não diferiram estatisticamente da testemunha, indicando que sua aplicação não promoveu ganhos significativos em termos de estabilidade dimensional e, portanto, sua utilização pode não ser justificável, considerando os custos adicionais envolvidos.

O menor índice de anisotropia foi observado no tratamento T7, indicando que as retrações nos sentidos radial e tangencial ocorreram de forma mais uniforme. Ressalta-se que esse tratamento apresentou os maiores valores de retração radial e volumétrica. Esse resultado evidencia que a menor anisotropia não resultou em maior estabilidade dimensional da madeira, mas apenas em retrações mais homogêneas entre os planos anatômicos.

Sargent (2019) afirma que a estabilidade dimensional da madeira pode ser avaliada por diferentes parâmetros como retração, inchamento, teor de umidade de equilíbrio, eficiência anti-inchamento e coeficiente de anisotropia. Dessa forma, a interpretação dessa propriedade não deve ser baseada em um único parâmetro, mas na análise conjunta dos diferentes indicadores de desempenho dimensional.

Não houve diferença significativa entre os teores de umidade dos tratamentos na condição saturada.

A análise de variância, após 48 h de secagem, indicou efeito significativo sobre o teor de umidade da madeira ($F = 5,89$; $p = 0,000105$). Os tratamentos T1, T2, T3 e T5 apresentaram os maiores resultados, variando de 54,91% a 58,22%, enquanto T4, T6 e T7 apresentaram os menores valores, entre 29,99% e 43,75% (Gráfico 1).

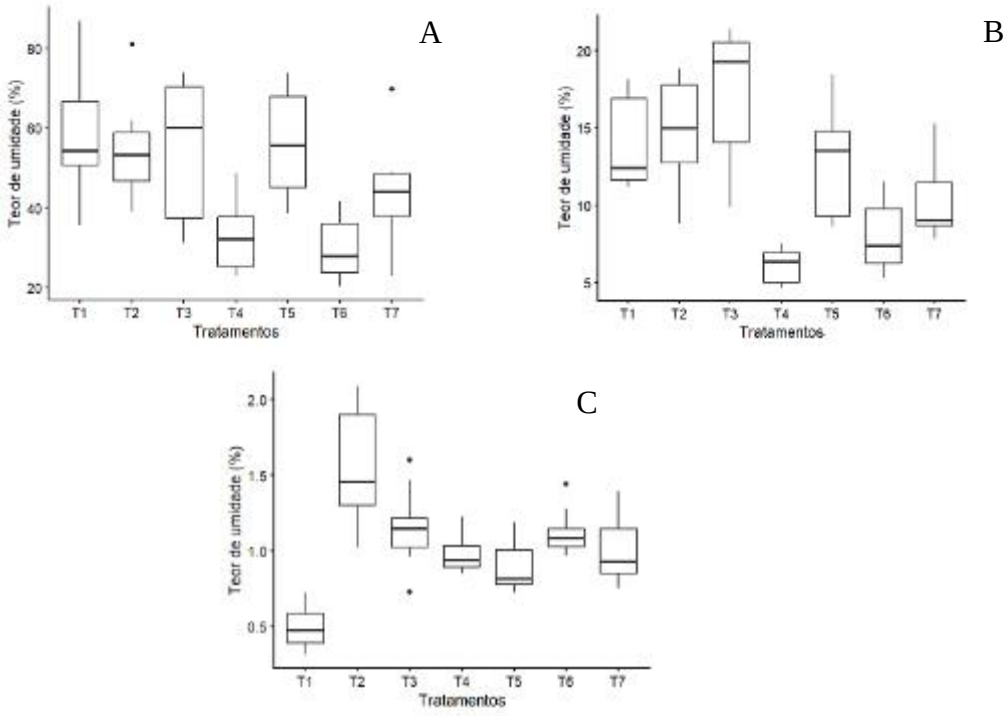


Gráfico 1 - Teor de umidade (%) de madeiras de *Eucalyptus gradis* GPC 23 após secagem em estufa por: A - 48 horas a 40 ºC; B - 48 horas a 40 ºC e 48 horas a 60 ºC; C - 48 horas a 40 ºC, 48 horas a 60 ºC e 48 horas a 80 ºC.

Os maiores teores de umidade foram observados nos tratamentos T1, T2, T3 e T5, após 96 horas de secagem, enquanto T4, T6 e T7 apresentaram os menores valores. Ao final do período de secagem (144 h), o tratamento T2 apresentou o maior teor de umidade, enquanto o T1 registrou o menor valor.

A água presente na madeira pode ser removida mais facilmente quando há maior permeabilidade, quando há menor desobstrução para a difusão, menor ligação química da água aos constituintes da madeira ou menos substâncias higroscópicas dificultando a retirada dessas moléculas. Quando há introdução de sais, estes podem aumentar a higroscopicidade da madeira através de ligações com moléculas de água, ocupar espaços na parede celular ou interferir no movimento nos capilares.

A remoção de água da madeira está relacionada à sua permeabilidade e aos mecanismos de transporte de umidade através da estrutura anatômica. A movimentação da água ocorre predominantemente através das cavidades celulares, na direção longitudinal, favorecendo a secagem. A água adsorvida nas paredes celulares encontra-se associada aos constituintes químicos por atrações intermoleculares, formando uma ligação madeira-água que armazena energia adicional. A madeira é um material higroscópico e sua capacidade de absorver e liberar

a umidade depende da interação entre a água e os constituintes da parede celular (Glass e Zelinka, 2010; Thybring et al., 2022).

A utilização de sais pode modificar o comportamento higroscópico da madeira, influenciando sua capacidade de retenção de água. Os tratamentos com sulfato de cobre a 2,5 e 5% (T2 e T3), de modo geral, apresentaram os maiores teores de umidade quando comparados aos demais tratamentos, indicando maior retenção de água durante o processo de secagem. Esse comportamento pode estar relacionado à presença dos sais de cobre na estrutura da madeira, pois podem alterar suas propriedades higroscópicas e favorecer a retenção de umidade.

Kumar e Jain (1978) observaram aumento da higroscopicidade em madeiras tratadas com preservantes salinos à base de cobre, atribuindo esse comportamento à retenção adicional de água pelos sais depositados nos lúmens celulares. A presença desses compostos pode influenciar os mecanismos de transporte e distribuição da umidade na madeira, alterando a dinâmica de secagem do material.

Os tratamentos com sulfato de zinco e cloreto de sódio a 5% promoveram maior redução do teor de umidade. Esses resultados indicam que os tratamentos podem ter modificado as interações entre a água e a estrutura da madeira, influenciando a taxa de secagem e a umidade residual do material. He et al. (2019) observaram redução da higroscopicidade e aumento da estabilidade dimensional da madeira de *Cunninghamia lanceolata* após tratamento com composto à base de zinco, sugerindo que íons metálicos podem modificar as interações entre a água e os constituintes da parede celular.

A testemunha apresentou comportamento distinto, com elevado teor de umidade após 48 h e 96 h de secagem, mas atingindo o menor teor de umidade residual ao final do processo. Esse resultado sugere que a presença dos sais influenciou a dinâmica de remoção da umidade durante a secagem, retardando a redução do teor de umidade em alguns tratamentos.

Observou-se que os tratamentos com sulfato de zinco promoveram redução do teor de umidade durante a secagem. No entanto, também apresentaram os maiores valores de retração radial e volumétrica, além de elevadas retrações tangenciais. Esses resultados indicam que o menor teor de umidade não resultou em maior estabilidade dimensional da madeira. Possivelmente, os mecanismos envolvidos na remoção da água e no controle das deformações da parede celular atuam de forma independente, de modo que a redução da umidade não implica, necessariamente, menor retração.

4. Conclusões

Os tratamentos com sulfato de zinco reduziram o teor de umidade da madeira durante a secagem, mas promoveram maiores retrações radial e volumétrica. Os tratamentos com cloreto de sódio não proporcionaram ganhos significativos em estabilidade dimensional em relação à testemunha. Os resultados indicam que a redução do teor de umidade não está necessariamente associada à maior estabilidade dimensional da madeira.

5. Agradecimentos

Os autores agradecem à Fundação Araucária, à Superintendência de Ciência, Tecnologia e Ensino Superior (SETI), ao Projeto NAPI Wood Tech e à Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) pelo apoio financeiro e institucional concedido para a realização deste trabalho.

6. Referências bibliográficas

Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2022). *NBR 7190-1:2022: Projeto de estruturas de madeira — Parte 1: Critérios de dimensionamento*. ABNT.

Bossu, J., Beauchêne, J., Estevez, Y., Duplais, C., & Clair, B. (2016). New insights on wood dimensional stability influenced by secondary metabolites: The case of a fast-growing tropical species *Bagassa guianensis* Aubl. *PLoS ONE, 11*(3), e0150777. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0150777

Galvão, A. P. M., Magalhães, W. L. E., & Mattos, P. P. (2004). *Processos práticos para preservar a madeira* (Documentos 103). Embrapa Florestas.

Glass, S. V., & Zelinka, S. L. (2010). Moisture relations and physical properties of wood. In *Wood handbook: Wood as an engineering material* (Chap. 4, pp. 4.1–4.19). USDA Forest Service, Forest Products Laboratory.

He, Z., Qu, L., Wang, Z., Qian, J., & Yi, S. (2019). Effects of zinc chloride and silicone oil treatment on dimensional stability, chemical components, thermal decomposition and mechanism of wood. *Scientific Reports, 9*, 1601. https://doi.org/10.1038/s41598-018-38317-5

Hill, C. A. S., Altgen, M., & Rautkari, L. (2021). Thermal modification of wood—a review: Chemical changes and hygroscopicity. *Journal of Materials Science, 56*, 6581–6614. https://doi.org/10.1007/s10853-020-05722-z

Kumar, S., & Jain, V. K. (1978). Effects of wood preservatives on physical properties of wood. II. Effects of different salt loadings of copper-chrome-arsenic composition. *Wood and Fiber Science, 9*(4), 262–269.

Paes, J. B., Loiola, P. L., Braz, R. L., Klitzke, R. J., & Tiburtino, R. F. (2017). Corrosividade causada por soluções salinas empregadas na estabilização dimensional da madeira. *Floresta e Ambiente*, *24*, e00119914. https://doi.org/10.1590/2179-8087.119914

Paes, J. B., Melo, R. R., Lima, C. R., Oliveira, E., & Silva, L. F. (2015). Efeito de sais na estabilidade dimensional da madeira de sumaúma (*Ceiba pentandra*). *Scientia Forestalis*, *43*(106), 349–358.

Rowell, R. M. (2006). Chemical modification of wood: A short review. *Wood Material Science and Engineering*, *1*(1), 29–33.

Rowell, R. M. (Ed.). (2013). *Handbook of wood chemistry and wood composites* (2nd ed.). CRC Press.

Sargent, R. (2019). Evaluating dimensional stability in solid wood: A review of current practice. *Journal of Wood Science*, *65*(1), 36. https://doi.org/10.1186/s10086-019-1817-1

Souza, J. T., Menezes, W. M., Balena, F. L. C., Beltrame, R., & Filipini, F. R. (2014). Tratamento preservante da madeira de *Eucalyptus benthamii* pelo método de substituição de seiva. *Ciência da Madeira (Brazilian Journal of Wood Science)*, *5*(1), 14–24. https://doi.org/10.12953/2177-6830.v05n01a02

Stamm, A. J. (1974). Dimensional stabilization of wood with water soluble fire retardant bulking chemicals compared with polyethylene glycol-1000. *Wood Science and Technology*, *8*, 300–306.

Thybring, E. E., Fredriksson, M., Zelinka, S. L., & Glass, S. V. (2022). Water in wood: A review of current understanding and knowledge gaps. *Forests*, *13*(12), 2051. https://doi.org/10.3390/f13122051

Wen, M. Y., Kang, C. W., & Park, H. J. (2014). Impregnation and mechanical properties of three softwoods treated with a new fire retardant chemical. *Journal of Wood Science*, *60*(5), 367–375. https://doi.org/10.1007/s10086-014-1408-0

Xie, Y., Hill, C. A. S., Xiao, Z., Mai, C., & Militz, H. (2011). Dynamic water vapour sorption properties of wood treated with glutaraldehyde. *Wood Science and Technology*, *45*(1), 49–61. https://doi.org/10.1007/s00226-010-0311-0

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Influência do clone e da posição radial em propriedades da madeira de cerne de *Tectona grandis*

Isabelly Karolina Terra de Oliveira[1]; Mariana Ribeiro Sonsin[1]; Waldelaine Rodrigues Hoffmann[2]; Aylson Costa Bárbara Luísa Corradi Pereira[1]

[1] Engenharia Florestal, Faculdade de Engenharia Florestal – Universidade Federal de Mato Grosso.
[2] Programa de Pós-Graduação em Recursos Florestais – Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" da Universidade de São Paulo.

Resumo: A expansão dos plantios clonais de *Tectona grandis* demanda compreensão da influência do material genético sobre a qualidade da madeira. Assim, este estudo teve como objetivo avaliar a influência do clone e da posição radial do cerne em propriedades da madeira de teca proveniente de teste clonal em Cáceres, Mato Grosso. Foram avaliados oito clones, considerando duas posições radiais do cerne (interna e externa). Determinaram-se os parâmetros colorimétricos do sistema CIELAB, a densidade aparente e as resistências à compressão paralela às fibras e ao cisalhamento. O clone BT82 apresentou a madeira mais clara e mais amarelada, enquanto o clone BT84 apresentou a maior densidade aparente (0,646 g cm^{-3}) e resistência à compressão paralela às fibras (58,85 MPa). Além disso, o cerne externo apresentou maior densidade (0,591 g cm^{-3}) e resistência à compressão, enquanto o cerne interno é mais claro, saturado e amarelado. Os resultados evidenciam que a seleção clonal e a variação radial devem ser consideradas na produção e utilização de madeira de teca com propriedades tecnológicas específicas.

Palavras-chave: Teca; Material genético; Densidade da madeira; Propriedades mecânicas; Colorimetria.

Influence of clone and radial position on the properties of *Tectona grandis* heartwood

Abstract: The expansion of clonal *Tectona grandis* plantations has increased the need for a better understanding of the influence of genetic material on wood quality. Therefore, this study aimed to evaluate the effects of clone and heartwood radial position on the colorimetric, physical, and mechanical properties of teak wood from a clonal trial established in Cáceres, Mato Grosso, Brazil. Eight clones were evaluated considering two heartwood radial positions (inner and outer). CIELAB color parameters, apparent density, compression strength parallel to the fiber, and shear strength were determined. Clone BT82 produced lighter and more yellowish wood, whereas clone BT84 exhibited the highest apparent density (0.646 g cm^{-3}) and compression strength parallel to the fiber (58.85 MPa). In addition, outer heartwood showed higher apparent density (0.591 g cm^{-3}) and compression strength, whereas inner heartwood exhibited greater lightness, higher color saturation, and a stronger yellow hue. These findings demonstrate that both clonal selection and radial variation should be considered in the production and utilization of teak wood with specific technological properties.

Keywords: Teak; Genetic material; Wood density; Mechanical properties; Colorimetry.

1. Introdução

A teca (*Tectona grandis* L.f.) é uma espécie de elevado valor comercial, cuja madeira é amplamente utilizada devido à combinação de propriedades físicas, mecânicas e estéticas. No Brasil, os plantios de teca ocupam aproximadamente 76 mil hectares, dos quais cerca de 65 mil estão localizados no estado de Mato Grosso (IBÁ, 2023; IMEA, 2019). Os plantios clonais tem se expandido desde os anos 2000 devido ao potencial de obtenção de maior crescimento, produtividade e proporção de cerne (Souza et al., 2024). Entretanto, a seleção de clones não deve considerar apenas o crescimento das árvores, sendo fundamental compreender a influência do material genético sobre a qualidade tecnológica da madeira.

Entre as propriedades relevantes para a caracterização da madeira de teca, a densidade e a resistência mecânica estão diretamente relacionadas ao seu desempenho e à adequação para diferentes aplicações. Já a colorimetria possui importância comercial, uma vez que a coloração da madeira está associada à sua aceitação e valorização no mercado. Essas propriedades podem variar entre materiais genéticos e ao longo do raio, em função das diferenças na formação e maturação do lenho e da distribuição de substâncias extrativas no cerne (Mori et al., 2005).

Embora estudos tenham demonstrado diferenças nas características de crescimento e na qualidade da madeira entre materiais genéticos de teca, ainda é necessário compreender como o clone e a posição radial interagem na determinação de propriedades físicas, colorimétricas e mecânicas da madeira de cerne. Essa informação é relevante para a seleção de materiais genéticos e para a avaliação da qualidade da madeira produzida em plantios clonais. Assim, este estudo teve como objetivo avaliar a influência do material genético e da posição radial nas propriedades colorimétricas, na densidade e na resistência mecânica da madeira de cerne de *Tectona grandis* proveniente de teste clonal em Cáceres, Mato Grosso, Brasil.

2. Material e Métodos

2.1 Material de estudo

O material foi proveniente de teste clonal de *Tectona grandis* L. f. localizado no município de Cáceres, Mato Grosso, Brasil. A região apresenta duas estações bem definidas: uma seca, de maio a setembro, e outra chuvosa, de outubro a abril. A precipitação média anual é de 1.335 mm, distribuída em aproximadamente 115 dias, e a temperatura média anual é de 25,18 °C, com temperaturas médias máximas e mínimas de 33,2 °C e 20,3 °C, respectivamente. O relevo é predominantemente plano e bem drenado, com ocorrência de Latossolo Amarelo distrófico e Latossolo Vermelho-Amarelo Álico.

Foram selecionadas 24 árvores com 22 anos de idade, correspondendo a três indivíduos por clone avaliado (Tabela 1). As árvores selecionadas apresentaram diâmetro a altura do peito entre 27,39 e 34,31 cm, altura total entre 22,80 e 28,53 m e altura comercial aproximando de 9,60 e 10,87 metros.

2.2 Amostragem e preparo das amostras

De cada árvore, foi retirada uma tora de 1,3 m de comprimento entre a base da árvore e o DAP. De cada tora, foi obtida uma prancha diametral no sentido norte–sul, atravessando a medula. De cada prancha, foram confeccionados quatro caibros de aproximadamente 5 × 5 × 130 cm, sendo um do cerne interno e um do cerne externo em cada lado da tora (norte e sul). O cerne foi dividido proporcionalmente em duas regiões radiais, o cerne interno e externo. A orientação norte–sul foi utilizada apenas para a amostragem, não sendo considerada fator experimental. Por propriedade avaliada, foram confeccionados quatro corpos de prova isentos de defeitos por caibro, cujos resultados foram posteriormente utilizados para o cálculo da média. Esses foram confeccionados conforme as recomendações da ABNT NBR 7190 (2022). As amostras foram acondicionadas em sala climatizada a 20±2 °C e 65±5% de umidade relativa, até atingirem equilíbrio higroscópico (Umidade ~12%).

2.3 Análises colorimétrica, densidade aparente e ensaios mecânicos

A análise colorimétrica foi realizada no plano radial dos corpos de prova confeccionados para o ensaio de compressão paralela às fibras, e foram lixadas com lixa de 80 grãos. Utilizou-se o espectrofotômetro portátil CR-410, Konica Minolta, com abertura do sensor de 5 mm, a fonte de luz (iluminante) D65 composta por lâmpada de xenônio, observador padrão suplementar de 10° e área de iluminação igual a 53 mm de diâmetro. Uma leitura, por corpo de prova, foi obtida na parte central da amostra.

As avaliações foram realizadas no sistema de cor CIELAB, considerando as coordenadas L*(luminosidade), a*(coordenada cromática verde–vermelho) e b* (coordenada azul–amarelo). A saturação (C) e o ângulo tonal (h°) foram calculados a partir das coordenadas cromáticas a* e b*.

A densidade aparente foi determinada nos corpos de prova destinados ao ensaio de compressão paralela às fibras, em condição de equilíbrio higroscópico (U ≈ 12%), pela relação entre a massa e o volume (obtido multiplicando o comprimento e as dimensões da seção lateral da peça de madeira submetido ao ensaio de compressão). Os ensaios de

resistência ao cisalhamento e à compressão paralela às fibras foram realizados em Máquina Universal de Ensaios Amsler Wolpert (200 kN), conforme a ABNT NBR 7190 (2022).

2.5 Análise estatística

O experimento foi conduzido em delineamento inteiramente casualizado, disposto em esquema fatorial 2 × 8, correspondente a duas posições radiais (cerne interno e cerne externo) e oito clones, com três árvores por clone (unidades experimentais).

Os dados foram submetidos à análise de variância (ANOVA), considerando os efeitos de clone, posição radial e da interação entre esses fatores. Quando observadas diferenças significativas, as médias foram comparadas pelo teste de Scott-Knott, ao nível de 5% de probabilidade. Para avaliar a similaridade entre os clones com base no conjunto de propriedades avaliadas, foi realizada análise de agrupamento hierárquico (Cluster Analysis). As variáveis foram previamente padronizadas pelo método Z-score, sendo utilizada a distância euclidiana como medida de dissimilaridade e o método de Ward como critério de aglomeração para a formação dos grupos. Todas as análises estatísticas foram realizadas no software RStudio, versão 4.5.2.

3. Resultados e discussão

3.1 Análise colorimétrica

A ANOVA indicou efeito altamente significativo do clone e da posição radial do cerne sobre a luminosidade (L*), a coordenada cromática azul-amarelo (b*), a saturação (C*) e o ângulo tonal (h°) ($p < 0,001$), enquanto para a coordenada cromática verde-vermelho (a*) houve efeito significativo do clone ($p = 0,0068$) e altamente significativo da posição radial ($p < 0,001$). A interação clone × posição radial não foi significativa para L*, b* e C* ($p > 0,05$), mas foi significativa para a* ($p = 0,0008$) e h° ($p = 0,0012$).

Os parâmetros colorimétricos L*, b* e C* variaram significativamente entre os clones e entre as posições radiais do cerne (Tabela 1). O clone BT82 apresentou a madeira mais clara, mais amarelada e com maior saturação de cor, enquanto BT84 apresentou os menores valores desses parâmetros; adicionalmente, a região interna do cerne foi mais clara, mais amarelada e mais saturada que a região externa.

Tabela 1. Valores médios dos parâmetros colorimétricos do sistema CIELAB: luminosidade (L), coordenada cromática azul-amarelo (b) e saturação (C*) do cerne de *Tectona grandis*, em função do clone e da posição radial

Clone	L		b*		C*	
BT84	56,06 (0,58) c		16,59 (0,29) c		17,42 (0,30) c	
BT61	58,62 (2,21) c		18,84 (0,99) a		19,56 (0,90) a	
BT68	57,88 (2,48) c		18,40 (0,97) b		19,14 (0,84) b	
BT63	57,90 (2,28) c		18,23 (0,87) b		19,00 (0,82) b	
BT82	63,40 (4,09) a		19,46 (1,06) a		20,08 (0,89) a	
BT73	60,00 (1,94) b		18,19 (0,65) b		19,21 (0,59) b	
BT83	60,04 (3,08) b		18,48 (1,10) b		19,21 (1,01) b	
BT66	61,67 (1,14) a		19,19 (0,26) a		19,86 (0,20) a	
Posição radial (Cerne)	**Externo**	**Interno**	**Externo**	**Interno**	**Externo**	**Interno**
	58,00 (2,20) B	60,90 (3,34) A	17,87 (0,91) B	18,97 (1,07) A	18,66 (0,86) B	19,62 (0,98) A

Legenda: Valores entre parênteses correspondem ao desvio-padrão. Para cada parâmetro, médias seguidas pela mesma letra minúscula na coluna não diferem entre clones pelo teste de Scott-Knott ($p \geq 0,05$) e médias seguidas pela mesma letra maiúscula não diferem entre as posições radiais pelo teste F da ANOVA ($p \geq 0,05$).

Para a coordenada cromática a*, não foram observadas diferenças entre os clones na região externa do cerne (Tabela 2).

Tabela 2. Valores médios dos parâmetros colorimétricos do sistema CIELAB: coordenada cromática verde-vermelho (a*) e ângulo tonal (h^o) do cerne de *Tectona grandis*, em função do clone e da posição radial

Clone	a*		h^o	
	Cerne Externo	**Cerne Interno**	**Cerne Externo**	**Cerne Interno**
BT84	5,24 (0,11) a A	5,34 (0,42) a A	72,28 (0,11) a A	72,35 (0,42) c A
BT61	5,45 (0,29) a A	5,07 (0,19) a B	73,22 (0,29) a B	74,45 (0,19) b A
BT68	5,48 (0,28) a A	5,02 (0,15) a B	72,69 (0,28) a B	75,31 (0,15) b A
BT63	5,45 (0,40) a A	5,23 (0,23) a A	72,64 (0,40) a B	74,45 (0,23) b A
BT82	5,46 (0,33) a A	4,20 (0,71) b B	73,66 (0,33) a B	78,28 (0,71) a A
BT73	5,29 (0,28) a A	4,72 (0,08) a B	73,49 (0,28) a B	75,69 (0,08) b A
BT83	5,44 (0,23) a A	4,93 (0,72) a B	72,71 (0,23) a B	75,74 (0,72) b A
BT66	5,14 (0,29) a A	5,04 (0,35) a A	74,96 (0,29) a A	75,28 (0,35) b A

Legenda: Valores entre parênteses correspondem ao desvio-padrão. Valores médios seguidos pela mesma letra minúscula nas colunas e maiúscula nas linhas não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott ($p \geq 0,05$) e F ($p \geq 0,05$), respectivamente.

Entretanto, na região interna, os clones BT61, BT68, BT82, BT73 e BT83 apresentaram menores valores de a*, indicando menor intensidade do componente vermelho nessa região. Para o ângulo tonal (h°), observou-se tendência oposta, com maiores valores no cerne interno para a maioria dos clones, evidenciando uma coloração mais amarelada. Essa variação radial foi mais pronunciada no clone BT82, que apresentou o maior valor de h° no cerne interno (78,28°).

Os valores de luminosidade (L*) observados neste estudo situaram-se dentro da faixa relatada para a madeira de teca na literatura (48–59), conforme descrito por Moya e Berrocal, Arce e Moya (2015) e Kokutse et al. (2006). Entretanto, alguns clones, como BT82 e BT66, apresentaram valores mais elevados, indicando madeira de cerne mais clara. Além disso, a maior luminosidade observada no cerne interno indica menor escurecimento dessa região, possivelmente associado a diferenças na deposição de extrativos ao longo da formação do cerne.

Os valores de a* foram mais baixos aos relatados para materiais seminais de teca (Moya e Berrocal, 2010; Arce e Moya, 2015; Kokutse et al., 2006), indicando menor intensidade do componente vermelho na madeira dos clones avaliados. Essa diferença pode estar relacionada ao material genético ou às diferenças entre sítios de plantio. Além disso, observou-se redução de a* do cerne externo para o interno na maioria dos clones, indicando diminuição da intensidade avermelhada nessa direção. A cor está associada a composição química, principalmente a extrativos fenólicos, como as quinonas, que são responsáveis pelo escurecimento da madeira e pela resistência da região contra a ação de xilófagos (Campos et al., 2025).

Os valores de b* também foram inferiores aos relatados por Moya e Berrocal (2010), Arce e Moya (2015) e Kokutse et al. (2006), embora a tendência radial tenha sido semelhante, com maiores valores no cerne interno. O aumento de b* indica maior participação do componente amarelo da cor, podendo estar relacionado às influências das diferentes propriedades do solo, que influencia no teor de extrativo e na composição química da lignina durante o processo de cernificação (Moya et al., 2010).

A saturação (C*) acompanhou o comportamento observado para b*, apresentando maiores valores no cerne interno. Como C* representa a intensidade da cor, esse resultado indica que a coloração do cerne interno é mais intensa, principalmente em função do aumento da componente amarela. Já os maiores valores do ângulo tonal (h°) no cerne interno indica deslocamento da coloração em direção ao amarelo, corroborando o comportamento observado

para b*. Esse resultado sugere mudanças graduais na tonalidade da madeira durante a formação do cerne, provavelmente associadas às transformações químicas dos extrativos depositados ao longo do crescimento da árvore.

As diferenças observadas entre os clones evidenciam que o material genético exerce influência significativa sobre a coloração da madeira de teca, isso ocorre, pois, a clonagem copia todas as características de um indivíduo, não apenas as características ótimas, no entanto, podem sofrer por influência por fatores ambientais, genéticos ou pelo manejo da plantação. Essa característica possui importância tecnológica, uma vez que a uniformidade e a tonalidade da madeira são atributos valorizados pela indústria moveleira e pelo mercado de produtos sólidos de maior valor agregado.

3.2 Densidade aparente da madeira e ensaios mecânicos

A ANOVA indicou efeito significativo do clone e da posição radial do cerne sobre a densidade aparente da madeira e a resistência à compressão paralela às fibras ($p < 0,001$). Para a resistência ao cisalhamento, não foram observados efeitos significativos do clone ($p = 0,052$) nem da posição radial ($p = 0,314$). A interação clone × posição radial não foi significativa para a densidade aparente da madeira ($p = 0,152$) e para a resistência ao cisalhamento ($p = 0,476$), mas foi significativa para a resistência à compressão paralela às fibras ($p = 0,0026$).

A densidade aparente da madeira variou entre os clones, com valores médios de 0,529 a 0,646 g cm^{-3} (Tabela 3).

Tabela 3. Valores médios da densidade aparente da madeira e da resistência ao cisalhamento do cerne de *Tectona grandis*, em função do clone e da posição radial

Clone	**Densidade aparente (g cm^{-3})**		**Resistência Cisalhamento (MPa)**	
BT84	0,646 ± 0,034 a		10,21 (1,77) a	
BT61	0,569 ± 0,027 b		7,95 (1,73) a	
BT68	0,575 ± 0,030 b		9,11 (1,11) a	
BT63	0,578 ± 0,034 b		8,51 (0,87) a	
BT82	0,563 ± 0,040 b		8,68 (1,15) a	
BT73	0,529 ± 0,021 c		8,19 (0,71) a	
BT83	0,559 ± 0,026 b		8,98 (2,13) a	
BT66	0,538 ± 0,013 c		8,98 (1,9) a	
Posição radial	**Externo**	**Interno**	**Externo**	**Interno**

(Cerne)	0,591 (0,05) A	0,549 (0,03) B	8,66 (1,82) A	8,99 (1,31) A

Legenda: Valores entre parênteses correspondem ao desvio-padrão. Para cada parâmetro, médias seguidas pela mesma letra minúscula na coluna não diferem entre clones pelo teste de Scott-Knott ($p \geq 0,05$) e médias seguidas pela mesma letra maiúscula não diferem entre as posições radiais pelo teste F da ANOVA ($p \geq 0,05$).

O clone BT84 apresentou a maior densidade aparente (0,646 g cm^{-3}), diferindo significativamente dos demais materiais genéticos, enquanto BT73 e BT66 apresentaram os menores valores (0,529 e 0,538 g cm^{-3}, respectivamente). Os clones BT61, BT63, BT68, BT82 e BT83 formaram o grupo intermediário, sem diferenças significativas entre si. Em relação à posição radial, a região externa do cerne apresentou maior densidade aparente (0,591 g cm^{-3}) em comparação à região interna (0,549 g cm^{-3}).

De modo geral, os valores obtidos foram semelhantes aos relatados para plantios de teca no Brasil (Silva, 2024; Silva-Albuês et al., 2024), embora inferiores aos observados por Arce e Moya (2015) em clones cultivados na Costa Rica.

Para a resistência ao cisalhamento, não foram observadas diferenças significativas entre os clones ou entre as posições radiais (Tabela 4). O valor médio geral foi de 8,83 ± 1,59 MPa. Os valores obtidos foram consistentes com aqueles reportados para a espécie na literatura (Silva et al., 2024; Albuês et al., 2024; Lima et al., 2021).

A resistência à compressão paralela às fibras variou em função da interação entre clone e posição radial do cerne (Tabela 4). Na região externa, o clone BT84 apresentou maior resistência (58,85 MPa), diferindo significativamente dos demais materiais genéticos, enquanto os clones BT73, BT83 e BT66 apresentaram os menores valores. Na região interna, BT84 manteve a maior resistência (52,30 MPa), enquanto os clones BT82, BT73, BT83 e BT66 constituíram o grupo de menor resistência. Houve redução significativa da resistência do cerne externo para o interno em todos os clones, exceto BT66, que não apresentou diferença significativa entre as posições. De forma geral, os valores de resistência à compressão paralela às fibras observados neste estudo situam-se dentro da faixa reportada para a madeira de teca em diferentes materiais genéticos e condições de cultivo (Silva et al., 2024; Albuês et al., 2024; Lima et al., 2021).

Tabela 4. Valores médios da resistência à compressão paralela às fibras do cerne de *Tectona grandis*, em função do clone e da posição radial

Clone	Cerne Externo	Cerne Interno
BT84	58,85 (1,63) aA	52,30 (2,35) aB

BT61	55,31 (1,92) bA	48,62 (1,57) bB
BT68	54,03 (2,27) bA	50,40 (1,94) bB
BT63	53,93 (2,73) bA	50,32 (1,20) bB
BT82	52,21 (1,03) bA	42,88 (3,22) cB
BT73	49,19 (2,89) cA	42,48 (0,80) cB
BT83	48,63 (2,75) cA	44,60 (2,36) cB
BT66	45,98 (2,76) cA	44,24 (1,58) cA

Legenda: Valores entre parênteses correspondem ao desvio-padrão. Valores médios seguidos pela mesma letra minúscula nas colunas e maiúscula nas linhas não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott ($p \geq 0,05$) e F ($p \geq 0,05$), respectivamente.

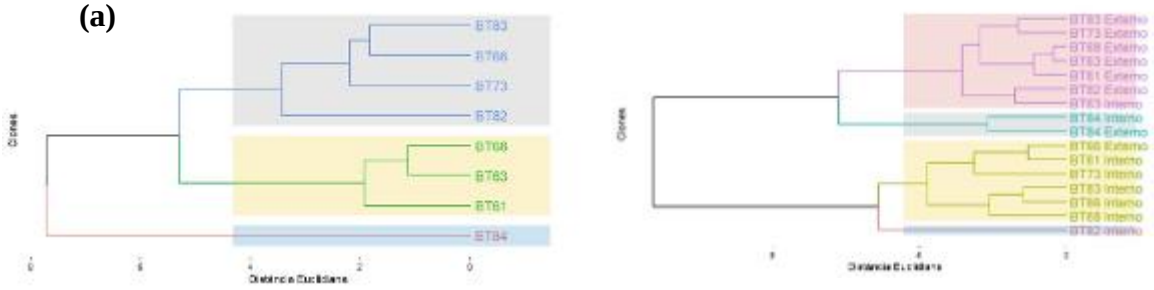
A relação entre densidade e resistência mecânica é amplamente reconhecida na literatura, uma vez que madeiras mais densas apresentam maior quantidade de parede celular por unidade de volume, proporcionando maior capacidade de suportar esforços de compressão. Assim, a maior resistência apresentada pelo clone BT84 pode ser explicada, em grande parte, por sua maior densidade aparente, enquanto os menores valores observados para BT66 e BT73 acompanham suas menores densidades. Da mesma forma, a maior resistência mecânica do cerne externo em relação ao interno está associada ao aumento da densidade nessa região, decorrente à maturação do lenho.

3.3 Dendrograma de Agrupamento Hierárquico

O dendrograma de agrupamento hierárquico, baseado na distância euclidiana, reuniu os clones em três grupos distintos (Figura 1a). O clone BT84 formou um grupo isolado, evidenciando elevada dissimilaridade em relação aos demais materiais. O segundo grupo foi composto pelos clones BT61, BT63 e BT68, enquanto o terceiro reuniu BT82, BT73, BT66 e BT83.

Figura 1. Dendrogramas de agrupamento hierárquico da posição radial da madeira de clones de teca em função das propriedades da madeira de oito clones de *Tectona grandis*, considerando (a) o agrupamento dos clones, independentemente da posição radial e (b) o agrupamento dos clones, considerando as posições radiais

(a)



(a) Considerando a posição radial do cerne (Figura 1b), as amostras foram distribuídas em quatro grupos. O BT82 interno constituiu um grupo isolado, indicando comportamento distinto em relação às demais amostras. A maior parte das amostras do cerne interno agrupou-se no mesmo bloco, enquanto as amostras do cerne externo concentraram-se predominantemente em outro grupo, exceto o BT63 interno e o BT66 externo, respectivamente. O clone BT84 apresentou elevada similaridade entre as posições radial interna e externa, indicando maior homogeneidade de suas propriedades ao longo do cerne.

Esses agrupamentos demonstram que determinados clones apresentam comportamento tecnológico semelhante, permitindo sua utilização de forma equivalente pela indústria madeireira. Além disso, a similaridade observada entre alguns materiais amplia a flexibilidade na seleção de matéria-prima, reduzindo a dependência de um único clone para atender aos requisitos de qualidade do mercado.

4. Conclusões

O material genético e a posição radial influenciam significativamente a qualidade da madeira de cerne de *Tectona grandis*. O BT84 apresentou maior densidade aparente e resistência à compressão, enquanto o BT82 apresentou a madeira de cerne mais clara e com maior intensidade da componente amarela. A posição radial influenciou a maioria das propriedades avaliadas, sendo o cerne externo mais denso e mais resistente à compressão, enquanto o cerne interno apresentou maior luminosidade, maior intensidade da componente amarela e saturação de cor. A resistência ao cisalhamento não foi influenciada pelos componentes avaliados. A análise de agrupamento evidenciou similaridade tecnológica entre alguns materiais genéticos.

5. Agradecimentos

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pela acessão de bolsa de estudos das duas primeiras autoras. À Teak Resources Company pela doação do material de estudo e financiamento do projeto de pesquisa.

6. Referências bibliográficas

Albuês, T. A. S., Pereira, B. L. C., Guimarães, A., C., Môra, R., & Oliveira, A. C., (2024). Quality of Tectona grandis for sawn wood production. Maderas. Ciencia y tecnología, 26. http://dx.doi.org/10.22320/s0718221x/2024.06

Arce, N., & Moya, R. (2015). Wood characterization of adult clones of *Tectona grandis* growing in Costa Rica. Cerne, 21(3), (353-362). https://doi.org/10.1590/01047760201521031751

Campos, C. M., Hoffmann, W. R., Correia, F. D. S., Lengowski, E. C., Silva, M. J. D., Natalino, R., Oliveira, A. C. & Pereira, B. L. C. (2025). Radial variation in colorimetric parameters, chemical composition, and biological resistance of teak wood extracted from 13-and 22-year-old teak trees. Forests, v. 16 (1), (177). https://doi.org/10.3390/f16010177

Indústria Brasileira de Árvores (IBÁ). (2023). Relatório anual Ibá. http://iba.org/pt/dados-e-estatisticas/cenarios-iba

Kokutse, A. D., Stokes, A., Baillères, H., Kokou, K., & Baudasse, C. (2006). Decay resistance of Togolese teak (*Tectona grandis* Lf) heartwood and relationship with colour. Trees, 20 (2), 219–223. https://doi.org/10.1007/s00468-005-0028-0

Lima, I.. L., Ranzini, M., Longui, E. L., & Andrade, J. B. (2021). Wood characterization of *Tectona grandis* LF cultivated in Brazil: a review of the last 30 years. Research, Society and Development, 10(14), e162101421549–e162101421549. https://doi.org/10.33448/rsd-v10i14.21549

Mori, C. L. S. O., Lima, J. T., Mori, F. A., Trugilho, P. F., & Goncalez, J. C. (2005). Caracterização da cor da madeira de clones de híbridos de *Eucalyptus* spp. Cerne, 11 (2), 137–146.

Moya, R., & Berrocal, A. (2010). Wood colour variation in sapwood and heartwood of young trees of *Tectona grandis* and its relationship with plantation characteristics, site, and decay resistance. Annals of Forest Science, 67(1), 109. 10.1051/forest/2009088

Moya, R. M. J. D., Marin, J. D., Murillo, O., & Leandro, L. (2013). Wood physical properties, color, decay resistance and stiffness in Tectona grandis clones with evidence of genetic control. Silvae Genetica, 62 (1-6), 142-152, 2013. https://doi.org/10.1515/sg-2013-0019

Silva, J. E. C. (2024). Morfologia do fuste e propriedades da madeira de *Tectona grandis* L. f. de plantações em idade de corte final (Dissertação de mestrado). Universidade Federal de Mato Grosso.

Souza, L. V. C., Silva, J. E. C., Azevedo, T. L. B., Mascarenhas, A> R. P., Ugalde Arias, L. A., Pereira, B. L. C., & Oliveira, A. C. (2024). Wood quality of young *Tectona grandis* L. f. trees and its relationship with genetic material and planting site in Mato Grosso, Brazil. Forests, 15(5), 860. https://doi.org/10.3390/f15050860

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Influência do lenho de reação nas propriedades físicas e anatômicas da madeira de *Eucalyptus pellita* (F.Muell.)

Karolayne Oliveira da Silva[1]; Amanda Carvalho de Melo[1]; Beatriz Santos Neves[1]; Maria Eduarda Silva Pereira[1]; Yasmin Araújo dos Santos[1]; Yohana Barros Silva[1]; Luiz Eduardo de Lima Melo[1]

[1] Universidade do Estado do Pará, Campus VIII, Centro de Ciências Naturais e Tecnologia, Xiloteca Joaquim Ivanir Gomes (JIGw)

Resumo: O lenho de tração resulta da modificação da estrutura celular normal da madeira em resposta a estímulos mecânicos, ocasionando alterações que podem influenciar suas propriedades tecnológicas. O objetivo deste trabalho foi caracterizar a influência do lenho de tração nas propriedades físicas e anatômicas na madeira de *Eucalyptus pellita*. Para isso, foram realizados ensaios para as propriedades físicas (ABNT) com aplicação de análise de variância para verificar diferenças entre os tipos de lenho. Os resultados mostraram que entre as variáveis avaliadas, apenas o comprimento das fibras diferiu-se significativamente entre o lenho de tração e o lenho oposto, com valores superiores no lenho de tração. As demais variáveis anatômicas — espessura da parede, largura das fibras, diâmetro do lume e densidade básica — não se diferiram estatisticamente, indicando que o lenho de tração não representa limitação relevante ao processamento e uso tecnológico da madeira da espécie.

Palavras-chave: Qualidade da Madeira; Lenho de Reação; Propriedades Físicas.

Influence of reaction wood on the physical and anatomical properties of wood of *Eucalyptus pellita (*F.Muell.)

Abstract: Tensile wood results from the modification of the normal cellular structure of wood in response to mechanical stimuli, causing changes that can influence its technological properties. The objective of this study was to characterize the influence of traction wood on the physical and anatomical properties of *Eucalyptus pellita* wood. For this, tests for physical properties (ABNT) were carried out with the application of analysis of variance to verify differences between the types of wood. The results showed that among the variables evaluated, only the length of the fibers differed significantly between the tensile wood and the opposite wood, with higher values in the tensile wood. The other anatomical variables — wall thickness, fiber width, lumen diameter and basic density — did not differ statistically, indicating that traction wood does not represent a relevant limitation to the processing and technological use of the wood of the species.

Keywords: Wood Quality; Reaction Wood; Physical Properties.

1. Introdução

A madeira é um dos recursos naturais mais estratégicos para o setor florestal brasileiro, sustentando cadeias produtivas como celulose e papel, siderurgia a carvão

vegetal, bioenergia, produtos sólidos de madeira e painéis reconstituídos (IBÁ, 2021). O desempenho dessas cadeias depende diretamente da qualidade da matéria-prima, o que torna essencial o estudo das características físicas, químicas e anatômicas das espécies utilizadas. Nesse contexto, o gênero *Eucalyptus* ocupa posição de destaque, representando a maior parte dos plantios comerciais do país devido ao seu rápido crescimento, elevada produtividade, adaptabilidade ecológica e versatilidade tecnológica (Valverde et al., 2014).

Entre as espécies cultivadas, *Eucalyptus pellita* tem ganhado relevância nos últimos anos. Além de apresentar bom desempenho silvicultural em diferentes condições ambientais, destaca-se pela resistência a doenças, pela estabilidade produtiva e pelo potencial para diferentes aplicações industriais, incluindo celulose, energia e produtos sólidos (Guimarães et al., 2010; Santos et al., 2014). A expansão do uso dessa espécie reforça a necessidade de compreender seus atributos tecnológicos, especialmente aqueles relacionados à qualidade da madeira.

Apesar das vantagens, a madeira de eucalipto pode apresentar defeitos que comprometem seu processamento e desempenho industrial. Entre esses defeitos, o lenho de reação — particularmente o lenho de tração, característico das folhosas — é um dos mais relevantes. Esse tecido se forma quando o tronco sofre inclinação devido à ação de ventos, topografia acentuada, assimetria da copa ou outros fatores que alteram o equilíbrio biomecânico da árvore (Sousa, 2004). A resposta fisiológica ao estresse mecânico desencadeia modificações estruturais no lenho, resultando em alterações anatômicas, químicas e físicas que podem impactar diretamente a qualidade da madeira. Essas alterações podem comprometer o desempenho da madeira durante o processamento industrial, tornando importante compreender seus efeitos sobre propriedades físicas e anatômicas utilizadas na avaliação da qualidade da matéria-prima.

Nas angiospermas, o lenho de tração caracteriza-se pela presença de fibras gelatinosas (G-fibers), menor lignificação, maior proporção de celulose e mudanças nas dimensões celulares, como variações no comprimento das fibras, espessura da parede, diâmetro do lume e distribuição dos vasos (Donaldson & Singh, 2016; Latorraca & Albuquerque, 2000). Essas modificações estruturais podem influenciar diretamente propriedades como densidade básica, retratibilidade, resistência mecânica e comportamento durante o desdobro, secagem e colagem — etapas críticas para a indústria madeireira (Ferreira, 2007; Albino et al., 2012).

Embora o lenho de tração já tenha sido amplamente estudado em espécies como *E. grandis*, *E. urophylla* e híbridos comerciais, o comportamento desse tecido em *Eucalyptus*

pellita ainda é pouco conhecido. Estudos preliminares sugerem que a espécie pode apresentar alterações específicas, especialmente no comprimento das fibras, frequentemente citado como um dos principais marcadores anatômicos do lenho de tração em folhosas (Souza, 2015). No entanto, ainda não há consenso sobre a magnitude dessas alterações nem sobre seus impactos reais nas propriedades físicas da madeira, como densidade básica — parâmetro essencial para aplicações industriais. Apesar da relevância do tema, ainda são escassos estudos que avaliem simultaneamente as alterações anatômicas e físicas provocadas pelo lenho de tração em *Eucalyptus pellita*, dificultando a compreensão de seus impactos sobre a qualidade tecnológica da madeira.

Essa lacuna científica é particularmente relevante considerando o avanço do uso de *E. pellita* em setores que demandam madeira de alta qualidade e estabilidade dimensional. A caracterização detalhada das alterações provocadas pelo lenho de tração permite identificar possíveis limitações ao processamento, prever comportamentos tecnológicos e orientar práticas silviculturais que reduzam a ocorrência desse defeito.

Diante disso, torna-se necessário aprofundar o entendimento sobre como o lenho de tração influencia a estrutura celular e as propriedades físicas da madeira de *Eucalyptus pellita*. Assim, o objetivo deste trabalho foi comparar as propriedades físicas e anatômicas entre o lenho de tração e o lenho oposto de *Eucalyptus pellita*, visando identificar alterações relevantes para a qualidade tecnológica da madeira.

2. Material e métodos

O estudo foi conduzido com três árvores de *Eucalyptus pellita* com aproximadamente 9 anos de idade, provenientes de um plantio comercial localizado no município de São Bento do Tocantins – TO (latitude 06º01'13" S e longitude 47º54'08" W), pertencente à Siderúrgica Norte Brasil (SINOBRAS). O clima da região é do tipo Aw, segundo a classificação de Köppen (1936), caracterizado por estação chuvosa entre dezembro e março e estação seca de abril a novembro.

Após o abate das árvores, foram retirados discos de 4 cm de espessura na base do fuste. Cada disco foi seccionado em cunha, permitindo a análise radial no sentido medula–casca e a identificação das regiões. A identificação do lenho de tração foi realizada na região superior da inclinação do fuste, enquanto o lenho oposto correspondeu à região inferior, conforme o padrão descrito para folhosas. A identificação visual dessas regiões e o seccionamento em cunha podem ser observados na **Figura 1**. A partir das cunhas foram confeccionadas amostras padrão

com dimensões de 3,0 cm × 1,5 cm × 4,0 cm, utilizadas para a determinação da densidade básica e para análises macroscópicas. As amostras destinadas às análises físicas permaneceram acondicionadas em condições controladas até a realização dos ensaios físicos. As comparações entre lenho de tração e lenho oposto foram realizadas dentro de cada árvore, minimizando a influência da variabilidade entre indivíduos.

A densidade básica foi determinada conforme a norma NBR 11941 (ABNT, 2003). As amostras foram submetidas ao processo de saturação em água por duas semanas. Após esse período, realizou-se a pesagem do volume saturado utilizando balança de precisão. Em seguida, as amostras foram levadas à estufa a 105 °C. Após secagem em estufa a 105 °C até massa constante, a densidade básica foi calculada pela relação entre a massa seca e o volume saturado, conforme a NBR 11941 (ABNT, 2003).

Para a determinação do comprimento das fibras, realizou-se a maceração da madeira utilizando solução de Franklin (1945). As amostras foram maceradas em solução de Franklin (1945), coradas com safranina aquosa a 1% e montadas em lâminas permanentes para análise microscópica, conforme ilustrado na **Figura 2**. As mensurações seguiram as recomendações da IAWA Committee (1989), realizando-se 25 medições por variável anatômica para cada tipo de lenho.

As análises anatômicas incluíram mensurações de comprimento das fibras (CF), espessura da parede das fibras (EPF), largura das fibras (LF) e diâmetro do lume das fibras (DLF). As imagens foram obtidas em microscópio óptico equipado com sistema de captura digital, garantindo precisão nas medições. As variáveis foram selecionadas por apresentarem reconhecida importância na caracterização do lenho de tração em folhosas.

O delineamento experimental foi inteiramente casualizado, considerando dois tratamentos: lenho de tração e lenho oposto. Para cada variável anatômica e física, foram realizadas medições suficientes para garantir robustez estatística. Os dados foram submetidos à análise de variância (ANOVA), e as médias foram comparadas pelo teste F ao nível de 5% de significância ($p < 0,05$). As análises estatísticas foram realizadas em software apropriado para experimentação florestal.



Figura 1 – Identificação das regiões de lenho de tração e lenho oposto e obtenção das amostras de *Eucalyptus pellita*.



Figura 2 – Etapas do preparo anatômico para obtenção das fibras e realização das mensurações microscópicas.

3. Resultados e discussão

A influência do lenho de tração sobre as propriedades anatômicas das fibras e a densidade básica da madeira de *Eucalyptus pellita* encontra-se apresentada na Tabela 1, que apresenta os valores médios, desvio-padrão e resultados da análise de variância (ANOVA) para as variáveis anatômicas das fibras e para a densidade básica, comparando o lenho de tração e o lenho oposto.

Tabela 1 – Valores médios, desvio-padrão e análise de variância (ANOVA) das características anatômicas das fibras e da densidade básica entre o lenho de tração e o lenho oposto de *Eucalyptus pellita*

Variável	Lenho de tração (A)	Lenho oposto (B)	F	valor-p
CF (µm)	**791,86 ± 139,96 a**	**751,28 ± 133,30 b**	6,17	**0,0135**
EPF (µm)	7,46 ± 1,60 a	7,35 ± 1,44 a	0,36	0,547
LF (µm)	14,99 ± 2,78 a	15,46 ± 2,98 a	1,95	0,164

DLF (µm)	7,53 ± 2,57 a	8,10 ± 2,40 a	3,78	0,053
Densidade básica (g cm^{-3})	0,487 ± 0,061 a	0,490 ± 0,041 a	0,008	0,930

Médias seguidas pela mesma letra na linha não diminuem entre si pelo teste F da análise de variância (ANOVA), ao nível de 5% de significância ($p < 0,05$). CF = comprimento das fibras; EPF = espessura da parede das fibras; LF = largura das fibras; DLF = diâmetro do lume das fibras.

Entre as características avaliadas, apenas o comprimento das fibras (CF) apresentou diferença estatisticamente significativa entre os dois tipos de lenho ($p = 0,0135$), com valores superiores no lenho de tração. Esse resultado confirma que a formação do lenho de tração promove alterações estruturais específicas, especialmente relacionadas ao alongamento das fibras, comportamento amplamente descrito na literatura para folhosas submetidas à inclinação do fuste (Donaldson & Singh, 2016; Souza, 2015). A diferença visual entre os comprimentos das fibras pode ser observada na Figura 3, onde o lenho de tração apresenta fibras mais longas e bem definidas, enquanto o lenho oposto apresenta fibras relativamente mais curtas. Esse comportamento confirma que o comprimento das fibras representa um dos principais indicadores anatômicos da formação do lenho de tração em *Eucalyptus pellita*, podendo ser utilizado como parâmetro complementar em estudos de qualidade da madeira e de caracterização desse tecido.

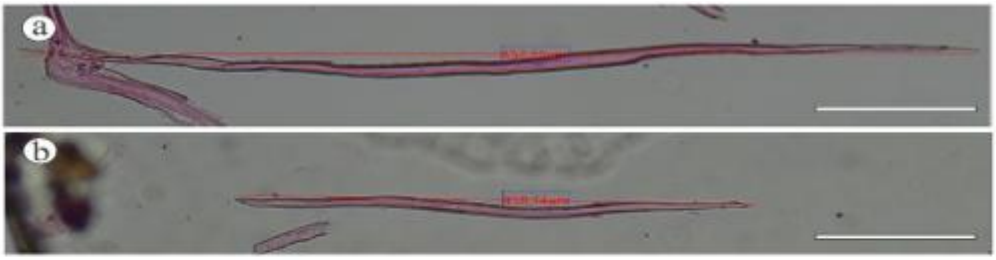


Figura 3 – Diferença no comprimento das fibras entre o lenho de tração (a) e o lenho oposto (b) de *Eucalyptus pellita*. Barra = 200 µm.

Esse aumento no comprimento das fibras está associado à presença de fibras gelatinosas (G-fibers), que desempenham papel fundamental no mecanismo de reorientação do tronco, promovendo maior deposição de celulose e contribuindo para o restabelecimento da verticalidade da árvore (Latorraca & Albuquerque, 2000). Assim, o comportamento observado em *Eucalyptus pellita* está de acordo com o padrão anatômico esperado para o lenho de tração em angiospermas. Esse resultado reforça que o alongamento das fibras constitui uma resposta fisiológica característica do lenho de tração em folhosas, embora sua intensidade possa variar entre espécies de *Eucalyptus*.

Por outro lado, as demais características anatômicas — espessura da parede das fibras (EPF), largura das fibras (LF) e diâmetro do lume das fibras (DLF) — não apresentaram diferenças significativas entre o lenho de tração e o lenho oposto ($p > 0,05$). Esses resultados indicam que, embora o lenho de tração promova alterações pontuais, ele não modifica de forma expressiva a estrutura celular da madeira de *Eucalyptus pellita*. Estudos com outras espécies de eucalipto frequentemente relatam alterações mais amplas nessas variáveis (Albino et al., 2012), sugerindo que *E. pellita* pode apresentar menor sensibilidade anatômica ao estresse mecânico. A estabilidade dessas variáveis sugere que, para a espécie estudada, o desenvolvimento do lenho de tração promove alterações anatômicas localizadas, sem modificar significativamente a organização geral das fibras.

A densidade básica também não apresentou diferença significativa entre os dois tipos de lenho ($p = 0,930$), com valores médios de 0,487 g cm^{-3} para o lenho de tração e 0,490 g cm^{-3} para o lenho oposto. A estabilidade dessa propriedade é um aspecto positivo para o processamento industrial, uma vez que a densidade básica está diretamente relacionada ao rendimento, à resistência mecânica e ao comportamento da madeira durante a secagem e usinagem (Ferreira, 2007). Dessa forma, a ausência de variação significativa indica que a presença de lenho de tração não compromete a qualidade física da madeira de *Eucalyptus pellita*. Do ponto de vista tecnológico, esse resultado indica que a presença de lenho de tração não altera significativamente uma das propriedades físicas mais importantes para aplicações industriais da madeira, favorecendo seu aproveitamento tecnológico.

Embora o diâmetro do lume não tenha apresentado diferença estatística ($p = 0,053$), o resultado indica comportamento próximo ao nível de significância adotado, sugerindo que estudos com maior número de árvores podem contribuir para esclarecer a influência do lenho de tração sobre essa característica. De maneira geral, os resultados demonstram que o lenho de tração em *Eucalyptus pellita* promove alterações anatômicas específicas, concentradas principalmente no comprimento das fibras, sem comprometer a densidade básica da madeira. Esses achados indicam que a presença desse tecido não representa limitação significativa ao aproveitamento tecnológico da espécie nas condições avaliadas.

4. Conclusões

O lenho de tração influenciou as propriedades anatômicas da madeira de *Eucalyptus pellita*, promovendo aumento significativo apenas no comprimento das fibras, enquanto a

espessura da parede, largura das fibras, diâmetro do lume e densidade básica não diferiram entre o lenho de tração e o lenho oposto.

Os resultados indicam que, nas condições avaliadas, o lenho de tração não compromete a qualidade física da madeira de *Eucalyptus pellita*, evidenciando que as alterações anatômicas observadas são pontuais e não representam limitações relevantes ao seu aproveitamento tecnológico.

5. Agradecimentos

Os autores agradecem à Siderúrgica Norte Brasil S.A. (SINOBRAS) pela disponibilização do material genético utilizado neste estudo. Agradecem ainda ao Sustentabilidade na Amazônia da Universidade do Estado do Pará pelo suporte institucional à realização desta pesquisa. Este trabalho recebeu apoio financeiro da chamada pública MCTI/FINEP/FNDCT/Identidade Brasil – Recuperação e Preservação de Acervos 2024 (Ref. 3103/24), projeto nº 5827, convênio nº 0125.0186.00.

6. Referências bibliográficas

Albino, V. C. S., Latorraca, J. V. F., & Silva, J. C. (2012). Caracterização do lenho de tração em espécies de *Eucalyptus*. *Scientia Forestalis*, 40(95), 345–356.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2003). *NBR 11941: Madeira — Determinação da densidade básica*. ABNT.

Donaldson, L., & Singh, A. (2016). Reaction wood. In *Handbook of Wood Science and Technology* (pp. 1–28). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-28254-1_1 (doi.org in Bing)

Ferreira, S. (2007). Propriedades físicas da madeira e sua influência no processamento industrial. *Revista da Madeira*, 18(110), 24–30.

Franklin, G. L. (1945). A rapid method of softening wood for microtome sectioning. *Tropical Woods*, 88, 35–36.

Guimarães, L. M. S., Alves, A. M., & Mafia, R. G. (2010). Desempenho silvicultural de *Eucalyptus pellita* em diferentes condições ambientais. *Revista Árvore*, 34(1), 1–9. https://doi.org/10.1590/S0100-67622010000100001 (doi.org in Bing)

IBÁ – Indústria Brasileira de Árvores. (2021). *Relatório anual 2021*. IBÁ. https://iba.org

International Association of Wood Anatomists. (1989). *IAWA list of microscopic features for hardwood identification*. *IAWA Bulletin*, 10(3), 219–332.

Köppen, W. (1936). *Das geographische System der Klimate*. Gebrüder Borntraeger.

Latorraca, J. V. F., & Albuquerque, C. E. C. (2000). Características do lenho de tração em folhosas. *Revista Árvore*, 24(3), 345–352.

Santos, R. C., Oliveira, J. T. S., & Tomazello Filho, M. (2014). Qualidade da madeira de *Eucalyptus pellita* para fins industriais. *Scientia Forestalis*, 42(104), 789–798.

Sousa, V. (2004). Formação do lenho de reação em árvores inclinadas. *Revista Floresta*, 34(2), 215–222.

Souza, A. M. (2015**).** Alterações anatômicas do lenho de tração em espécies de *Eucalyptus*. *Cerne*, 21(4), 567–574. https://doi.org/10.1590/01047760201521041450 (doi.org in Bing)

Valverde, S. R., Silva, J. C., & Lima, R. M. (2014). Potencial tecnológico das espécies de *Eucalyptus* para fins industriais. *Revista Árvore*, 38(1), 1–10. https://doi.org/10.1590/S0100-67622014000100001 (doi.org in Bing)

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Influência do material genético na variação longitudinal da densidade básica da madeira de clones de *Pinus taeda* L.

Natalia Durigon Melo[1]; José Fellip Catique Marinho[1]; Thâmara dos Santos Osaki[1]; Rodrigo Schmitz[1]; Eduardo Bleichvel Oneda[1]; Rômulo Koeche[1]; Alexsandro Bayestorff da Cunha[1]; Polliana D'Angelo Rios[1]

[1] Centro de Ciências Agroveterinarias – CAV. Universidade do Estado de Santa Catarina – UDESC.

Resumo: *Pinus taeda* L. é uma das principais espécies florestais cultivadas no Brasil, sendo amplamente utilizada na produção de madeira serrada, painéis reconstituídos, celulose e papel. Entre as propriedades tecnológicas da madeira, a densidade básica se destaca por sua estreita relação com a resistência mecânica, a estabilidade dimensional e o rendimento industrial. Este estudo teve como objetivo comparar a variação longitudinal da densidade básica da madeira de dois clones de *Pinus taeda*, avaliando a influência do material genético na distribuição dessa propriedade ao longo do fuste. Foram utilizadas três árvores de cada clone, provenientes de plantios comerciais localizados em Campo Alegre, Santa Catarina. A densidade básica foi determinada pelo método hidrostático, conforme a ABNT NBR 11941 (2025), em seis posições ao longo da altura comercial do fuste (0%, DAP, 25%, 50%, 75% e 100%). Os dados foram submetidos à análise de variância em esquema fatorial e as médias comparadas pelo teste de Tukey a 5% de significância. Os resultados evidenciaram efeito significativo do clone e da posição longitudinal sobre a densidade básica da madeira. O clone AGOP53 apresentou valores superiores aos do clone AGOP89 em todas as posições avaliadas, demonstrando influência consistente do material genético nessa característica. Ambos os clones apresentaram comportamento longitudinal semelhante, caracterizado pela redução gradual da densidade da base para o topo do fuste. Conclui-se que a seleção clonal pode promover ganhos em densidade básica e qualidade tecnológica da madeira, contribuindo para a produção de matéria-prima mais uniforme e adequada às diferentes demandas industriais.

Palavras-chave: Qualidade da madeira; Melhoramento genético; Propriedades físicas.

Influence of benetic background on the longitudinal variation in wood basic density of *Pinus taeda* L. clones

Abstract: *Pinus taeda* L. is one of the main forest species cultivated in Brazil and is widely used for the production of sawn timber, wood-based panels, pulp, and paper. Among wood technological properties, basic density is considered a key indicator of quality due to its close relationship with mechanical strength, dimensional stability, and industrial yield. This study aimed to compare the longitudinal variation of wood basic density in two *Pinus taeda* clones and to evaluate the influence of genetic material on the distribution of this property along the stem. Three trees from each clone, obtained from commercial plantations located in Campo Alegre, Santa Catarina, Brazil, were evaluated. Basic density was determined using the hydrostatic method according to ABNT NBR 11941:2025 at six positions along the commercial stem height (0%, DBH, 25%, 50%, 75%, and 100%). Data were subjected to factorial analysis of variance, and means were compared using Tukey's test at the 5% significance level. The

results revealed significant effects of both clone and longitudinal position on wood basic density. Clone AGOP53 exhibited higher density values than clone AGOP89 at all evaluated positions, demonstrating a consistent genetic influence on this property. Both clones showed a similar longitudinal pattern, characterized by a gradual decrease in density from the stem base to the top. It was concluded that clonal selection can promote gains in basic density and wood technological quality, contributing to the production of a more uniform raw material suitable for different industrial applications.

Keywords: Wood quality; Genetic improvement; Physical properties.

1. Introdução

Segundo a Indústria Brasileira de Árvores (IBÁ), o Brasil possui aproximadamente 10,5 milhões de hectares de árvores plantadas, dos quais cerca de 1,9 milhões de hectares são ocupados por plantios de *Pinus*, representando 18% da área florestal cultivada do país (IBÁ, 2025). Entre as espécies mais plantadas, o *Pinus taeda* L. se destaca como uma das principais matérias-primas, sendo amplamente empregada na produção de madeira serrada, painéis reconstituídos, celulose, papel e produtos de maior valor agregado (Borenstein, 2024).

A crescente demanda por matéria-prima de elevada qualidade tecnológica tem impulsionado programas de melhoramento genético e a adoção de materiais clonais, visando aumentar a produtividade, a uniformidade dos povoamentos e o desempenho da madeira para diferentes aplicações industriais (Aguiar et al., 2011; Assis e Resende, 2011). A propagação clonal possibilita a multiplicação de genótipos superiores, proporcionando materiais geneticamente mais uniformes, produtivos e adaptados às condições de cultivo, o que favorece ganhos em produtividade e qualidade da matéria-prima em plantios comerciais (Braga et al., 2020).

Entretanto, o desempenho desses materiais não depende apenas do incremento volumétrico, mas também da qualidade tecnológica da madeira. Entre as propriedades físicas mais importantes destaca-se a densidade básica, considerada um dos principais indicadores de qualidade por sua estreita relação com as propriedades mecânicas, estabilidade dimensional, rendimento industrial e desempenho da madeira em diferentes processos de transformação (Neto et al., 2024). Essa propriedade resulta da interação entre fatores genéticos e ambientais, sendo influenciada pela espécie, idade da árvore, condições de crescimento e pela interação genótipo x ambiente (Wang et al., 2021; Oliveira et al., 2022).

Além dos fatores genéticos e ambientais, a densidade básica apresenta variações ao longo do fuste, tanto no sentido radial quanto longitudinal, decorrentes das mudanças

anatômicas e fisiológicas associadas ao crescimento cambial e à transição entre madeira juvenil e adulta (Palermo *et al*., 2013). A compreensão dessa distribuição é essencial para a classificação tecnológica da madeira, o planejamento do processamento industrial e a seleção de materiais genéticos superiores.

Embora existam estudos descrevendo a variação longitudinal da densidade básica em *Pinus taeda* em função da idade e das condições de crescimento (Melo et al., 2015; Neto et al., 2024), ainda são escassas as informações referentes ao comportamento dessa propriedade em materiais clonais, especialmente quanto à influência do genótipo na distribuição da densidade ao longo do fuste. O conhecimento desse comportamento pode contribuir para programas de melhoramento genético e para a definição de estratégias mais eficientes de utilização da madeira.

Diante desse contexto, este trabalho teve como objetivo comparar a variação longitudinal da densidade básica da madeira de dois clones de *Pinus taeda*, visando avaliar o comportamento dessa propriedade ao longo do fuste e verificar a influência do material genético na distribuição da densidade básica.

2. Material e métodos

Para o desenvolvimento do estudo, foram utilizados dois materiais genéticos clonais de *Pinus taeda* L., provenientes de plantios de uma empresa do setor florestal localizada no município de Campo Alegre, Santa Catarina, Brasil (26,14061° S; 49,09636° O). Foram selecionadas três árvores de cada clone, nas quais a densidade básica da madeira foi avaliada ao longo do fuste em seis posições relativas à altura comercial (0%, DAP, 25%, 50%, 75% e 100%), totalizando três repetições por clone.

A densidade básica da madeira foi determinada pelo método hidrostático, baseado no princípio de Arquimedes, utilizando-se o volume saturado obtido pelo deslocamento de água e a massa seca das amostras após secagem em estufa, com base na ABNT NBR 11941 (2025).

A normalidade dos dados foi verificada pelo teste de Shapiro-Wilk e a homogeneidade das variâncias pelo teste de Levene (centrado na mediana). Atendidos os pressupostos, os dados foram submetidos à análise de variância de dois fatores (ANOVA), tendo clone e posição no fuste como fatores fixos e sua interação. As médias foram comparadas pelo teste de Tukey a 5% de significância, gerando dois conjuntos de letras: maiúsculas para a comparação entre clones e minúsculas para a comparação entre posições no fuste. As análises foram conduzidas no ambiente R versão 4.6.0, utilizando os pacotes car (v3.1-5), dplyr (v1.2.1), ggplot2 (v4.0.3), os

testes de Shapiro-Wilk e a ANOVA foram executados com funções do pacote base stats, e as comparações múltiplas de Tukey com os pacotes emmeans e multcomp.

3. Resultados e discussão

A densidade básica da madeira foi influenciada significativamente pelo material genético e pela posição longitudinal no fuste (Figura 1). Em todas as posições avaliadas, o clone AGOP53 apresentou valores superiores aos observados para o clone AGOP89, evidenciando que o componente genético exerceu influência consistente sobre essa propriedade. Apesar das diferenças entre os clones, ambos apresentaram comportamento longitudinal semelhante, caracterizado pela redução gradual da densidade da base para o topo do fuste.

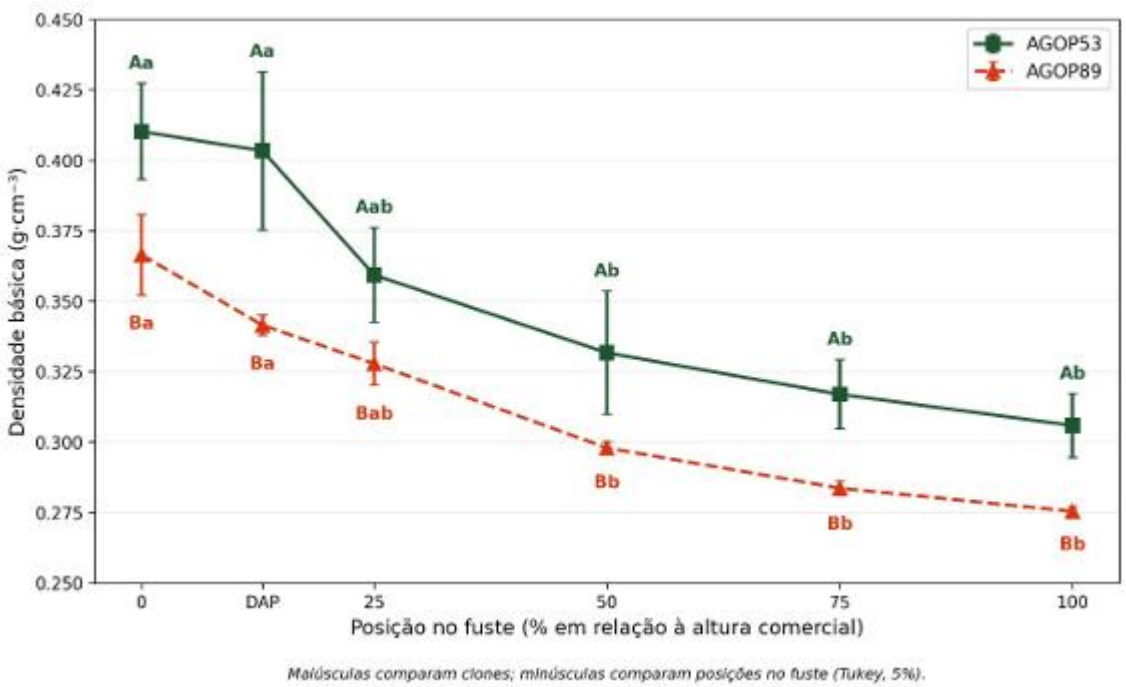


Figura 1 – Avaliação da densidade básica no sentido longitudinal do fuste pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$). Letras minúsculas diferentes na linha indicam diferenças na densidade básica ao longo do fuste, enquanto letras maiúsculas distintas na coluna indicam diferenças entre os clones.

A redução longitudinal observada é compatível com o padrão descrito para *Pinus taeda*, no qual as maiores densidades são encontradas nas regiões basais, decrescendo em direção ao topo da árvore. Melo et al. (2015) verificaram comportamento semelhante em árvores de diferentes idades, atribuindo essa tendência às modificações anatômicas decorrentes da maior proporção de madeira juvenil nas regiões superiores do fuste. Segundo os autores, a menor espessura das paredes dos traqueídes e a redução da participação do lenho tardio diminuem a massa de material sólido por unidade de volume, refletindo diretamente na densidade básica.

Estudos mais recentes reforçam que a densidade da madeira resulta da interação entre fatores genéticos, idade e crescimento da árvore. Santos et al. (2024), avaliando plantações comerciais de *Pinus taeda* em diferentes condições de sítio no Sul do Brasil, verificaram que a idade exerceu forte influência sobre a qualidade da madeira, promovendo aumento da densidade e melhoria das propriedades tecnológicas com o avanço do desenvolvimento das árvores. Os autores também destacam que, embora fatores ambientais contribuam para a variabilidade da madeira, o material genético permanece como um dos principais determinantes da qualidade final do lenho, resultado consistente com a superioridade do clone AGOP53 observada no presente estudo.

A diferença estatística entre os clones em todas as posições do fuste indica que o efeito clonal modificou o nível médio de densidade da madeira, mas não alterou o padrão longitudinal de distribuição dessa propriedade. Essa resposta sugere que ambos os materiais apresentam mecanismos fisiológicos semelhantes de formação do lenho ao longo da altura da árvore, diferindo principalmente na intensidade da deposição de parede celular durante a atividade cambial. Do ponto de vista do melhoramento genético, esse comportamento é particularmente relevante, pois demonstra que a seleção de materiais superiores pode resultar em incrementos consistentes da densidade básica em toda a extensão comercial do fuste, favorecendo a produção de matéria-prima mais uniforme.

Outro aspecto relevante refere-se à intensidade da redução da densidade ao longo do tronco. Observa-se que a maior queda ocorreu entre a base e aproximadamente 50% da altura comercial, seguida por uma redução mais discreta até o topo da árvore. Esse comportamento indica que as maiores alterações anatômicas se concentram na porção inferior do fuste, enquanto nas regiões superiores predominam tecidos com características estruturais relativamente homogêneas. Fernandes (2025), ao avaliar metodologias de amostragem para determinação da densidade básica em *Pinus taeda*, também observou tendência de redução longitudinal semelhante, destacando a importância da posição de coleta das amostras para

representar adequadamente a qualidade da madeira ao longo do fuste. Embora se trate de literatura cinzenta, seus resultados corroboram o comportamento encontrado neste estudo.

Do ponto de vista tecnológico, a maior densidade observada para o clone AGOP53 representa potencial vantagem para aplicações que demandam maior resistência mecânica e rigidez, uma vez que a densidade básica apresenta elevada correlação com propriedades como módulo de elasticidade, módulo de ruptura e resistência à compressão paralela às fibras. Em contrapartida, o comportamento longitudinal semelhante entre os clones sugere que estratégias de amostragem ao longo do fuste podem ser padronizadas para ambos os materiais, sendo as diferenças observadas atribuídas principalmente ao potencial genético de produção de madeira mais densa.

4. Conclusões

A densidade básica da madeira de *Pinus taeda* L. foi influenciada significativamente pelo material genético e pela posição longitudinal no fuste. O clone AGOP53 apresentou valores superiores aos do clone AGOP89 em todas as posições avaliadas, evidenciando o potencial da seleção clonal para obtenção de madeira de maior qualidade tecnológica.

Independentemente do clone, observou-se redução gradual da densidade básica da base para o topo da árvore, caracterizando um padrão longitudinal semelhante entre os materiais avaliados. Esse comportamento indica que o material genético alterou os níveis médios de densidade, mas não modificou sua distribuição ao longo do fuste.

Dessa forma, os resultados demonstram que a seleção de clones superiores pode promover ganhos consistentes em densidade básica, contribuindo para a produção de matéria-prima mais uniforme e adequada às diferentes demandas industriais. Além disso, o padrão longitudinal semelhante entre os clones sugere a possibilidade de adoção de estratégias de amostragem equivalentes na avaliação dessa propriedade.

5. Agradecimentos

A Universidade do Estado de Santa Catarina – UDESC, pela concessão de bolsa e disponibilidade do espaço para o desenvolvimento do estudo.

6. Referências bibliográficas

de Aguiar, A. V., de Sousa, V. A., Fritzsons, E., & Junior, J. E. P. (2011). Programa de melhoramento de Pinus da Embrapa Florestas.

Assis, T. F., & Resende, M. D. V. (2011). Genetic improvement of forest tree species. **Crop Breeding and Applied Biotechnology**, 11(spe), 44–49. https://doi.org/10.1590/S1984-70332011000500008

Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2025). ABNT NBR 11941:2025: Madeira: Determinação da densidade básica. ABNT.

Borenstein, G. M. (2024). Efeito de desbastes no comprimento dos traqueídeos e na densidade básica da madeira de *Pinus taeda* L. [Trabalho de conclusão de curso, Universidade Federal de Santa Catarina].

Braga, R. C., Paludeto, J. G. Z., Souza, B. M., Aguiar, A. V., Pollnow, M. F. M., Carvalho, A. G. M., & Tambarussi, E. V. (2020). Genetic parameters and genotype × environment interaction in *Pinus taeda clonal tests*. **Forest Ecology and Management**, 474, 118342. https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118342

Castor Neto, T. C., Santos, V. B., Kulmann, M. S. S., Cirilo, N. R. M., Schumacher, M. V., Stape, J. L., & Vidaurre, G. B. (2024). The impact of age and forestry practices on the wood quality of *Pinus taeda* L. grown in different sites in Southern Brazil. ***Forest Ecology and Management****, 562*, 121898. https://doi.org/10.1016/j.foreco.2024.121898

Fernandes, T. E. S. (2025). Influência da idade e posição longitudinal na densidade da madeira de *Pinus taeda* L. [Trabalho de conclusão de curso, Universidade Federal de Santa Catarina].

Indústria Brasileira de Árvores. (2025). **Relatório anual IBÁ 2025**. https://iba.org

Melo, R. R., Araldi, D. B., Santini, E. J., & Haselein, C. R. (2015). Radial and longitudinal variation of *Pinus taeda* L. wood basic density in different ages. ***Revista de Ciências Agrárias****, 58*(2), 192–197. https://doi.org/10.4322/rca.1839

Oliveira, G. M. V., Mello, J. M., Mello, C. R., Scolforo, J. R. S., Miguel, E. P., & Monteiro, T. C. (2022). Behavior of wood basic density according to environmental variables. **Journal of Forestry Research**, 33(2), 497–505. https://doi.org/10.1007/s11676-021-01372-2

Palermo, G. P. M., Latorraca, J. V. F., Severo, E. T. D., Nascimento, A. M., & Rezende, M. A. (2013). Delimitação entre os lenhos juvenil e adulto de *Pinus elliottii* Engelm. ***Revista Árvore***, *37*(1), 191–200. https://doi.org/10.1590/S0100-67622013000100020

Wang, Y., Zhang, R., & Zhou, Z. (2021). Radial variation of wood anatomical properties determines the demarcation of juvenile-mature wood in Schima superba. **Forests**, 12(4), 512. https://doi.org/10.3390/f12040512

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Influência do tanino aniônico nos índices de tração e arrebentamento de papéis *kraftliner*

Andressa Cerdeira Rocha[1]; Priscila Moreira Da Silva Xavier[1]; Iara Fontes Demuner[1], Ana Márcia M. Ladeira Carvalho[1], Marcelo Moreira da Costa[1], Jamille Carvalho de Souza[1], Rodrigo Fraga de Almeida[1], Mathias Teixeira Marçal[1]

[1] Universidade Federal de Viçosa.

Resumo: O setor florestal desempenha um papel estratégico no fornecimento de produtos renováveis, com destaque para as embalagens de papel, cuja demanda tem crescido com a expansão do e-commerce. A obtenção de materiais de alta resistência depende do aprimoramento das propriedades físico-mecânicas, como os índices de tração e de arrebentamento, contexto em que o uso de biopolímeros surge como uma solução inovadora e sustentável. Diante disso, este estudo avaliou a influência do tanino aniônico, como aditivo, na qualidade do papel. A incorporação à polpa foi realizada em três dosagens (3, 6 e 9 kg/t), comparadas ao controle. Os resultados mostraram que, na dosagem de 6 kg/t, o índice de tração atingiu 40 N·m/g, enquanto a dosagem de 9 kg/t proporcionou um ganho de 1,8 kPa·m²/g no índice de arrebentamento, ambos foram superiores ao controle. Conclui-se que a incorporação desse biopolímero favorece as propriedades físico-mecânicas e apresenta grande potencial como aditivo para embalagens tipo *kraftliner*.

Palavras-chave: Biopolímero; Propriedades físico-mecânicas; Sustentabilidade.

Influence of anionic tannin on the tensile and burst indices of kraftliner papers

Abstract: The forestry sector plays a strategic role in supplying renewable products, particularly paper packaging, whose demand has increased with the expansion of e-commerce. The production of high-strength materials depends on improving their physical and mechanical properties, such as tensile and burst indices. In this context, the use of biopolymers emerges as an innovative and sustainable solution. Therefore, this study evaluated the influence of anionic tannin, used as an additive, on paper quality. The additive was incorporated into the pulp at three dosages (3, 6, and 9 kg/t) and compared with a control treatment. The results showed that, at a dosage of 6 kg/t, the tensile index reached 40 N·m/g, whereas the dosage of 9 kg/t provided a gain of 1.8 kPa·m²/g in the burst index; both values were higher than those of the control. It can be concluded that the incorporation of this biopolymer improves the physical and mechanical properties of paper and shows great potential as an additive for kraftliner packaging.

Keywords: Biopolymer; Physical-mechanical properties; Sustainability.

1. Introdução

A indústria de papel e celulose destaca-se pelo aspecto sustentável fundamentado no uso de florestas plantadas e com manejo responsável que garante a sua principal matéria-prima. De acordo com o relatório anual do Ibá (2025), cerca de 10,5 milhões de hectares foram destinados às florestas plantadas e 258,3 milhões de m³ de madeira foram utilizados para uso industrial. Já no setor de produção de papel, foram fabricadas 11,3 milhões de toneladas, das quais 56,8% correspondem à produção de papéis destinados a embalagens.

Segundo a Associação Brasileira de Embalagem (2024), o crescimento das modalidades de e-commerce tem sido um fator decisivo para o faturamento de franquias, representando cerca de um terço da receita total, conforme a Pesquisa Anual Setorial de Foodservice 2024. Esse cenário é impulsionado pela busca por conveniência nas rotinas, o que reflete diretamente na intensificação da demanda por soluções de embalagens de papel que viabilizem o transporte seguro, prático e sustentável desses produtos.

Uma das principais características das embalagens de papel é sua capacidade de biodegradação, processo realizado por microrganismos que decompõem o material em um intervalo de três meses a cinco anos (IVC Embalagens, 2023). Em termos comparativos, a substituição do plástico por substratos de papel representa um ganho ambiental, visto que a degradação dos plásticos sintéticos pode se estender por 450 anos, gerando impactos de longo prazo nos ecossistemas.

A utilização da nanotecnologia tem avançado significativamente no setor industrial, especialmente através do desenvolvimento de nanocompósitos voltados aos produtos de embalagens (Moore, 2010). A viabilidade dessas soluções amplia-se à medida que novas funcionalidades são validadas e direcionadas para o ambiente produtivo. Atualmente, essa classe de materiais proporciona aumento nas propriedades, garantindo maior estabilidade térmica e resistência mecânica.

No que se refere aos biocompostos, é importante destacar o tanino, o qual consiste em uma molécula fenólica biodegradável com capacidade de formar complexos com macromoléculas, proteínas e minerais (Skoronski e*t al.*, 2014). Geralmente, os taninos são encontrados nas estruturas das plantas e podem ser obtidos de diversas fontes renováveis, com destaque para a casca de algumas espécies, cuja concentração pode atingir até 40%, fator que viabiliza sua exploração comercial (Justina, 2017). Sendo assim, os taninos apresentam diferentes propriedades e, consequentemente, podem ser aplicados na produção de couro, plásticos, anticorrosivos, cola, floculantes, entre outros (Silva, 1999).

Nesse cenário, o tanino surge como um aditivo favorável para o setor de embalagens celulósicas, embora sua aplicação ainda seja pouco explorada na literatura. De acordo com Lackner (2015), a mudança para biopolímeros na fabricação de embalagens viabiliza uma redução de 30% a 70% na pegada de carbono em comparação a fontes não renováveis. Tal evidência impulsiona a busca por aditivos capazes de maximizar a resistência do papel, mantendo o equilíbrio econômico e sustentável.

Diante da importância da aplicação do tanino aniônico, objetivou-se neste trabalho avaliar os efeitos do aditivo nas propriedades físico-mecânicas, especificamente nos índices de tração e arrebentamento, em papel para embalagem *kraftliner*.

2. Material e métodos

Foi utilizada uma amostra de polpa industrial de mix de fibra longa e curta fornecida por uma empresa do setor de embalagem de celulose e papel. O tanino aniônico foi empregado como aditivo na produção do papel e em função de sua carga aniônica, foi necessária a utilização de um agente de retenção coagulante denominado de hexametilenotetramina (HMTA), aplicada com a finalidade de favorecer a retenção e a interação do biopolímero com a matriz fibrosa.

a. Caracterização da polpa industrial de alto kappa

A polpa industrial foi caracterizada quanto ao número kappa, alvura, grau Schopper-Riegler (°SR), viscosidade intrínseca e índice de retenção de água. As análises foram realizadas em duplicada de acordo com os métodos apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 – Procedimentos analíticos utilizados para análises da polpa

Parâmetros	Procedimentos
Número Kappa	TAPPI T236 cm-85
Alvura	TAPPI T542 om-08
SRº	ISO 5267-1: 1999
Viscosidade intrínseca	SCAN-CM 15:99
IRA	TAPPI UM 256

b. Aditivação dos biopolímeros e agitação

Antes da incorporação do biopolímero, a polpa foi hidratada por 24 horas. A adição do biopolímero na polpa de alto kappa para produção do papel *kraftliner*, foi realizada na mistura

do papel por meio de três níveis de dosagem: 0, 3, 6 e 9 Kg/t de polpa. Dessa forma, foi possível definir o ponto ótimo com melhores resultados nos testes físico-mecânicos. Para melhor otimização do processo foi adicionado uma carga de 1 Kg/tas do coagulante catiônico hexametilenotetramina.

O biopolímero aniônico deve ser adicionado antes do catiônico para evitar o cisalhamento do sistema (Gao *et al.*, 2016; Read, 1983). A polpa foi agitada em misturador de bancada a 30.000 revoluções por 5 minutos e levada a banho-maria a 50 ºC por 60 minutos em saco de polietileno. Depois, foi homogeneizada com ajuste de consistência para produção de folhinhas de papel e análise do grau Schopper-Riegler.

c. Formação de folhas

A confecção das folhas laboratoriais seguiu à metodologia estabelecida pela TAPPI 205 om-81 e foi realizada em uma formadora de folhas do Laboratório de Celulose e Papel. Foram produzidas 20 folhas com gramatura de 120g/m² que foram acomodadas em uma sala climatizada com temperatura de 23±1ºC e umidade relativa do ar de 50±2% de acordo com a norma, como o tempo de secagem e aclimatação de no mínimo 24 horas cada.

d. Análise físico-mecânica

Os procedimentos analíticos para execução do testes físico-mecânicos estão apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 – Testes físico-mecânicos

Parâmetros	Procedimentos
Espessura	TAPPI T 551 om-06
Gramatura	TAPPI T 410 om-08
Índice de tração	TAPPI 494 om-06
Índice de arrebentamento	TAPPI 403 om-02

Para determinar a espessura, foi realizada a medição por meio de um micrômetro automático, enquanto, para determinar a gramatura, foi realizada a pesagem das folhinhas em uma balança de precisão. Para os testes físicos de índice de tração, foi utilizado o equipamento Instron Modelo, conforme a norma estabelecida pela TAPPI T 494 om-96. Para a obtenção dos resultados, foram realizadas leituras dos valores das forças aplicadas pela célula de carga e das deformações decorrentes do deslocamento da barra de tracionamento do equipamento, por meio

de um computador. Para determinar o índice de arrebentamento, foi utilizado o equipamento Mullen, que avalia a pressão-limite suportada pelo papel, medida por meio de um teste realizado com um diafragma elástico de área circular, conforme a norma TAPPI 403 om-0.

3. Resultados e discussão

a. Caracterização da polpa industrial de alto kappa

Os resultados da caracterização da polpa celulósica utilizada estão apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 – Caracterização da polpa

Parâmetros	Procedimentos
Número kappa	95,3
Alvura, % ISO	16,5
SR°	18
Viscosidade intrínseca, dm^3/kg	1191
IRA (%)	238

O valor de número kappa de 95,3 obtido para o material deste estudo encontra-se adequado em relação aos valores reportados na literatura, o que evidencia o potencial das fibras analisadas para o mercado de produção de embalagens, especialmente para papel *kraftliner*. O número kappa constitui um parâmetro fundamental para a avaliação da qualidade da polpa, sendo empregado na determinação da lignina residual. Essa medida é analisada como instrumento de monitoramento do processo de digestão e de deslignificação com oxigênio, além de permitir avaliar a eficiência dos reagentes químicos empregados no branqueamento e controlar a carga orgânica dos efluentes (Correia *et al.*, 2019). Nesse sentido, para a produção de papéis para embalagens, utilizam-se geralmente pastas kraft com números kappa entre 70 e 100, faixa que favorece as propriedades físico-mecânicas do produto final (Frinhani; Daltoé, 2012). Para o desenvolvimento dessas propriedades, fibras mais preservadas, caracterizadas por número kappa mais elevado, permitem melhor controle e obtenção superiores do grau de refino, resultando em maior potencial de resistência do papel em tração e arrebentamento (Hart *et al.*, 2011).

O valor de 16,5 % ISO obtido para a amostra base confirma essa tendência, reafirmando os dados mencionados na literatura para polpas com elevado número kappa. Segundo Colodette e Gomes (2015), entende-se por alvura a refletância de uma folha de polpa celulósica, papel ou cartão, aferida no comprimento de onda de 457 nm em condições padronizadas. As

propriedades de alvura e opacidade são importantes para a determinação da aplicação do papel, uma vez que essa característica está fortemente influenciada pela elevada concentração de fibras, que dificulta a passagem dos feixes de luz, aumentando a refração e a reflexão sobre a folha (Marinho *et al.,* 2017). Visto que a lignina atua como grupo cromóforo e se concentra em maior proporção nas polpas de alto kappa, espera-se que tais amostras apresentem baixa alvura (Iwasaki *et al.,* 2014).

No presente estudo, a polpa marrom de alto kappa foi refinada industrialmente, alcançando um valor de 18 ºSR como referência. O grau Schopper-Riegler (ºSR) consiste em um índice que expressa a resistência à drenagem da pasta celulósica, sendo diretamente influenciado pelas condições de inchamento da superfície das fibras. Dessa forma, essa grandeza indica a intensidade do tratamento mecânico, conhecido como refino, ao qual a polpa foi submetida (ABTN NBR 14031, 2004).

O valor de viscosidade encontrado neste estudo, de 1191 dm^3/kg, é considerado elevado e confere com as características típicas de uma polpa de alto kappa, visto que a produção desse tipo de polpa demanda menor dosagem de reagentes químicos e, consequentemente, preserva em maior proporção os carboidratos das fibras (Hart *et al.,* 2011). Conforme Caux *et al.* 2009, a viscosidade é empregada como parâmetro de monitoramento da degradação da polpa celulósica ao longo do processo produtivo, em razão de sua relação direta com o grau de polimerização. Essa associação mostra que a viscosidade é frequentemente vinculada às propriedades físicas de resistência das fibras de celulose.

No que diz respeito aos valores de Índice de Retenção de Água (IRA) reportados na literatura, a polpa industrial deste estudo apresentou resultado superior, com 238%, em comparação com os valores obtidos por Pedrazzi (2013) para polpas não branqueadas de *Eucalyptus grandis* (186%) e *Eucalyptus urograndis* (190%). Publío (2012) aponta o IRA como um indicador relevante para avaliar o grau de hidratação da parede celular da fibra. O refino promove esse fenômeno e, por conseguinte, confere maior flexibilidade às fibras, o que se traduz no aprimoramento de suas propriedades mecânicas

b. **Índice de Tração**

Os resultados do índice de tração da amostra controle comparados com os dos tratamentos contendo biopolímeros.

Tabela 4 – Efeito da adição do tanino aniônico no índice de tração

Dosagens (Kg/t de polpa)	Média (N.m/g)
0	36,1
3	38,3
6	40,0
9	39,6

O índice de tração corresponde à propriedade que expressa a resistência do material aos diferentes tipos de força presentes ao longo do processo produtivo do papel. Esse índice reflete a relação entre a resistência à tração e a gramatura do papel, fornecendo informações essenciais acerca da contribuição das fibras de celulose para as propriedades mecânicas, visto que a celulose exerce papel fundamental na qualidade do produto final, aspecto de relevância central na indústria de embalagens (Almeida *et al.*, 2024). Agrippina *et al.* (2024) relatam em seus estudos que as moléculas de tanino possuem a vantagem de se combinar com polímeros ou superfícies poliméricas, sintéticos, biopolímeros e fibras de tamanho micro e nano, formando novos produtos cujas propriedades físicas e químicas são significativamente aprimoradas. Neste estudo, a resistência foi expressa pelo Índice de Tração (IT), calculado pela razão entre a resistência absoluta e a gramatura (120 g/m²), com unidade em N·m/g. A avaliação do impacto das dosagens sobre o IT revelou que o pico de resistência foi atingido na concentração de 6 kg/t, com valor médio de 40,0 N·m/g, superando todos os demais tratamentos e a amostra-controle (36,1 N·m/g). Verificou-se uma tendência ascendente no IT proporcional ao incremento da carga até o limite de 6 kg/t, a partir do qual ocorreu declínio na propriedade, sugerindo um possível ponto de saturação.

c. Índice de arrebentamento

Os resultados do índice de arrebentamento da amostra controle comparados com os dos tratamentos contendo biopolímeros.

Tabela 5 – Efeito da adição do tanino aniônico no índice de arrebentamento

Dosagens (Kg/t de polpa)	Média (Kpa.m²/g)
0	1,5
3	1,5
6	1,6
9	1,8

O índice de arrebentamento (IA), denominado também índice de estouro, corresponde à força perpendicular aplicada à folha para romper as ligações interfibras (Feltrin, 2018). Essa

propriedade varia em função de diversos fatores, entre os quais se destacam o grau de refino, a gramatura e a espessura (Menegazzo, 2012).

Diante disso, Klock (2000) destaca que a resistência ao arrebentamento cresce com o aumento do refino até certo limite, declinando gradativamente a partir desse ponto. Essa tendência se explica pelo colapso das fibras, cujo maior grau resulta em maior área de contato interfibras e, consequentemente, em maior resistência ao arrebentamento.

O tanino aniônico conferiu o melhor resultado na dosagem de 9 kg/t, com índice de 1,8 kPa·m²/g. Casagrande et al. (2022) em seu trabalho de pesquisa observou que o índice de arrebentamento foi significativamente melhorado após a aplicação de biopolímeros, apresentando resultados de 5,41 kPa·m²/g e 6,0 kPa·m²/g. Para essa determinação, foi utilizado o teste de Tukey considerando um nível de probabilidade de 95% por meio do software Minitab Statistical. No contexto deste estudo, em comparação com a amostra-controle, a maioria das dosagens testadas resultou em acréscimos no índice de arrebentamento, demonstrando a capacidade desse biopolímero de atuar como agente de reforço físico-mecânico em papéis de embalagem e de agregar maior resistência às fibras.

4. Conclusões

A aplicação do tanino aniônico como aditivo em papel *kraftliner* mostrou-se uma estratégia favorável para potencializar suas propriedades mecânicas. Verificou-se que a eficiência da adição do biopolímero está relacionada à dosagem, fator que favorece a incorporação. Essa perspectiva fortalece a viabilidade de processos mais sustentáveis e econômicos, nos quais a redução de custos com aditivos químicos não impede a obtenção de melhorias substanciais nas propriedades físico-mecânicas do papel de embalagem *kraftliner*.

5. Agradecimentos

A Universidade Federal de Viçosa, ao Departamento de Engenharia Florestal e ao Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal pela oportunidade de cursar o mestrado. O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

1209. Referências bibliográficas

Agrippina, F. D., Ismayati, M., Hidayati, S., & Pratama, B. P. (2024). Utilization of tannins with various polymers for green-based active packaging: A review. Jurnal Sylva Lestari, 12(3), 648–683. https://doi.org/10.23960/jsl.v12i3.893

Almeida, A. M. de, & Santos, J. C. dos. (2024). Redução de variabilidade na tração da fibra de celulose branqueada. O Papel, 85(7), 92–96.

Associação Brasileira de Embalagem. (2024). Alimentos, food delivery e setor externo têm apoiado produção doméstica de embalagens. https://www.abre.org.br/inovacao/embalagem/alimentos-food-delivery-e-setor-externo-tem-apoiado-producao-domestica-de-embalagens/

Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2004). Gestão ambiental - Avaliação de desempenho ambiental - Diretrizes (ABNT NBR ISO 14031:2004). http://www.madeira.ufpr.br/disciplinasghislaine/abnt-nbr-iso-14031.pdf

Casagrande, N. B., Milagres, F. R., Sommer, S. M., & Santos, C. A. S. A. (2022). Biopolymer application to improve the sack kraft paper production. O Papel, 83(5), 75–81.

Caux, L. S. de, Amorin, S. C., Barony, B. A., & Frossard, V. A. (2009). Estudo da viabilidade do parâmetro viscosidade como determinante para a qualidade da fibra de celulose. Anais do 42º Congresso e Exposição Internacional de Celulose e Papel da ABTCP, São Paulo, SP, Brasil.

Colodette, J. L., & Gomes, F. J. B. (Eds.). (2015). Branqueamento de polpa celulósica: Da produção da polpa marrom ao produto acabado. Editora UFV.

Correia, F. M., Halik d'Angelo, J. V., & Silva Júnior, F. G. (2019). Revisitando número Kappa: conceitos e aplicações na indústria de celulose. O Papel, 80(7), 77–89.

Feltrin, M. R. (2018). Adição de xilanas e nanofibras para melhoria de propriedades do papel cartão [Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Viçosa]. Repositório Institucional UFV.

Frinhani, E. M. D., & Daltoé, R. (2012). Comparação das propriedades físico-mecânicas de polpas celulósicas Kappa 45 e Kappa 100 destinadas à fabricação de papéis para embalagens rígidas. Unoesc & Ciência – ACET, 3(1), 65–74.

Hart, P. W., Santos, R. B., Gonzalez, R. W., & Jameel, H. (2011). Impact of impregnation on high kappa number hardwood pulps. BioResources, 6(4), 5139–5150.

Indústria Brasileira de Árvores. (2025). Relatório anual 2025. https://iba.org/

IVC Embalagens. (2023). Embalagem biodegradável: tipos, vantagens e como escolher a certa.https://ivcembalagens.com.br/blog/embalagens-biodegradaveis/embalagem-biodegradavel-tipos-vantagens-e-como-escolher-a-certa/

Iwasaki, M. T., Ferreira, D. C., & D'Almeida, M. L. O. (2014). Previsão de perda de alvura de ofsete e cuchê [Trabalho apresentado]. 47º Congresso e Exposição Internacional de Celulose e Papel da ABTCP, São Paulo, SP, Brasil.

Justina, D. M. (2017). Aplicação de tanino vegetal como coagulante no tratamento de efluentes de laticínios e gestão do lodo para aplicação agronômica [Dissertação de mestrado, Universidade do Estado de Santa Catarina]. Repositório Institucional UDESC.

Klock, U. (2000). Qualidade da madeira juvenil de Pinus maximinoi H. E. Morre [Tese de doutorado, Universidade Federal do Paraná]. Repositório Institucional UFPR.

Lackner, M. (2015). Bioplastics–biobased plastics as renewable and/or biodegradable alternatives to petroplastics. In Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology (6th ed.). Wiley. https://doi.org/10.1002/0471238961.koe00006

Marinho, N. P., Klock, U., Lengowski, E. C., de Muñiz, G. I. B., & Zamarian, E. H. C. (2017). Características da polpa kraft extraída da espécie acácia-negra na produção de papel. Floresta e Ambiente, 24, Artigo e00099214. https://doi.org/10.1590/2179-8087.099214

Menegazzo, M. L. (2012). Características morfológicas de celuloses branqueadas de Pinus e Eucalyptus em analisador óptico automático de fibras [Dissertação de mestrado, Universidade Estadual Paulista]. Repositório Institucional UNESP.

Moore, G. (2010). Nanotecnologia em embalagens. Editora Blucher.

Pedrazzi, C., Colodette, J. L., Oliveira, R. C. de, & Wille, V. K. D. (2013). Avaliação morfológica das fibras de polpas Kraft de Eucalipto com diferentes conteúdos de Xilanas. Scientia Forestalis, 41(100), 515–522.

Publio, R., & Park, S. W. (2012). Aplicação de celulases no refino de fibras celulósicas Kraft branqueadas de eucalipto [Trabalho apresentado]. 45º Congresso e Exposição Internacional de Celulose e Papel da ABTCP, São Paulo, SP, Brasil.

Silva, T. S. S. (1999). Estudo de tratabilidade físico-química com uso de taninos vegetais em água de abastecimento e de esgoto [Dissertação de mestrado, Fundação Oswaldo Cruz]. Repositório Institucional FIOCRUZ.

Skoronski, E. (2014). Estudo da aplicação de tanino no tratamento de água para abastecimento captada no rio Tubarão, na cidade de Tubarão, SC. Revista Ambiente & Água, 9(4), 679–687.

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Influência do teor de umidade na formação e durabilidade de pellets de lodo de ETE de indústria de celulose

Carla Cristina Araújo Parreira[1]; Diego Henrique de Souza Chaves[1]; Duarte Miranda Neiva[2,3]; Solange de Oliveria Araújo[2]; Marcelo Cardoso[1]; Elém Patrícia Alves Rocha[4]

[1] Universidade Federal de Minas Gerais
[2] Forest Research Centre, TERRA Associate Laboratory, School of Agriculture, University of Lisbon, Tapada da Ajuda, 1349-017 Lisboa, Portugal
[3] Linking Landscape, Environment, Agriculture and Food Research Centre, TERRA Associate Laboratory, School of Agriculture, University of Lisbon, Tapada da Ajuda, Lisboa, 1349-017, Portugal
[4] Universidade Federal dos Vales Jequitinhonha e Mucuri

Resumo: A gestão de lodos de ETE da indústria de celulose representa um desafio ambiental e econômico, sendo a peletização uma alternativa para sua valorização. Este estudo avaliou a influência da umidade na formação e durabilidade de pellets produzidos com lodo de ETE de uma indústria de celulose em Portugal. Foram produzidos pellets com umidade de 12%, 20%, 31% e 40%. Na condição de 12% não houve formação de pellets, enquanto os demais teores permitiram formação adequada. A durabilidade foi de 97,1%, 93,8% e 84,9% para 20%, 31% e 40% de umidade, respectivamente, indicando redução da resistência mecânica com o aumento da umidade. A formação de pellets com 40% de umidade amplia a faixa operacional reportada na literatura e pode reduzir a necessidade de secagem do lodo. Conclui-se que a umidade influencia diretamente a formação e a durabilidade dos pellets, devendo sua definição equilibrar a qualidade do produto e o consumo energético da secagem.

Palavras-chave: Biomassa Residual; Densificação Energética; Valorização De Resíduos.

Influence of moisture content on the pelletizing technique of wastewater treatment plant sludge from the pulp and paper industry

Abstract: The management of wastewater treatment plant (WWTP) sludge from the pulp and paper industry represents an environmental and economic challenge, with pelletization emerging as a promising valorization strategy. This study evaluated the influence of moisture content on the formation and durability of pellets produced from WWTP sludge generated by a pulp mill in Portugal. Pellets were produced with moisture contents of 12%, 20%, 31%, and 40%. No pellet formation was observed at 12% moisture, whereas the other moisture levels resulted in successful pellet formation. Durability values of 97.1%, 93.8%, and 84.9% were obtained for pellets with 20%, 31%, and 40% moisture, respectively, indicating a reduction in mechanical strength as moisture content increased. Pellet production at 40% moisture extends the operational range reported in the literature and may reduce the need for sludge drying. These findings demonstrate that moisture content directly affects pellet formation and durability, and its optimization should balance product quality and drying energy consumption.

Keywords: Residual Biomass; Energy Densification; Waste Valorization.

1. Introdução

A indústria de celulose possui grande relevância econômica, mas também gera quantidades expressivas de resíduos sólidos, destacando-se os lodos proveniente das Estações de Tratamento de Efluentes (ETE). Estima-se que a indústria de celulose e papel gere entre 40 e 50 kg de lodo seco por tonelada de papel produzida, dos quais aproximadamente 70% correspondem ao lodo primário e 30% ao lodo secundário (Haile et al., 2021). Esse resíduo é constituído principalmente por fibras celulósicas, matéria orgânica, microrganismos e compostos minerais, apresentando elevada umidade e grande volume. Essas características dificultam seu manejo e aumentam os custos de transporte, armazenamento e disposição final (Torres et al., 2023).

A gestão adequada desse resíduo representa um desafio ambiental para o setor. Embora alternativas como disposição em aterros, coprocessamento e aplicação em solos sejam utilizadas, as exigências relacionadas à sustentabilidade e à economia circular têm impulsionado a busca por formas de valorização do lodo (Torres et al., 2023). Nesse contexto, o aproveitamento energético surge como uma alternativa promissora, contribuindo para a redução dos impactos ambientais e para a recuperação de recursos (Meyer et al., 2024).

Apesar de apresentar potencial energético devido à presença de matéria orgânica e fibras celulósicas, a elevada umidade do lodo constitui uma das principais limitações para sua utilização como combustível. A remoção de água é frequentemente necessária para aumentar o poder calorífico e viabilizar seu aproveitamento energético, porém essa etapa demanda elevado consumo de energia e pode comprometer a viabilidade econômica do processo (Gonçalves et al., 2024).

Entre as tecnologias de valorização energética, a peletização destaca-se por aumentar a densidade energética da biomassa, reduzir seu volume e melhorar as condições de armazenamento, transporte e manuseio (Rodrigues, 2021) O processo consiste na compactação do material, produzindo um combustível sólido mais homogêneo e adequado para aplicações térmicas (Mislej & Novosel, 2022).

A umidade é um dos principais fatores que influenciam a qualidade dos pellets. Durante a compactação, a água auxilia na formação das ligações entre partículas, favorecendo a coesão do material. Entretanto, teores muito baixos podem dificultar a formação dos pellets, enquanto valores excessivos podem reduzir sua resistência mecânica, tornando necessária a determinação de faixas adequadas para o processo (Benders et al., 2025).

No caso dos lodos da indústria de celulose, ainda são limitados os estudos que avaliam a influência da umidade na peletização. Rodrigues (2021) demonstrou a viabilidade da produção

de pellets a partir de lodo primário com aproximadamente 31% de umidade. Contudo, permanecem lacunas relacionadas ao comportamento do material em condições com teores inferiores ou superiores a esse valor, especialmente quanto à possibilidade de reduzir as demandas de secagem e os custos energéticos associados ao pré-tratamento.

Dessa forma, este trabalho teve como objetivo avaliar a influência de diferentes teores de umidade (12%, 20%, 31% e 40%) na produção de pellets a partir de lodo primário de ETE de uma indústria de celulose, buscando identificar os limites de umidade que permitem a formação dos pellets e verificar a possibilidade de ampliar a faixa de umidade adequada para o processo de peletização.

2. Material e métodos

2.1 Obtenção do lodo

O lodo utilizado neste estudo foi proveniente da Estação de Tratamento de Efluentes (ETE) de uma indústria do setor de celulose de Portugal. Após a coleta, o material foi acondicionado em recipientes apropriados e transportado para o laboratório de Pasta e Papel do Instituto Superior de Agronomia da Universidade de Lisboa, onde permaneceu armazenado até a realização dos ensaios.

Com o objetivo de contextualizar as características do lodo primário, foi realizado um levantamento bibliográfico sobre a composição típica desse resíduo da indústria de celulose e papel, com ênfase em unidades industriais portuguesas.

2.2 Preparação das amostras

O lodo recebido apresentava teor de umidade de aproximadamente 60% em base úmida, determinado por meio de uma balança analisadora de umidade (Figura 1). Foram preparadas amostras com teores de umidade de 12%, 20%, 31% e 40% (base úmida). O teor de 31% foi adotado como referência por corresponder à faixa de umidade previamente reportada na literatura como adequada para a produção de pellets de lodo primário da indústria de celulose. Os demais níveis foram selecionados para avaliar o comportamento do material em condições inferiores e superiores à referência. O ajuste da umidade foi realizado por meio de secagem ou adição controlada de água, seguido de homogeneização das amostras.



Figura 1 – Análise da umidade do lodo recebido.

2.3 Processo de peletização

Os ensaios de peletização foram realizados em uma peletizadora de laboratório *Smartwood*, modelo PLT100B. Para cada condição de umidade avaliada, em triplicata, uma amostra de lodo foi submetida ao processo de compactação mantendo-se constantes todos os parâmetros operacionais do equipamento, de modo que a umidade constituísse a única variável investigada.

Após a compactação, os pellets produzidos foram coletados e submetidos à avaliação visual quanto à sua conformação, uniformidade e integridade física. A viabilidade do processo de peletização foi determinada com base na capacidade do material de formar pellets coesos, íntegros e passíveis de manuseio após a saída do equipamento.

2.4 Avaliação da durabilidade mecânica

A avaliação da durabilidade mecânica dos pellets foi realizada conforme a norma DIN EN 15210-1:2010 (Solid biofuels – Determination of mechanical durability of pellets and briquettes – Part 1: Pellets), utilizando tambor rotativo (Ligno-Tester Tumbler 1000R), sob condições controladas (tempo e rotação). Após o ensaio, os pellets foram submetidos à separação dos finos e pesagem das frações retidas e degradadas, permitindo o cálculo da durabilidade por meio da relação entre a massa final de pellets íntegros e a massa inicial da amostra.

2.5 Análise dos resultados

Os resultados foram analisados considerando a influência do teor de umidade sobre a formação dos pellets e sobre sua resistência mecânica. Adicionalmente, foi discutido o

potencial de redução da etapa de secagem a partir da viabilidade observada em teores de umidade superiores aos reportados na literatura.

3. Resultados e discussão

A influência da umidade na formação dos pellets produzidos a partir do lodo de ETE da indústria de celulose é apresentada na Tabela 1. Os resultados demonstram que a umidade exerceu influência direta sobre a capacidade de aglomeração do material durante o processo de peletização. Observou-se que o lodo com 12% de umidade não apresentou formação adequada de pellets, enquanto as amostras com 20%, 31% e 40% resultaram na obtenção de pellets íntegros e passíveis de manuseio após a compactação.

Tabela 1 – Formação de pellets em função do teor de umidade do lodo.

Teor de Umidade (%)	Formação de Pellets
12	Não
20	Sim
31	Sim
40	Sim

A ausência de formação de pellets na condição de menor umidade pode ser atribuída à reduzida disponibilidade de água para promover a deformação e o rearranjo das partículas durante a compactação. A água atua como agente facilitador da formação de pontes entre partículas e do desenvolvimento das forças de coesão responsáveis pela integridade estrutural dos pellets. Dessa forma, teores insuficientes de umidade dificultam a aglomeração do material e comprometem a formação do produto densificado. Os pellets tradicionais produzidos com madeira, normalmente operam com umidades abaixo dos 15% sendo que para valores acima se verifica a quebra e instabilidade física deles, alo que não acontece para o lodo.

Por outro lado, a viabilidade observada nas condições de 20%, 31% e 40% indicam que essas faixas de umidade forneceram condições adequadas para a compactação do lodo. O resultado obtido para 31% de umidade está em concordância com Rodrigues (2021), que reportou a produção bem-sucedida de pellets a partir de lodo primário da indústria de celulose nessa faixa de umidade.

A capacidade de formação dos pellets também pode estar relacionada às características típicas dos lodos primários da indústria de celulose. Estudos realizados com lodos provenientes de fábricas portuguesas indicam elevada presença de carboidratos estruturais, especialmente

celulose e hemiceluloses, com teores variando entre aproximadamente 34 e 48% em base seca, além de fração significativa de matéria orgânica (Mendes et al., 2017). Por outro lado, observa-se menor contribuição de lignina, com valores entre cerca de 11 e 17%, quando comparada a biomassas lignocelulósicas convencionais, nas quais a lignina desempenha papel importante como agente natural de ligação durante processos de densificação.

Essa baixa proporção de lignina pode influenciar negativamente os mecanismos de coesão dos pellets, uma vez que esse componente atua como um dos principais responsáveis pela plasticidade e ligação interparticular sob ação de pressão e temperatura. Em contrapartida, a presença de fibras celulósicas curtas e finos, juntamente com a fração mineral significativa presente nesses lodos, pode favorecer a formação inicial de aglomerados quando há umidade adequada, contribuindo para a compactação do material.

Entretanto, quando associada a teores mais elevados de umidade, essa mesma composição pode resultar em redução da estabilidade estrutural dos pellets, devido ao excesso de água entre as partículas e à menor contribuição da lignina para a formação de ligações permanentes. Dessa forma, embora a umidade elevada favoreça a aglomeração inicial do material, pode também contribuir para a formação de estruturas menos coesas, explicando o comportamento de maior geração de finos e menor durabilidade observado nas condições de maior umidade.

O resultado mais relevante foi observado para o teor de umidade de 40%, no qual a formação dos pellets ocorreu de forma satisfatória mesmo acima da faixa normalmente reportada na literatura. Esse comportamento sugere que a janela operacional para peletização do lodo pode ser mais ampla do que previamente considerada, possibilitando a utilização de materiais com maior teor de umidade e potencial redução da necessidade de secagem prévia.

A Figura 2 apresenta a comparação entre a tentativa de peletização realizada com 12% de umidade, onde em a) o material se transforma em uma névoa de pó e não ocorre a produção de pellets e em b) os pellets produzidos na condição de 40% de umidade.

a) b)





Figura 2 – Influência da umidade na formação dos pellets: (a) tentativa de peletização a 12% de umidade; (b) pellets produzidos com 40% de umidade.

3.2 Influência da umidade na durabilidade dos pellets

Além da avaliação da formação dos pellets, foi realizado o ensaio de durabilidade mecânica em tambor rotativo com o objetivo de verificar a influência da umidade sobre a resistência dos pellets produzidos. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 – Resultados do ensaio de durabilidade dos pellets produzidos em diferentes teores de umidade.

Umidade (%)	Massa inicial (g)	Massa de finos (g)	Massa retida (g)	Durabilidade (%)
20%	500	14,5	485,5	97,1
31%	500	31	469	93,8
40%	500	65,5	434,5	84,9

Observa-se que o teor de umidade influenciou a durabilidade dos pellets. A condição de 20% de umidade apresentou o maior valor de durabilidade (97,1%), seguida pelas amostras com 31% (93,8%) e 40% (84,9%). De forma complementar, verificou-se aumento progressivo da geração de finos com o aumento da umidade do material utilizado na peletização. Em comparação à condição de 20% de umidade, a durabilidade foi reduzida em aproximadamente 3,4 pontos percentuais para 31% e 11,7 pontos percentuais para 40%.

Os resultados indicam que a produção de pellets ainda é possível em teores mais elevados de umidade; entretanto, o excesso de água pode comprometer sua resistência mecânica. Esse comportamento sugere que o aumento da umidade reduz a resistência dos

pellets, resultando em maior geração de finos e maior suscetibilidade à fragmentação durante o manuseio e o transporte

Quando comparados aos requisitos estabelecidos pela norma ISO 17225-2, os pellets produzidos com 20% de umidade apresentaram durabilidade mecânica compatível com os limites exigidos para uso industrial (DU ≥ 96,5% para as classes A1 e A2 e DU ≥ 96,0% para a classe B). Por outro lado, os pellets produzidos com 31% (93,8%) e 40% de umidade (85,4%) não atenderam aos critérios mínimos de durabilidade estabelecidos pela norma. Entretanto, especialmente para a condição de 40% de umidade, apesar da redução na durabilidade mecânica, os resultados indicam potencial de aplicação em sistemas nos quais os pellets são consumidos próximos ao local de produção, reduzindo a necessidade de manuseio e transporte intensivos. Nesses casos, a economia energética associada à menor necessidade de secagem pode compensar a menor resistência mecânica do produto.

A condição de 20% de umidade apresentou simultaneamente formação adequada dos pellets e o melhor desempenho mecânico, indicando uma condição potencialmente mais favorável para aplicações que exijam armazenamento, transporte e movimentação deste material densificado.

Por outro lado, embora a condição de 40% de umidade tenha permitido a formação dos pellets, a durabilidade observada foi aproximadamente 12 pontos percentuais inferior à obtida para 20% de umidade. Esse resultado demonstra que a ampliação da faixa operacional de umidade apresenta vantagens relacionadas à redução da necessidade de secagem do lodo, mas pode resultar em perdas de qualidade mecânica do produto.

Os resultados evidenciam um compromisso entre a redução do consumo energético associado à secagem e a resistência mecânica dos pellets produzidos. Dessa forma, a escolha do teor de umidade para a peletização do lodo deve considerar simultaneamente os custos associados à secagem e os requisitos de resistência mecânica exigidos para armazenamento, transporte e utilização dos pellets.

4. Conclusões

Este estudo avaliou a influência da umidade na formação e na durabilidade de pellets produzidos a partir de lodo de ETE da indústria de celulose. Os resultados demonstraram que não houve formação de pellets a 12% de umidade, enquanto as amostras com 20%, 31% e 40% apresentaram compactação adequada e formação de pellets íntegros.

A produção de pellets na condição de 31% de umidade confirmou resultados previamente reportados na literatura, enquanto a formação observada em 40% indica que a

faixa operacional de umidade para peletização desse resíduo pode ser mais ampla do que anteriormente considerada.

De modo geral, os resultados demonstram que a utilização de maiores teores de umidade pode reduzir a necessidade de secagem do lodo antes da peletização, porém com possível comprometimento da durabilidade dos pellets produzidos. Dessa forma, a definição da condição operacional mais adequada deve considerar simultaneamente os requisitos de resistência mecânica do produto e o consumo energético associado à secagem.

Ensaios complementares de densidade aparente, resistência à compressão e caracterização energética dos pelletes estão em desenvolvimento e, em conjunto com os resultados aqui apresentados, contribuirão para definir as condições operacionais mais adequadas à valorização energética do lodo de ETE da indústria de celulose.

5. Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio financeiro fornecido pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) através do Programa de Excelência Acadêmica (PROEX-Brasil) e do Programa de Doutorado Sanduíche do Exterior (PDSE). Os autores também agradecem à indústria de celulose Portuguesa por sua colaboração e fornecimento do material utilizado nesse estudo.

Este trabalho foi financiado pela FCT – Fundação para a Ciência e a Tecnologia, I.P., através dos projetos: UID/00239/2025 e UID/PRR/00239/2025 do Forest Research Centre; UID/04129/2025 do LEAF – Linking Landscape, Environment, Agriculture and Food research centre; e LA/P/0092/2020 do Laboratório Associado TERRA. A FCT financiou ainda Duarte M. Neiva através do contrato de investigação (CEEC-INST/00081/2021/CP2809/CT0001)

6. Referências bibliográficas

BENDERS, Richard T.; DIJKSMAN, Joshua A.; BASTIAANSEN, Thomas M. M.; FIX, Raoul; VAN DER GUCHT, Jasper; THOMAS, Menno. A temperature dependent framework to predict and control physical pellet quality in biomass extrusion. *arXiv*, 2025. https://arxiv.org/abs/2504.04838

DIN. DIN EN 15210-1:2010-04 – Solid biofuels – Determination of mechanical durability of pellets and briquettes – Part 1: Pellets. German version EN 15210-1:2010. Berlin: Deutsches Institut für Normung e.V., 2010.

Gonçalves, Lindomar & Mendoza Martinez, Clara & Nuncira, Jesús & Rocha, Elém & Coutinho de Paula, Eduardo & Cardoso, Marcelo. (2024). Hybrid solar drying of sludge from kraft pulp mills. Nordic Pulp & Paper Research Journal. 39. 10.1515/npprj-2023-0094

Haile, A., Gelebo, G. G., Tesfaye, T., Mengie, W., Mebrate, M. A., Abuhay, A., & Limeneh, D. Y. (2021). Pulp and paper mill wastes: Utilizations and prospects for high value-added biomaterials. Bioresources and Bioprocessing, 8(1), 3 https://doi.org/10.1186/s40643-021-00385-3

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). ISO 17225-2:2021. Solid biofuels — Fuel specifications and classes — Part 2: Graded wood pellets. Geneva, 2021.

MEYER, Torsten; YANG, Minqing Ivy; NESBØ, Camilla L.; MASTER, Emma R.; EDWARDS, Elizabeth A. Microbial community organization during anaerobic pulp and paper mill wastewater treatment. ACS ES&T Engineering, v. 4, n. 6, p. 1286–1301, 2024. https://doi.org/10.1021/acsestengg.3c00554

Mislej, V., & Novosel, B. (2022). Specification and Classification of Pelletised Dried Sewage Sludge: Identifying Its Key Properties as a Renewable Material for Enabling Environmentally Non-Harmful Energy Utilisation. *Sustainability*, *14*(22), 14836. https://doi.org/10.3390/su142214836.

RODRIGUES, Bruna Virgínia Cunha. *Produção de pellets utilizando lodo primário gerado na indústria de celulose kraft*. 2021. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2021.

Torres, C., Oliveira Carneiro, A.d., Cunha Rodrigues, B.V. et al. Torrefaction of kraft pulp mills sludges. Sci Rep 13, 22247 (2023). https://doi.org/10.1038/s41598-023-46158-0.

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Mapeamento da distribuição da celulose na parede celular de *Corymbia citriodora* por microscopia confocal Raman

José Tarcísio Lima[1]; Roger Hernandez[2]; Bruna Ugulino[2]

[1] Universidade Federal de Lavras, 37203-587 - Lavras (MG) Brasil
[2] Université Laval, G1V 0A6 Québec (QC), Canadá

Resumo: A celulose é um importante componente químico da parede das fibras da madeira. Em geral, é conhecida sua composição total na madeira, que se situa entre 40% e 50%. Entretanto, pouco é conhecido sobre sua distribuição e concentração nas diversas camadas que formam a parede celular, desde a lamela média até a camada S3. A microscopia confocal Raman (MCR) consiste em uma técnica que facilita esse conhecimento. Assim, o objetivo deste trabalho foi elaborar o mapa da distribuição da celulose dentro da parede da fibra da madeira de *Corymbia citriodora* de 60 anos de idade. Seções histológicas transversais de amostras de madeira foram submetidas ao exame em MCR. As análises espectrais e dos mapas químicos produzidos permitiram concluir que a banda espectral mais evidente para a celulose ocorreu em 380 cm^{-1}. Os mapas produzidos permitiram visualizar diversas camadas e regiões da parede, incluindo o canto celular e a lamela média. A distribuição da celulose na parede celular revelou um aumento na concentração (intensidade laser) desde o canto da célula até a camada S2 central da parede secundária. Essa distribuição indica que a fibra individual deve ser mais elástica em suas camadas internas, o que contibui para que a fibra suporte deformações sem se romper.

Palavras-chave: Microespectroscopia; Imageamento; Espectro.

Mapping of cellulose distribution in the cell wall of *Corymbia citriodora* using confocal Raman microscopy

Abstract: Cellulose is a key chemical component of the wood fiber wall. Its total content in wood is generally known to range between 40% and 50%. However, little is known about its distribution and concentration across the various layers forming the cell wall, from the middle lamella to the S3 layer. Confocal Raman microscopy (CRM) is a technique that facilitates this understanding. Thus, the aim of this study was to map the distribution of cellulose within the fiber cell wall of 60-year-old *Corymbia citriodora* wood. Transverse histological sections were examined using CRM. Spectral analyses and the resulting chemical maps revealed that the most prominent spectral band for cellulose occurred at 380 cm^{-1}. The generated maps allowed for the visualization of various wall layers and regions, including the cell corner and the middle lamella. The distribution of cellulose within the cell wall showed an increase in concentration (laser intensity) from the cell corner toward the inner S2 layer of the secondary wall. This distribution suggests that the individual fiber is likely more elastic in its inner layers, which helps the fiber withstand deformation without rupturing.

Keywords: Microspectroscopy; Imaging; Spectrum.

1. Introdução

Para compreender o comportamento da madeira em suas formas tradicionais de uso, como absorção de umidade, resistência ao apodrecimento ou propriedades mecânicas, e para

apoiar o desenvolvimento de novas tecnologias, como química fina, nanocompósitos, biorrefinaria e bioenergia, é importante conhecer detalhadamente a estrutura e a composição da parede das fibras. Segundo Horvath et al. (2012), os obstáculos para a produção de bioetanol a partir da madeira inclui a reação lenta durante a hidrólise enzimática, o baixo rendimento de açúcares e o custo relativamente elevado da remoção de lignina. Este aspecto também compartilhado por Ma et al. (2016). É necessário, portanto, facilitar o acesso das enzimas à lignina e às hemiceluloses da parede celular e, assim, expor a celulose às enzimas hidrolíticas. A variação espacial da química e da estrutura da madeira é uma característica comum da degradação fotoinduzida (Kataoka & Kiguchi; 2001) na madeira de *Cryptomeria japonica* utilizando microespectroscopia FT-IR. Guo et al. (2017) demonstraram que a distribuição espacial de lignina e celulose na parede celular da madeira de *Ginkgo biloba* está relacionada à massa de água adsorvida na região hidrofóbica dos cantos celulares, que foi menor do que na camada S2, em diversas faixas de umidade relativa.

A madeira de *Corymbia citriodora* é conhecida pela alta densidade, baixas contrações (Assis et al. 2017), excelentes propriedades mecânicas e boa durabilidade (Delucis e Gatto 2017). Ela é adequada para uso em estruturas, pisos, mobiliário e geração de energia. No entanto, não se conhece a composição detalhada da celulose em sua parede celular.

As paredes das fibras libriformes são estruturadas por paredes primárias (PP) e secundárias (PS). A PP é uma camada rica em polissacarídeos, situada externamente à PS, que é composta pelas camadas S1, S2 e S3, sendo que a S2 desempenha um papel mais relevante nas propriedades da madeira por ser muito mais espessa do que as outras. Devido à sua maior espessura, a camada S2 contém a maior quantidade de lignina da parede celular (Fergus et al., 1969). Normalmente, quanto maior o teor de celulose em uma região, menor é o teor de lignina, o que permite algumas inerências sobre este componente.

Como parte de avanços tecnológicos recentes, a microscopia confocal Raman tem despertado a atenção de diversos pesquisadores (Roder et al., 2004; Agarwal, 2006; Gierlinger et al., 2010a,b; Gierlinger et al., 2012; Horvath et al., 2012; Ji et al., 2013; Colares et al., 2015; Lima et al., 2025; Brito, 2026.

A partir das várias investigações sobre a composição química e/ou a estrutura da parede celular, é evidente que uma análise adequada requer equipamentos apropriados, bem como o preparo mínimo da amostra, a aquisição de dados e o tratamento estatístico de dados (Gierlinger et al., 2012). Devido à sua capacidade espectral única, essa técnica fornece informações espacialmente resolvidas e específicas para cada componente em tecido biológico intacto, sem

corantes (Agarwal, 2006), de modo que é necessário apenas preparo mínimo da amostra, além da microtomia. A espectroscopia Raman é adequada devido à sua natureza não invasiva, sensibilidade a múltiplas fases e alta resolução espacial (Horvath, 2012). A fluorescência da lignina representa uma dificuldade na espectroscopia Raman da madeira, ocultando informações espectrais úteis (Fackler & Thygesen, 2013), o que tem sido reduzido com o aprimoramento do microscópio confocal Raman.

2. Material e métodos

2.1 Amostragem e preparo das amostras

Estudou-se a madeira de *Corymbia citriodora* com 60 anos de idade, proveniente de três árvores de fuste ereto. Da tora basal de cada árvore, cortou-se um disco de 5 cm de espessura para a confecção de blocos de madeira. As amostras foram imersas em água antes de serem seccionadas transversalmente (espessura de 5 µm) em um micrótomo rotativo Reichert. Antes da análise Raman, cada seção histológica foi submetida a extrações sequenciais com acetona:água (9:1), tolueno:etanol (2:1) e metanol, por 30 minutos em cada solvente (Agarwal, 2006), visando reduzir o efeito de fundo da fluorescência por meio da remoção ou redução dos extrativos das amostras. Após a extração, a amostra foi seca ao ar.

2.2 Aquisição de espectros

A amostra seca, com 5 µm de espessura, foi colocada sobre uma lâmina de vidro de 50 mm × 75 mm × 2 mm e recebeu uma gota de óxido de deutério (D_2O) antes de ser coberta por uma lamínula de quartzo de 20 × 20 mm. O D_2O e a lamínula foram utilizados para reduzir o efeito de fluorescência, que poderia ser intensificado tanto pela água quanto por uma lamínula de vidro comum (Gierlinger, 2010). As bordas da lamínula foram vedadas com esmalte (base) para evitar a secagem e o deslocamento da amostra durante a medição.

O microscópio confocal Raman Senterra II da Bruker, equipado com um microscópio Olympus BX53M, foi utilizado. A observação inicial do corte histológico para localizar uma fibra representativa foi realizada com uma objetiva de 20×. Em seguida, uma gota de óleo de imersão foi aplicada sobre a lamínula; a objetiva foi alterada para a de 100×. Definiu-se uma área de imagem de 20 µm × 20 µm, capaz de enquadrar uma secção da fibra. O foco foi ajustado em fibras de maior largura para evitar a amostragem de pontas das fibras, onde a largura é reduzida (Gardiner et al., 2014). Antes de iniciar a medição, foi capturada a imagem de campo claro da secção da fibra individualizada.

Os parâmetros de medição foram: objetiva Raman 100× (NA 1,3), laser de 785 nm, potência de laser de 25 mW, abertura de 50 × 1000 µm (tipo RA), resolução de 4 cm^{-1}, faixa

espectral de 50–3610 cm^{-1} e tempo de integração de 400 ms. Utilizou-se um passo de 60 × 60 linhas/pixels, resultando em 3600 pixels e espectros (Agarwal 2006) por imagem de 400 μm^2. Isso corresponde a passos de 0,33 µm para a formação da imagem. Foram realizadas leituras de duas fibras por corte histológico, com duração de cerca de 215 minutos cada.

2.3 Análise dos dados

O software Opus 7.8 foi utilizado para obter espectros Raman, as imagens em faixas espectrais específicas (50–3610 cm^{-1}) e para realizar todas as operações do espectrômetro, processar os dados coletados e gerar imagens Raman. Conforme realizado por Ji et al. (2013), os espectros foram submetidos à correção de linha de base do tipo *rubberband* utilizando o algoritmo de Savitzky-Golay para análise espectroscópica. Os espectros foram suavizados com uma janela de 25 pontos. Para mapear a celulose, a banda em 380 cm^{-1}, associada a carboidratos e atribuída a modos de deformação angular (flexão) do anel CCC, foi escolhida devido à sua proeminência. A integração foi realizada entre 350 cm^{-1} e 410 cm^{-1}.

Para uma análise mais detalhada da concentração de celulose dentro da parede celular, a partir das imagens químicas, as áreas de integração correspondentes ao canto celular (CC), lamela média composta +S1 (LMC+S1), camada S2 externa (S2ext), camada S2 intermediária (S2int) e camada S2 central (S2cen) foram demarcadas com quadrados de 1 μm^2 para a determinação de seus espectros médios.

3. Resultados e discussão

A intensidade das bandas na espectroscopia Raman é diretamente proporcional à concentração dos components presentes na amostra, como a celulose ou a lignina, e medições quantitativas podem ser realizadas (Agarwal 2006).

A Figura 1 apresenta uma imagem de campo claro sem grande nitidez, o que é comum para esse tipo de amostra com ampliação de 400× e uso de óleo de imersão. Na Figura 2 encontram-se os 3600 espectros Raman, relativos aos 3600 pixels da imagem de 20 µm × 20 µm, nos quais é possível verificar o perfil característico do espectro da madeira. A Figura 3 exibe a curva espectral média dos 3600 espectros da Figura 2, onde são proeminentes várias bandas de ligações químicas, previamente publicadas. Para a celulose foi possível identificar a banda de 380 cm^{-1} (Figura 3) que segundo Agarwal (2019) é associada à sua cristalinidade. Essa região recebe contribuição exclusiva da celulose, diferentemente das bandas 1009 cm^{-1} e 2900 cm^{-1} que, embora bem definidas, apresentam contribuições da lignina e/ou de outras hemiceluloses (Agarwal, 2006). Brito (2026) também reconheceu a banda de 380 cm^{-1} como a mais proeminente do espectro para indicar a presença de celulose na parede celular da madeira de

clone de *Eucalyptus* de sete anos de idade. Também está destacado na curva espectral (Figura 3) a banda de 1600 cm^{-1}, referente à lignina (Agarwal & Ralph, 1997)

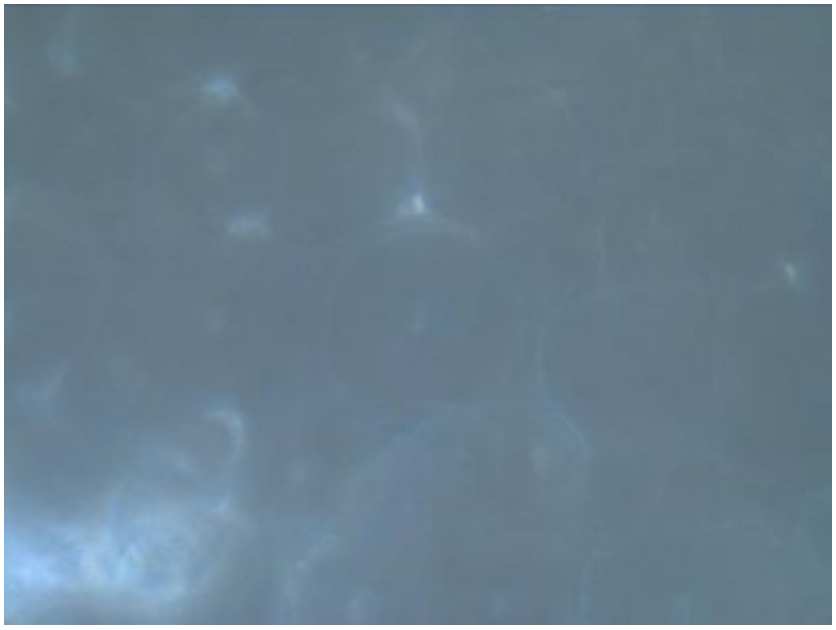


Figura 1 – Imagem em campo claro de uma secção transversal da madeira de *Corymbia citriodora*, evidenciando no círculo pontilhado a fibra selecionada para ser escaneada.

A Figura 4 apresenta o mapa químico de 20 µm × 20 µm, exibindo cores da escala arco-íris nas várias regiões da PC. O exame do mapa permitiu identificar o CC, a lamela média, a camada S2 e a região do lúmen, sem especificar as intensidades de cada componente, como a celulose. Em alguns mapas foi possível identificar a camada S3. Cada pixel, de acordo com a configuração, correspondeu a uma área de 0,111 μm^2. A barra lateral da Figura 4 indica a intensidade Raman relativa a essa amostra, variando de -1,23 × 10^6 a –2,12 × 10^5. Observa-se que os componentes da parede celular não estão distribuídos de forma uniforme nas diferentes camadas da parede celular (Roder et al., 2004; Ji et al., 2013).

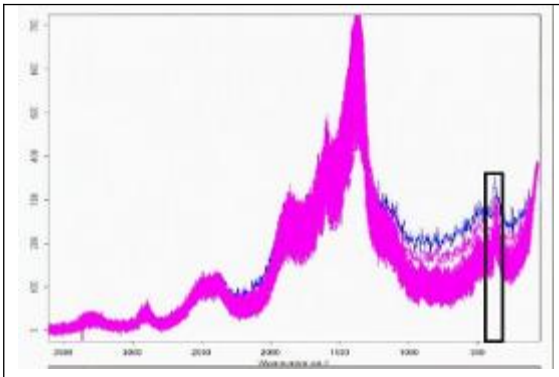


Figura 2 – Agrupamento de 3600 espectros obtidos do mapeamento da

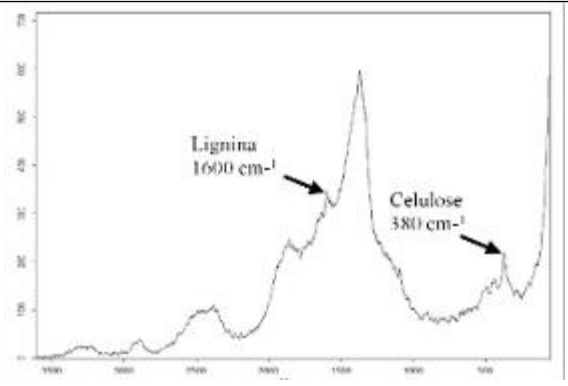


Figura 3 – Espectro médio de 3600 espectros obtidos do mapeamento da

madeira de *Corymbia citriodora*	madeira de *Corymbia citriodora*

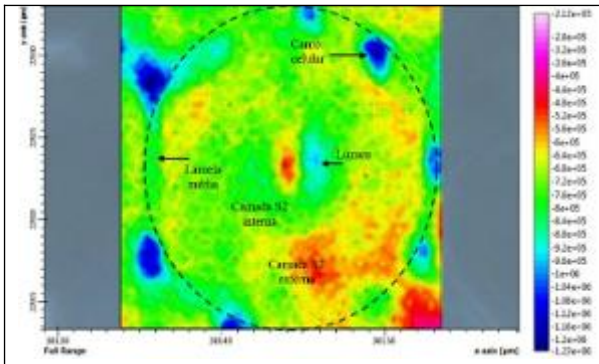


Figura 4 – Mapeamento químico geral de uma seção transversal de 20 µm × 20 µm do alburno de *Corymbia citriodora*, obtido por microscopia confocal Raman

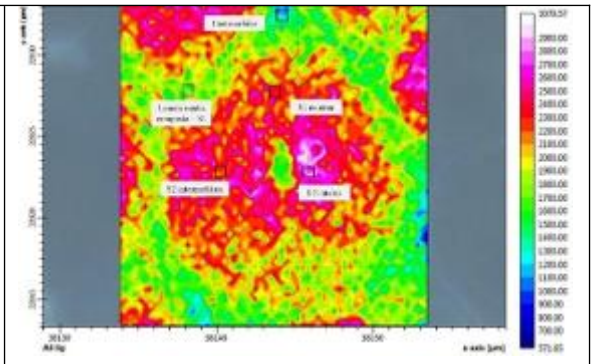


Figura 5 – Mapeamento Raman da distribuição de celulose na parede celular do alburno de *Corymbia citriodora*, obtido na faixa espectral entre 350–410 cm^{-1} *

* Os pequenos quadrados representam áreas de 1 μm^2 posicionados nas diferentes camadas para a determinação de seus espectros médios]

A Figura 5 apresenta o mapa da distribuição de celulose na parede da fibra de *Corymbia citriodora*, resultante da integração da faixa entre 350 cm^{-1} e 410 cm^{-1}, do espectro, conforme área retangular demarcada na Figura 2. A imagem corresponde à mesma célula do alburno apresentada no mapa geral (Figura 4).

As cores dos mapas (Figura 5) representam diferentes concentrações de celulose, indicadas, quantitativamente, na barra lateral, com intensidades laser variando de 571.65 a 3079.57. As cores que tendem para o limite superior da barra (cor branca = 3079.57) correspondem a regiões da fibra com maiores teores de celulose, enquanto aquelas que tendem ao limite inferior (cor azul = 571,65) correspondem a baixos teores de celulose. Assim, regiões do CC, da LMC + S1 e do lúmen são pobres em celulose, enquanto as regiões amareladas, alaranjadas, avermelhadas, róseas e brancas indicam, nessa ordem, concentrações crescentes. É perceptível que a intensidade laser tende a aumentar em direção ao lúmen das fibras. Esses resultados são semelhantes aos encontrados por Roder et al. (2004) ao investigarem a distribuição topoquímica de celulose na parede celular de alburno da madeira de *Fagus sylvatica* utilizando MCR. Diferenças observadas nas intensidades resultaram da falta de planicidade das superfícies das seções com 10 µm de espessura. Estudando a distribuição de celulose em paredes celulares de *Picea mariana*, Agarwal (2006) constatou que a distribuição de celulose apresentou baixa concentração nos cantos celulares e na lamela média composta, e alta concentração na região S2.

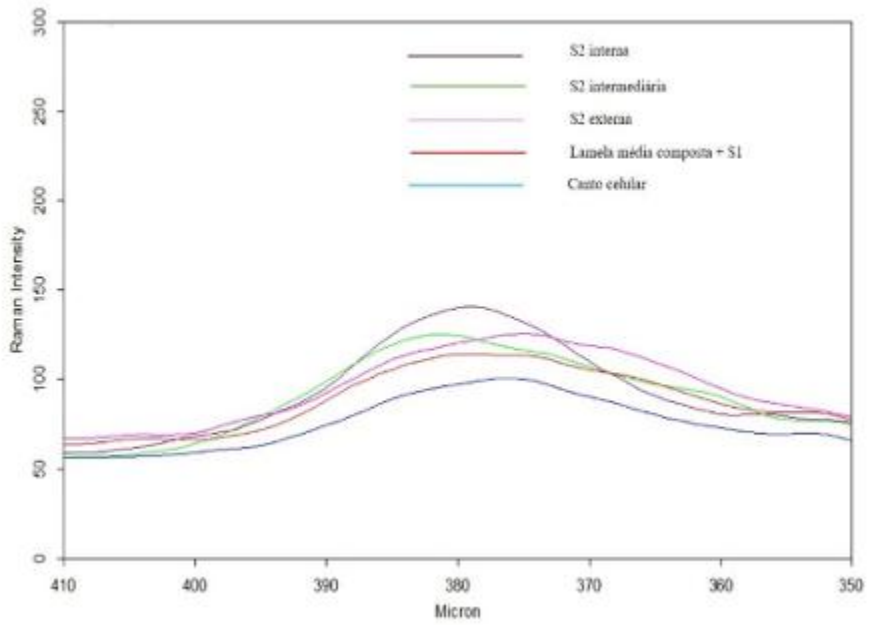


Figura 6 – Espectros Raman médios das camadas CC, LMC+S1, S2 ext, S2inter e S2cen das paredes da fibra do cerne externo de *Corymbia citriodora* com correção da linha de base; ampliação dos espectros médios com correção da linha de base, integrada na faixa de 350 a 410 cm^{-1} para a celulose

Ao delimitar áreas distintas nas imagens químicas com quadrados de 1 μm^2 conforme exemplificado na Figura 5, extraíram-se os espectros médios da celulose (Figura 6) da parede da fibra. As concentrações de celulose seguiram a ordem decrescente: camada S2cen > S2int > S2ex > LMC+S1 > CC. A maior concentração nas regiões internas deve contribuir para a sua maior elasticidade, o que confere à fibra, tanto na árvore em desenvolvimento, quanto em processos industriais, a capacidade de se deformar sob tensões, sem que ocorra rupturas. Para a produção de bioetaanol por processo enzimático, conforme descrito por Horvath et al. (2012), é possível supor que a celulose estaria mais exposta às enzimas hidrolíticas em sua região central, mais voltada para o lumen.

Para qualquer região morfológica, a intensidade da banda mostrou-se específica da localização, podendo ser comparada à concentração de celulose em uma região. Adicionalmente, foi possível calcular as razões entre pares de intensidades máximas de laser (Figura 6). De acordo com Ji et al. (2013), a razão entre uma banda e outra do espectro, que representam camadas diferentes da parede, é mais útil do que a intensidade em si. Assim, verificou-se que a razão entre a concentração de celulose da camada S2cen e do CC diminui cerca de 40%. Outras razões entre pares de camadas podem ser determinadas, assim como entre outras posições de amostragem no tronco da *C. citriodora*.

4. Conclusões

O mapeamento químico da parede das fibras de *Corymbia citriodora*, por meio da microscopia confocal Raman (MCR) permitiu concluir que a banda espectral mais evidente para a celulose ocorreu em 380 cm^{-1}. Os mapas permitiram visualizar diversas camadas e regiões da parede, incluindo o canto celular e a lamela média. A distribuição da celulose na parede revelou um aumento na concentração (intensidade do laser) desde o canto da célula até a camada central S2 da parede secundária. Essa distribuição indica que a fibra individual deve ser mais elástica em suas camadas internas, o que contibui para que a fibra suporte deformações sem se romper. A execução deste estudo revelou que a MCR se ajusta às demandas mais exigentes e aprofundadas do conhecimento da madeira em suas particularidades, com grandes possibilidades de aplicação.

1218. Agradecimentos

Agradecemos à Université Laval e ao CNPq e à Capes e pelo apoio concedido por meio dos processos nº314405/2021-6 e 88881.120713/2016-0188881.120713/2016-01.

1219. Referências bibliográficas

Agarwal, U.P. (1999). An overview of Raman spectroscopy as applied to lignocellulosic materials. In: Advances in Lignocellulosics Characterization (ed. Argyropoulos, D.S.) 209–225 (TAPPI, 1999).

Agarwal, U.P. (2019). Analysis of cellulose and lignocellulose materials by Raman spectroscopy: a review of the current status. *Molecules* 2019, *24*, 1659. DOI:10.3390/molecules24091659

Agarwal U.P. & Ralph S.A. (1997). FT-Raman Spectroscopy of Wood: Identifying Contributions of Lignin and Carbohydrate Polymers in the Spectrum of Black Spruce (*Picea mariana*). Appl. Spectrosc. 51, 1648-1655. DOI: 10.1366/0003702971939316

Agarwal, U.P. (2006). Raman imaging to investigate ultrastructure and composition of plant cell walls: distribution of lignin and cellulose in black spruce wood (*Picea mariana*). Planta, 224:1141-1153. 10.1007/s00425-006-0295-z

Assis C.O.; Goulart, S.L.; Lima, J.T.; Assis, M.R.; Silva, T.A. & Assis, J.A. (2017). Avaliação das caracteristicas químicas, físicas e energeticas da madeira de Eucalipto. In: III Congresso Brasileiro de Ciência e Tecnologia da Madeira - III CBCTEM, 2017, Florianópolis - SC.

Brito, D. Y. O. (2026). Qualidade dos lenhos normal e de reação de *Eucalyptus urophylla* × *Eucalyptus grandis* por meio de técnicas microscópicas e espectroscópica. Tese (Doutorado em Ciências e Tecnologia da Madeira). Universidade Federal de Lavras. Lavras.

Colares, C. J.; Pastore, T.; Coradin, V. T.; Camargos, J. A.; Moreira, A. C.; Rubim, J. C. & Braga, J. W. (2015). Exploratory analysis of the distribution of lignin and cellulose in wood by Raman imaging and Chemometry. Revista da Sociedade Brasileira de Química, v. 26, p. 1297-1305, 2015. DOI:10.5935/0103-5053.20150096

Delucis, R.A., & Gatto, D.A. (2017). Flexural properties of four fast-growing eucalypts woods deteriorated by three different field tests. Acta Scientiarum. Maringá, v. 39, n. 1, p. 39-44. DOI:10.4025/actascitechnol.v39i1.27067

Fackler, K., & Thygesen, L.G. (2013). Microspectroscopy as applied to the study of wood molecular structure. Wood Sci Technol, 47: 203-222. DOI:10.1007/s00226-012

Fergus, B.J.; Procter, A.R.; Scott, J.A.N. & Goring, D.A.I. (1969). The distribution of lignin in spruce wood determined by ultraviolet microscopy. Wood Sci Technol, (3)117-138.

Gardiner, B.; Barnett, J.; Saranpaa, P. & Gril, J. (Ed). (2014). The biology of reaction wood. Springer. Springer Series in Wood Science, Heidelberg. 281 p.

Gierlinger, N.; keplinger, T. & Harrington, M. (2012). Imaging of plant cell walls by confocal Raman microscopy. Nature Protocols Vol. 7, No. 9, pp. 1694-1708. DOI:10.1038/nprot.2012.092

Gierlinger, N.; Luss, S.; Konig, C.; Konnerth, J.; Eder, M. & Fratzl, P. (2010). Cellulose microfibril orientation of *Picea abies* and its variability at the micron-level determined by Raman imaging. Journal of Experimental Botany, Vol. 61, No. 2, pp. 587–595. DOI:10.1093/jxb/erp325

Guo, X.; Wu, Y. & Yan, N. (2017). Characterizing spatial distribution of the adsorbed water in wood cell wall of Ginkgo biloba L. by μ-FTIR and confocal Raman spectroscopy. Holzforschung 2017; 71(5): 415–423. DOI:10.1515/hf-2016-0145

Horvath, L.; Peszlen, I.; Gierlinger, N.; Peralta, P. & Kelley, S. (2012). Distribution of wood polymers within the cell wall of transgenic aspen imaged by Raman microscopy. Holzforschung, Vol. 66, pp. 717–725. DOI:10.1515/hf-2011-0126

Ji, Z.; Ma, J.M.; Zhang, Z.H.; Xu, F. & Sum, R.C. (2013). Distribution of lignin and cellulose in compression wood tracheids of Pinus yunnanensis determined by fluorescence microscopy and confocal Raman microscopy. Industrial Crops and Products, 47: 212-217. 10.1016/j.indcrop.2013.03.006

Kataoka, Y. & Kiguchi, M. (2001). Depth profiling of photo-induced degradation in wood by FT-IR microspectroscopy. J Wood Sci 47:325–327. DOI:10.1007/BF00766722

Lima, J. T., Hernandez, R.; Ugulino, B. (2025). Mapping of lignin distribution in the wood fiber wall of *Corymbia citriodora* by confocal Raman microscopy. Lavras, 2025. 20p. [Artigo submetido para Green Chemistry].

Ma, J.F.; Yang, H.Y.; Kun, W. & Liu, X.E. (2016). Structural modification of hemicelluloses and lignin based on the biorefinery process with white-rot fungal. Carbohydrate Polymers 153:7–13. DOI:10.1016/j.carbpol.2016.08.016

Roder, T.; Koch, G. & Sixta, H. (2004). Application of confocal Raman spectroscopy for the topochemical distribution of lignin and cellulose in plant cell walls of beech wood (*Fagus sylvatica* L.) compared to UV microspectrophotometry. Holzforschung, Vol. 58, pp. 480–482. DOI: DOI:10.1515/HF.2004.072

Zhang, M.; Lapierre, C.; Nouxman, N.L.; Nieuwoudt, M.K.; Smith, B.G.; Chavan, R.R.; McArdle, B.H. & Harris, P.J. (2017). Location and characterization of lignin in tracheid cell walls of radiata pine (*Pinus radiata* D. Don) compression woods. Plant Physiology and Biochemistry, 118:187-198. DOI:10.1139/b98-184

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Materiais de origem renovável para reforço de papéis para embalagem: comparação entre tanino *in natura* e celulose microfibrilada

Priscila Moreira da Silva Xavier[1], Iara Fontes Demuner[1], Ana Márcia M. Ladeira Carvalho[1], Marcelo Moreira da Costa[1], Jamille Carvalho de Souza[1], Rodrigo Fraga de Almeida[1], Mathias Teixeira Marçal[1]

[1] Universidade Federal de Viçosa.

Resumo: A aplicação de aditivos químicos destaca-se como alternativa para melhoria das propriedades físico-mecânicas de papéis de embalagens, atuando na modificação das interações interfibras e na estrutura da rede fibrosa, o que promove o fortalecimento dessas interações e melhorias significativas nas propriedades do papel. Este trabalho avaliou o efeito do tanino *in natura* e da celulose microfibrilada (CMF) na resistência ao esmagamento do anel (RCT) em papéis para embalagem. Os aditivos foram incorporados à suspensão fibrosa nas dosagens de 3, 6 e 9 kg/t e comparadas ao controle (sem adição de polímeros). Os resultados demonstraram melhoria do RCT nas amostras aditivadas em relação ao controle (0,9 kN/m), com valores de 1,1 kN/m para o tanino e 1,05 kN/m para a CMF, correspondendo a incrementos de 15,8% e 13%, respectivamente, nas duas dosagens estudadas. Conclui-se que o tanino apresentou desempenho superior à CMF, evidenciando seu potencial como aditivo sustentável para o aprimoramento de papéis destinados à embalagem.

Palavras-chave: Biopolímeros; Aditivos; Ensaio físico-mecânico.

Renewable-source materials for reinforcing packaging papers: a comparison between native tannin and microfibrillated cellulose

Abstract: The application of chemical additives stands out as an alternative for improving the physical-mechanical properties of packaging papers, acting on the modification of interfiber interactions and the structure of the fibrous network, which promotes the strengthening of these interactions and significant improvements in paper properties. This study evaluated the effect of in natura tannin and microfibrillated cellulose (MFC) on the ring crush test (RCT) resistance in packaging papers. The additives were incorporated into the fibrous suspension at dosages of 3, 6, and 9 kg/t and compared to the control (without polymer addition). The results showed an improvement in RCT for the additivated samples relative to the control (0.9 kN/m), with values of 1.1 kN/m for tannin and 1.05 kN/m for MFC, corresponding to increments of 15.8% and 13%, respectively, across the dosages studied. It is concluded that tannin exhibited superior performance compared to MFC, demonstrating its potential as a sustainable additive for enhancing papers intended for packaging.

Keywords: Biopolymers; Additives; Physical-mechanical testing.

1. Introdução

Os papéis destinados a embalagens mantiveram posição de destaque na produção brasileira em 2024, representando 56,8% do volume total, o equivalente a aproximadamente 6,4 milhões de toneladas (Ibá, 2025). Esse protagonismo é impulsionado pela expansão do comércio online, pelas mudanças nos hábitos de consumo consolidadas no período pós-pandemia de COVID-19 e pelo aumento da demanda por alimentos mediada por serviços de delivery.

Diante do aumento das preocupações ambientais as embalagens à base de papel têm se destacado como uma solução promissora, alinhada aos princípios da economia circular e às estratégias voltadas à sustentabilidade no setor de embalagens (Adak *et al*., 2025; Morgado *et al*., 2025). Com isso, vem-se consolidando alternativas estratégicas no setor, impulsionadas por sua origem renovável, elevada reciclabilidade e adequada biodegradabilidade (Rastogi & Samyn, 2015).

Dentro do setor de embalagens destacam-se papéis *kraftliner*, gerados a partir de polpa celulósica kraft não branqueada (Demuner, 2017). Em geral os papéis *kraftliner* são constituídos a partir de polpas celulósicas kraft não branqueadas compostas por fibras virgens de elevado número kappa (80 a 100) e gramatura em torno de 100 a 400 g/m², utilizados para fabricação de embalagens rígidas (Brännvall & Göran, 2009; Frinhani & Daltoé, 2012).

Além dos aspectos positivos relatados, as embalagens feitas a partir do papel, apresentam propriedades mecânicas satisfatórias, que podem ser aprimoradas por meio de modificações na estrutura fibrosa e da incorporação de aditivos, ampliando seu potencial de aplicação em diferentes segmentos de embalagens (Lavoine *et al.*, 2014).

A nanotecnologia tem desempenhado papel relevante na otimização de processos industriais. Uma alternativa atrativa é a aplicação de aditivos químicos para melhorar as propriedades físico-mecânicas do papel. Os mais usuais na literatura são celulose nanofibrilada (CNF) e microfibrilada (CMF), que possuem boas propriedades mecânicas e ópticas e atuam como agentes de ligação para elevar as propriedades físicas do papel (Strand *et al.*, 2017).

As celuloses em escala nanométrica encontram-se organizadas no interior das macrofibrilas incluindo porções cristalinas e amorfas, sendo mantidas coesas por componentes da parede celular, como lignina, hemiceluloses e pectinas (Barros, 2020). Devido às suas propriedades químicas, mecânicas e ópticas superiores, as nanoceluloses têm sido amplamente exploradas em diferentes áreas, incluindo a indústria papeleira, ciência dos materiais e

engenharia biomédica, destacando-se por seu potencial em aplicações de alto valor agregado (Ankerfors *et al.,* 2014; Phanthong *et al.,* 2018).

Além da celulose microfibrilada, diversos bioprodutos têm sido investigados quanto ao seu potencial de aplicação industrial, destacando-se o tanino como uma alternativa promissora para uso como aditivo em papéis de embalagem, embora ainda haja limitações quanto à quantidade de estudos disponíveis na literatura.

Os taninos vegetais consistem em compostos fenólicos de alto peso molecular, solúveis em água, classificados em duas categorias principais: taninos hidrolisáveis e condensados (Bate-Smith, 1962). Em função de suas propriedades químicas e estruturais, os taninos têm sido empregados em diferentes setores, como na produção de adesivos, plásticos, fármacos, agentes floculantes, curtimento de couro e revestimentos anticorrosivos (Silva, 1999), além de apresentarem crescente interesse em aplicações nos setores de construção, madeira e papel (Guo *et al.,* 2019).

Ao contrário da celulose microfibrilada (CMF), que geralmente requer a utilização de agentes aglutinantes para promover melhor aderência às fibras, o tanino apresenta potencial de interação direta com a matriz celulósica, podendo simplificar o processo e reduzir a necessidade de insumos adicionais. Outra questão em estudo é a substituição de compostos onerosos a partir de nanoceluloses (em torno de R$ 6,99/Kg - CMF) (Cellulose Lab, 2022) por a aditivos de menor custo de mercado como, por exemplo, o tanino que tem um custo de R$ 1,57/Kg (Zolett & Jabur, 2012).

Diante disso, a procura por novos produtos que maximizem as propriedades de resistência do papel, com viabilidade econômica e sustentabilidade, tem se tornado cada vez mais recorrente, e desta forma, o tanino aparece como uma alternativa em potencial para melhorar as propriedades de polpas de celulose (Missio et *al.,* 2018). Sendo assim, o objetivo do presente trabalho é avaliar o efeito da aplicação de tanino como aditivo no incremento da resistência ao esmagamento do anel (RCT) em papéis para embalagem, visando verificar seu potencial como alternativa sustentável para o aprimoramento do desempenho mecânico do material, quando comparado a outro aditivo de alto custo (CMF), já usados comercialmente.

2. Material e métodos

Foi utilizada uma amostra de polpa industrial de mix de fibra longa e curta fornecida por uma empresa do setor de embalagem de celulose e papel. Foram utilizados celulose microfibrilada (CMF) e tanino aniônico (TA) como aditivos. Como os biopolímeros estudados

são aniônicos, foram utilizados reagentes de retenção coagulantes sendo o Polydadmac (PDAC 1250) e hexametilenotetramina (HMTA), para a CMF e TA, respectivamente.

a. Caracterização da polpa industrial de alto kappa

A polpa industrial foi caracterizada quanto ao número kappa, alvura, grau Schopper-Riegler (°SR), viscosidade intrínseca e índice de retenção de água. As análises foram realizadas em duplicada de acordo com os métodos apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 – Procedimentos analíticos utilizados para análises da polpa

Parâmetros	Procedimentos
Número Kappa	TAPPI T236 cm-85
Alvura	TAPPI T542 om-08
SRº	ISO 5267-1: 1999
Viscosidade intrínseca	SCAN-CM 15:99
IRA	TAPPI UM 256

b. Aditivação dos biopolímeros e agitação

Antes da incorporação dos biopolímeros, a polpa foi hidratada por 24 horas. A adição dos biopolímeros na polpa de alto kappa para produção do papel *kraftliner*, foi realizada na mistura do papel por meio de três níveis de dosagem: 0, 3, 6 e 9 Kg/t de polpa. Dessa forma, foi possível identificar a carga que apresentou os melhores resultados nos testes físico-mecânicos. Para melhor otimização do processo foi adicionado uma carga de 1 Kg/tas do coagulante catiônico polydadmac para a CMF, e a mesma carga de hexametilenotetramina para o tanino aniônico.

Adicionou-se a carga de CMF à polpa marrom de alto kappa e, em seguida, o coagulante catiônico polydadmac diluído em água destilada a 3,5% de consistência. O biopolímero aniônico deve ser adicionado antes do catiônico para evitar o cisalhamento do sistema (Gao *et al.*, 2016; Read, 1983). A polpa foi agitada em misturador de bancada a 30.000 revoluções por 5 minutos e levada a banho-maria a 50 ºC por 60 minutos em saco de polietileno. Depois, foi homogeneizada com ajuste de consistência para produção de folhinhas de papel e análise do grau Schopper-Riegler. A incorporação do tanino aniônico seguiu o mesmo procedimento da CMF, porém o agente coagulante foi a hexametilenotetramina. Esse composto é utilizado como agente de reticulação em estudos com lignossulfonatos (Santos e Curvelo, 1999) e na produção de adesivos a base de tanino (Silva, 2009). Diante do conhecimento da sua aplicabilidade na formação de pontes e redes com o tanino, o HMTA foi aplicado nesse trabalho a fim de proporcionar melhor incorporação do tanino in natura (aniônico) na matriz da fibra do papel.

c. Análise físico-mecânica

A confecção das folhas laboratoriais seguiu à metodologia estabelecida pela TAPPI 205 om-81 e foi realizada em uma formadora de folhas do Laboratório de Celulose e Papel. Foram produzidas 20 folhas com gramatura de 120g/m² que foram acomodadas em uma sala climatizada com temperatura de 23±1ºC e umidade relativa do ar de 50±2% de acordo com a norma, como o tempo de secagem e aclimatação de no mínimo 24 horas cada.

Os procedimentos analíticos para execução do testes físico-mecânicos nas folhas produzidas estão apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 – Procedimentos analíticos utilizados para os testes físico-mecânicos

Parâmetros	Procedimentos
Espessura	TAPPI T 551 om-06
Gramatura	TAPPI T 410 om-08
Resistência ao esmagamento do anel (RCT)	APPI 494 om-06

3. Resultados e discussão

a. Caracterização da polpa industrial de alto kappa

Os resultados da caracterização da polpa celulósica utilizada estão apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 – Caracterização da polpa celulósica kraft

Parâmetros	Procedimentos
Número kappa	95,3
Alvura, % ISO	16,5
SRº	18
Viscosidade intrínseca, dm³/kg	1191
IRA (%)	238

O número kappa está associado ao teor de lignina residual presente na polpa, incluindo também contribuições de outros compostos, como ácidos hexenurônicos e grupos carbonílicos. De modo geral, polpas destinadas à produção de papéis de embalagem do tipo *kraftliner* apresentam elevado rendimento no processo de polpação, sendo caracterizadas por valores de número kappa na faixa de 80 a 110 (Brännvall & Göran, 2009). O valor obtido para a polpa celulósica nesse estudo (95,3) encontra-se dentro desse intervalo, estando em conformidade com dados reportados na literatura e evidenciando o potencial dessas fibras para aplicação no segmento de embalagens, especialmente na produção de papel *kraftliner*.

A alvura está relacionada a fatores como opacidade, coeficiente de dispersão de luz e teor de lignina na polpa, sendo este último determinante devido à presença de compostos cromóforos que conferem coloração escura ao material (Demuner, 2014; Potulski, 2012). Polpas com maior teor de lignina, típicas de alto número kappa, apresentam menores valores de alvura (Iwasaki *et al.*, 2014). Assim, o valor de 16,5 %ISO obtido para a amostra está de acordo com o esperado para esse tipo de polpa.

O grau Schopper-Riegler (ºSR) indica a resistência à drenagem da polpa, sendo um parâmetro importante no controle da formação da folha e do consumo energético do processo (Figueiredo, 2019). Neste estudo, a polpa marrom de alto kappa foi refinada até 18ºSR, valor associado à menor hidratação das fibras devido ao elevado teor de lignina, o que reduz sua interação com a água (Frinhani & Daltoé, 2012; Rosa, 2003). Esse nível de refino também é comumente adotado na produção de papéis para embalagem, conforme reportado por (Demuner, 2017).

A viscosidade intrínseca é um importante indicador da qualidade das fibras celulósicas, estando diretamente relacionada às propriedades físico-mecânicas do papel (Faria, 2016). Esse parâmetro reflete o grau de polimerização da celulose, de modo que a redução do tamanho das cadeias poliméricas resulta em menor viscosidade e, consequentemente, menor resistência do papel (Scott *et al.*, 1995). O valor obtido (1191 dm^3/kg) indica uma polpa de alto kappa, caracterizada por maior preservação dos carboidratos e menor demanda de reagentes no processo de polpação (Hart *et al.*, 2011). Em aplicações voltadas a papéis de embalagem, o uso de polpas de alto kappa é vantajoso por dispensar altos níveis de alvura, além de contribuir para maior resistência e redução de custos de produção, e facilitar a recuperação de reagentes (Mccubbin, 1997).

O índice de retenção de água (IRA) é um parâmetro que reflete os efeitos iniciais do refino sobre o inchamento das fibras, a cristalinidade, a intensidade de ligação interfibrilar e a área superficial disponível dos carboidratos (Cardoso, 2015; Hubbe & Heitmann, 2007; Turbak *et al.*, 1983). No presente estudo, a polpa industrial apresentou IRA de 238%, valor superior aos reportados na literatura para polpas não branqueadas de eucalipto (205%) e pinus (165%), conforme (Demuner, 2017).

b. Testes físico-mecânicos

A resistência ao esmagamento do anel (RCT) é determinada pela força necessária para comprimir uma amostra de papel em formato de fita, posicionada em um suporte circular

adequado à sua espessura. Assim como a resistência ao rasgo, o RCT está diretamente relacionado ao número de ligações interfibrilares presentes na estrutura do papel, bem como à resistência da parede celular das fibras (Castanho; Oliveira, 2000).

Os valores obtidos de RCT para os biopolímeros e os percentuais de ganhos estão apresentados nas Figuras 1 e 2, respectivamente.

Figura 1 – Resultados de resistência ao esmagamento do anel de acordo com os biopolímeros

O tratamento com biopolímeros elevou esta característica de 0,90 KN/m para 1,1 KN/m com uso do tanino e 1,05 KN/m com uso da CMF. Mesmo com desempenhos equivalentes, esse resultado é particularmente relevante, uma vez que a CMF é amplamente reconhecida como um aditivo de alta eficiência na indústria de papel para incremento de propriedades mecânicas. No trabalho de pesquisa realizado por Silva (2015) ao estudar diferentes aditivos, constatou que o máximo valor alcançado em RCT foi de 1,88 KN/m com uso de 5% de CMF (50 kg/t) em polpa não branqueada de pinus.

Nesse contexto, o tanino se destaca como uma alternativa promissora, pois, mesmo apresentando desempenho similar, possui vantagens adicionais, como menor custo, maior disponibilidade e potencial de aplicação mais simplificada, podendo reduzir a necessidade de insumos auxiliares.

A porcentagem de ganho em RCT para ambos os biopolímeros, estão apresentadas na Figura 2.

Figura 2 – Ganhos em porcentagens em resistência ao esmagamento do anel de acordo com os biopolímeros

O tanino aniônico proporcionou um aumento de 15,8%, enquanto a celulose microfibrilada (CMF) apresentou ganho de 13,0% em relação ao controle. Esse resultado indica que o tanino é eficaz no desenvolvimento da resistência do papel *kraftliner*, assim como a CMF. Além do mais, ele destaca-se não apenas pelo desempenho superior, mas também por seu menor custo de mercado, o que reforça seu potencial como alternativa economicamente mais viável.

4. Conclusões

O tanino *in natura* destacou-se como uma alternativa competitiva à celulose microfibrilada como aditivo de papéis de embalagens, alcançando resultados equivalentes no índice de resistência ao esmagamento do anel (RCT). Dessa forma, sua aplicação como aditivo representa uma opção eficiente e economicamente mais vantajosa para o setor de embalagens.

5. Agradecimentos

A Universidade Federal de Viçosa, ao Departamento de Engenharia Florestal e ao Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal pela oportunidade de cursar o mestrado. O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

6. Referências bibliográficas

Adak, B., Baidya, S., & Teramoto, Y. (2025). Biopolymers and their nanocomposites coated paper-based high barrier and sustainable food packaging materials. *Carbohydrate Polymers*, *367*, 123966. https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2025.123966

Ankerfors, M., Lindström, T., & Söderberg, D. (2014). The use of microfibrillated cellulose in fine paper manufacturing - Results from a pilot scale papermaking trial. *Nordic Pulp and Paper Research Journal*, *29*(3), 476–483. https://doi.org/10.3183/npprj-2014-29-03-p476-483/xml

Barros, S. S. (2020). Síntese e caracterização de nanocelulose a partir da folha de abacaxi (*Ananás comosus (L) merril*) c.v. vitória. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais). Universidade Federal do Amazonas, Manaus.

Bate-Smith, E. C. (1962). The phenolic constituents of plants and their taxonomic significance. I. Dicotyledons. *Journal of the Linnean Society of London, Botany*, *58*(371), 95–173. https://doi.org/10.1111/j.1095-8339.1962.tb00890.x;page:string:article/chapter

Brännvall & Göran. (2009). Pulping chemistry and technology. *Pulping Chemistry and Technology*, 1–471. https://doi.org/10.1515/9783110213423

Cardoso, G. D. S. (2015) Modificação das fibras recicladas de papelão ondulado por tratamento enzimático. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal do Paraná.

Castanho, C. G., & Oliveira, R. C. (2000). Estudos de aproveitamento de rejeito fibroso industrial da polpação kraft de eucalipto na produção de papeis reciclados. In *Congresso Internacional de celulose e papel* (Vol. 23).

Cellulose Lab. (2022). *CNF (NFC, MFC): Nanofibrilas de Celulose (Celulose Nanofibrilada, Celulose Microfibrilada) – Cellulose Lab | Fornecedor líder de nanocelulose, nanocristais de celulose (CNC/NCC), nanofibrilas de celulose (CNF) e celulose bacteriana (BC)*. https://www.celluloselab.com/our-products/nfc-cnf-nano-fibrillated-cellulose/

Demuner, I.F. (2014). Influência da sequência de branqueamento na reversão de alvura de polpa kraft de eucalipto. Monografia (Engenharia Florestal – Centro de Ciências Agrárias) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa.

Demuner, I.F. (2017). Produção e caracterização de lignocelulose nanofibrilada (LCNF) e celulose nanofibrilada (CNF) e aplicação de LCNF. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa.

Faria, B. F. H. (2016). Produção e avaliação tecnológica da polpa celulósica e papéis obtidos de misturas das madeiras de *Eucalyptus sp. e Pinus sp*. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa.

Figueiredo, J. C. (2019). Influência da qualidade da madeira de eucalipto e dos processos de polpação kraft convencional e *compact cooking* na performance da linha de fibras e propriedades da polpa celulósica. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Departamento de Engenharia Florestal, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa.

Frinhani, E. M. D., & Daltoé, R. (2012). Comparação das propriedades físico-mecânicas de polpas celulósicas Kappa 45 e Kappa 100 destinada à fabricação de papéis para embalagens rígidas. *Unoesc & Ciência: Acet*, *3*(1), 65-74.

Gao, Y., Li, Q., Shi, Y., & Cha, R. (2016). Preparation and Application of Cationic Modified Cellulose Fibrils as a Papermaking Additive. *International Journal of Polymer Science*, *2016*(1), 6978434. https://doi.org/10.1155/2016/6978434

Guo, J., Suma, T., Richardson, J. J., & Ejima, H. (2019). Modular Assembly of Biomaterials Using Polyphenols as Building Blocks. *ACS Biomaterials Science & Engineering*, *5*(11), 5578–5596. https://doi.org/10.1021/acsbiomaterials.8b01507

Hart, P. W., Colson, G. W., Antonsson, S., & Hjort, A. (2011). Impact of impregnation on high kappa number hardwood pulps. *BioResources*, *6*(4), 5139.

Hubbe, M. A., & Heitmann, J. A. (2007). Review of factors affecting the release of water from cellulosic fibers during paper manufacture. *BioResources*, *2*(3), 500-533.

Ibá. (2025). *Relatório anual 2025*. https://iba.org/wp-content/uploads/2025/10/relatorioanual2025.pdf

Iwasaki, M. T., Ferreira, D. C., & D'almeida, M. L. O. (2014). Previsão de perda de alvura de papel ofsete e cuchê. https://www.eucalyptus.com.br/artigos/2014_Brightness_Losses_Texto.pdf

Lavoine, N., Bras, J., & Desloges, I. (2014). Mechanical and barrier properties of cardboard and 3D packaging coated with microfibrillated cellulose. *Journal of Applied Polymer Science*, *131*(8). https://doi.org/10.1002/app.40106;wgroup:string:publication

McCubbin, N. (1997). Yield improvements possible with O2 delig, digester modifications. *Pulp & Paper*, *71*(6), 93-9

Missio, A. L., Mattos, B. D., Ferreira, D. De F., Magalhães, W. L. E., Bertuol, D. A., Gatto, D. A., Petutschnigg, A., & Tondi, G. (2018). Nanocellulose-tannin films: From trees to sustainable active packaging. *Journal of Cleaner Production*, *184*, 143–151. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.02.205

Morgado, F., Conceição, R., Barroso, S., Pinto, F. R., Gil, M. M., Novo, P. J., Alves, N., & Valente, J. F. A. (2025). Advances in biocoatings for paper and cardboard food packaging. *Progress in Organic Coatings*, *208*, 109491. https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2025.109491

Phanthong, P., Reubroycharoen, P., Hao, X., Xu, G., Abudula, A., & Guan, G. (2018). Nanocellulose: Extraction and application. *Carbon Resources Conversion*, *1*(1), 32–43. https://doi.org/10.1016/j.crcon.2018.05.004

Potulski, D. C. (2012). Efeito da incorporação de microfibrilas de celulose sobre as propriedades do papel. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Paraná, Curitiba.

Rastogi, V. K., & Samyn, P. (2015). Bio-Based Coatings for Paper Applications. *Coatings 2015, Vol. 5, Pages 887-930*, *5*(4), 887–930. https://doi.org/10.3390/coatings5040887

Read, J. I. (1983). Dry strength additives. *Stock Preparation*, *6*, 86-98.

Rosa, C. A. B. (2003). Influência do Teor de Lignina da Madeira de *Eucalyptus Globulus* na Produção e na Qualidade da Celulose *Kraft*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria.

Scott, W. E.; Abbott, J. C.; Trosset, S. (1995). Properties of paper: an introduction. 2 ed Tappi press. 191p. Atlanta.

Silva, J. C. (2015). Biorefinery of lignocellulosic materials: novel products, methods and applications of forest and agricultural feedstocks. Tese (Doutorado em Ciência Florestal), Universidade Federal de Viçosa, Viçosa.

Silva, T. S. S. D. (1999). Estudo de tratabilidade físico-química com uso de taninos vegetais em água de abastecimento e esgoto. Dissertação (Mestrado em Saúde Pública) - Escola Nacional de Saúde Pública Sergio Arouca, Fundação Oswaldo Cruz, Rio de Janeiro.

Strand, A., Khakalo, A., Kouko, J., Oksanen, A., Ketola, A., Salminen, K., Rojas, O., Retulainen, E., & Sundberg, A. (2017). The effect of chemical additives on the strength, stiffness and elongation potential of paper. *Nordic Pulp and Paper Research Journal*, *32*(3), 2017. https://doi.org/10.3183/npprj-2017-32-03-p324-335

Turbak, A. F., Snyder, F. W., & Sandberg, K. R. (1983). Microfibrillated cellulose, a new cellulose product: properties, uses, and commercial potential. In *J Appl Polym Sci Appl Polym Symp* (Vol. 37, No. 9, pp. 815-827).

Zolett, E. R., Jabur, A. S., & Siliprandi, E. M. (2012). Uso de polímero natural a base de tanino (TANFLOC) para o tratamento de água para o consumo humano. *XVII seminário de iniciação científica e tecnológica da utfpb, pato branco*.

Nir Connect: uma plataforma para construção de modelos NIR - case para densidade básica da madeira

Thalles Loiola Dias[1]; Sâmara Magdalene Vieira Nunes[2]; Luiza Mendonça Bonfim Tavares[1]; Paulo Junio Duarte[1]; Caio Palmeira Goulart[1]; Valdenia Medeiros de Araújo[1]; Thiago de Paula Protásio[1]; Paulo Ricardo Gherardi Hein[1]

[1] Universidade Federal de Lavras 01
[2] Universidade Federal de São João del-Rei 02

Resumo: Este estudo avaliou a Nir Connect, executada no NirToolkit, para ajustar um modelo único de densidade básica da madeira com dados secundários de Costa et al. (2018). A matriz reuniu 219 espectros de 73 corpos de prova; cada densidade básica estava associada a leituras radial, tangencial e transversal. Foram executadas 14 configurações de regressão, três pré-processamentos e três formas de validação interna. Extra Trees com segunda derivada de Savitzky-Golay apresentou, no leave-one-out, R^2 = 0,951, RMSECV = 0,0427 g cm^{-3} e RPD = 4,53; na divisão de 30% para teste, R^2 = 0,964, RMSEP = 0,0347 g cm^{-3} e RPD = 5,30. Como as divisões foram realizadas por registro espectral, leituras do mesmo corpo de prova podem ter ocorrido no treinamento e na avaliação. A faixa da variável densidade básica também difere da publicada no estudo de origem. Assim, os resultados descrevem o desempenho interno do processamento, mas ainda não demonstram aplicação independente do plano de leitura.

Palavras-chave: Quimiometria; Aprendizado de máquina; *Eucalyptus*

Nir Connect: A Platform for Developing NIR Models—A Case Study on Wood Basic Density

Abstract: This study evaluated Nir Connect, executed in NirToolkit, for fitting a single wood-density model using secondary data from Costa et al. (2018). The matrix pooled 219 spectra from 73 specimens; each density value was associated with radial, tangential, and transverse readings. Fourteen regression configurations, three preprocessing options, and three internal validation procedures were executed. Extra Trees with a second Savitzky-Golay derivative yielded R^2 = 0.951, RMSECV = 0.0427 g cm^{-3}, and RPD = 4.53 in leave-one-out, and R^2 = 0.964, RMSEP = 0.0347 g cm^{-3}, and RPD = 5.30 in a 30% test split. Because the splits were performed by spectral record, readings from the same specimen may have occurred in both training and evaluation. The basic density range also differs from that reported in the source study. Therefore, the results describe internal processing performance but do not yet demonstrate plane-independent application.

Keywords: Chemometrics; Machine learning; *Eucalyptus*

1. Introdução

A densidade básica integra a proporção entre parede celular e espaços vazios e constitui um dos principais indicadores da qualidade da madeira. Sua variação afeta o rendimento em celulose e carvão, o transporte, o desempenho mecânico e a seleção de materiais em programas de melhoramento. Embora o método gravimétrico seja a referência, sua execução requer saturação, determinação do volume verde e secagem até massa constante, o que limita a triagem

de grandes conjuntos amostrais (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2003; Costa et al., 2018).

A espectroscopia no infravermelho próximo (NIR) oferece uma alternativa rápida e não destrutiva, mas a resposta de sobretons e bandas de combinação de ligações O–H, C–H e N–H é sobreposta e influenciada pelo espalhamento da radiação. Por isso, a estimativa quantitativa depende de pré-processamentos, modelos multivariados e validação compatível com a estrutura amostral (Tsuchikawa, 2007; Sandak et al., 2016). O PLSR é tradicional na área, enquanto algoritmos não lineares ampliam a possibilidade de representar interações complexas entre variáveis espectrais.

Na madeira sólida, plano anatômico, rugosidade e modo de aquisição modificam a informação espectral. Costa et al. (2018) ajustaram modelos PLSR específicos para superfícies tangencial, radial e transversal de 278 corpos de prova, obtendo o melhor resultado na superfície transversal produzida por serra-fita e medida por esfera de integração (r^2p = 0,87; RMSEP = 23 kg m^{-3}; RPD = 3,0). Essa estratégia melhora o controle experimental, mas exige selecionar previamente uma calibração compatível com a condição de leitura.

Os espectros radial, tangencial e transversal foram reunidos em uma única matriz para ajustar uma calibração comum, denominada modelo global. O objetivo foi comparar os pré-processamentos e as configurações de regressão executados pela Nir Connect no NirToolkit e confrontar as métricas internas com Costa et al. (2018), considerando diferenças de amostragem, distribuição da densidade básica e validação.

2. Material e métodos

2.1 Delineamento comparativo e origem dos dados

Foram utilizados dados secundários de Costa et al. (2018), obtidos de 40 árvores, com seis anos, de híbridos de *Eucalyptus urophylla* × *Eucalyptus grandis* cultivados em espaçamento 3 × 3 m na Cenibra S.A., Minas Gerais. Pranchas centrais de 150 cm de comprimento e 4 cm de espessura foram processadas em corpos de prova nominais de 25 × 25 × 50 mm. No estudo de origem, 278 corpos de prova foram selecionados para representar a variação de densidade básica e analisados em diferentes superfícies e modos de aquisição.

A base recebida continha 219 registros espectrais e 73 valores distintos de densidade básica. Cada valor aparecia três vezes, correspondendo às leituras radial, tangencial e transversal do mesmo corpo de prova. Portanto, havia 73 unidades físicas e 219 registros. Conforme informado pelos autores, foram removidos registros duplicados ou redundantes

próximos à média. A lista de exclusões e os identificadores originais não acompanhavam o arquivo.

Os três planos foram reunidos sem uma coluna indicadora da superfície e sem modelos separados. O arquivo também não identificava, por linha, o corpo de prova, o detector, o modo de aquisição ou a condição de usinagem. Por isso, não foram calculadas estatísticas espectrais por plano.

2.2 Aquisição espectral e organização das matrizes

Segundo Costa et al. (2018), os espectros de reflectância difusa foram adquiridos em espectrômetro FT-NIR MPA (Bruker Optik GmbH, Alemanha), com 32 varreduras e resolução de 3,87 cm^{-1}. O estudo original registrou 12.500–3.600 cm^{-1} e utilizou 9.000–4.000 cm^{-1} nas calibrações. As leituras ocorreram próximo de 20 °C e 65% de umidade relativa, com madeira em equilíbrio higroscópico de aproximadamente 12%. Como os metadados por linha não foram preservados, essas condições caracterizam a origem dos dados, mas não foram reavaliadas como fatores.

A matriz X continha 219 linhas e 1.298 variáveis entre 9.002,509 e 3.999,829 cm^{-1}, com passo aproximado de 3,86 cm^{-1}; a matriz Y continha a coluna densidade básica. As planilhas X e Y foram importadas do arquivo XLSX, com remoção configurada para linhas ausentes.

2.3 Ambiente NirToolkit e configuração analítica

O processamento foi executado no NirToolkit, com Python 3.11.9, NumPy 2.3.3, Pandas 2.3.3, scikit-learn 1.7.2, semente 42 e commit 0d237f5. O ambiente realizou leitura, pré-processamento, busca em grade, ajuste e registro das métricas.

2.4 Pré-processamentos e algoritmos

Foram executados Savitzky-Golay (SG), escalonamento e uma rotina identificada como EPO. O SG utilizou polinômio de segunda ordem, derivadas de primeira e segunda ordem e janelas de 3 a 25 pontos (Savitzky & Golay, 1964). Na versão fornecida, EPO foi instanciado sem a matriz externa Z; nessa condição, o código retorna os espectros sem alteração. Portanto, os resultados rotulados como EPO não representam ortogonalização efetiva.

A configuração continha 14 entradas de regressão, correspondentes a 13 classes de modelos, pois duas entradas utilizaram SVR com kernel RBF. Foram incluídos PLSR, PLS local, Random Forest, Gradient Boosting, Extra Trees, AdaBoost, SVR linear e RBF, Ridge,

regressão linear, k-vizinhos, perceptron multicamadas e árvore de decisão. Os hiperparâmetros foram selecionados por busca em grade.

2.5 Validação, métricas e critério de comparação

Foram aplicadas validação leave-one-out (LOO), validação cruzada com cinco partições e duas repetições (5-fold) e divisão única com 30% para teste (holdout). Pré-processamento e hiperparâmetros foram ajustados nos dados de treinamento. Foram calculados R^2, RMSECV, RMSEP, MAE e RPD.

As divisões ocorreram no nível dos 219 registros. Como cada corpo de prova contribuiu com três leituras, registros do mesmo corpo podem ter sido distribuídos entre treinamento e avaliação. No LOO, a retirada de uma leitura mantém as outras duas no treinamento. As métricas, portanto, não representam predição de corpos de prova inteiramente novos.

As métricas de Costa et al. (2018) foram convertidas de kg m^{-3} para g cm^{-3}. Como os conjuntos diferem em tamanho, distribuição, organização das superfícies e validação, a comparação foi usada para contextualização, não como repetição direta do experimento original.

3. Resultados e discussão

3.1 Estrutura da base e alcance da comparação

Os 73 valores de referência apresentaram média de 0,782 g cm^{-3}, desvio-padrão de 0,193 g cm^{-3}, coeficiente de variação de 24,7% e intervalo de 0,433 a 1,096 g cm^{-3}. As 219 linhas correspondem às três leituras de cada corpo de prova. A remoção de observações próximas à média aumentou a dispersão do subconjunto. Como RPD é a razão entre o desvio-padrão e o erro, maior dispersão pode elevar esse indicador sem reduzir o erro absoluto.

Costa et al. (2018) informaram intervalo de 0,294 a 0,679 g cm^{-3}, média próxima de 0,460 g cm^{-3} e coeficiente de variação de 14,8%. A exclusão de valores próximos à média não explica registros acima de 0,679 g cm^{-3}. O limite de 1,096 g cm^{-3} exige conferência da unidade, da variável e de possíveis transformações. Até essa verificação, os erros em g cm^{-3} não devem ser comparados como se a escala fosse idêntica.

O tamanho amostral efetivo foi de 73 corpos de prova, não 219 observações independentes. A análise utilizou 1.298 variáveis espectrais e várias combinações de pré-processamento, modelo e hiperparâmetros, condição que aumenta o risco de sobreajuste. A

avaliação final de modelos NIR deve utilizar amostras excluídas de todas as etapas de seleção e ajuste (Hein et al., 2017).

3.2 Desempenho do modelo global

Entre as configurações executadas, o tratamento SG apresentou os menores erros. O algoritmo Extra Trees com segunda derivada e janela de 25 pontos resultou, no LOO, em R^2 = 0,951, RMSECV = 0,0427 g cm^{-3}, MAE = 0,0303 g cm^{-3} e RPD = 4,53. Na validação do tipo 5-fold, foram obtidos R^2 = 0,928 ± 0,041, RMSECV = 0,0510 ± 0,0126 g cm^{-3}, MAE = 0,0346 g cm^{-3} e RPD = 3,78. Na divisão de 30% para teste, os valores foram R^2 = 0,964, RMSEP = 0,0347 g cm^{-3}, MAE = 0,0250 g cm^{-3} e RPD = 5,30.

Tabela 1 – Desempenho comparativo de Extra Trees e PLSR no modelo global

Validação	Pré-proc.	Modelo	R^2	Erro (g cm^{-3})	RPD
LOO	SG	Extra Trees	0,951	RMSECV = 0,0427	4,53
5-fold	SG	Extra Trees	0,928	RMSECV = 0,0510	3,78
Holdout	SG	Extra Trees	0,964	RMSEP = 0,0347	5,30
LOO	SG	PLSR	0,854	RMSECV = 0,0735	2,63
5-fold	SG	PLSR	0,842	RMSECV = 0,0754	2,56
Holdout	SG	PLSR	0,728	RMSEP = 0,0951	1,93

Costa et al. (2018) também reduziram os erros com derivada, porém utilizaram a primeira derivada. Derivadas podem reduzir variações de linha de base e realçar mudanças locais, mas também amplificam ruído. A segunda derivada com janela de 25 pontos combinou diferenciação e suavização. Como o efeito do pré-processamento varia com material e aquisição (Sandak et al., 2016; Li et al., 2023), sua escolha deve decorrer da validação do conjunto analisado, e não de uma definição prévia sem comparação.

Na matriz combinada, Extra Trees apresentou erros menores que PLSR. Para PLSR, R^2/RPD foram 0,854/2,63 no LOO, 0,842/2,56 no 5-fold e 0,728/1,93 no holdout; os erros foram RMSECV de 0,0735 e 0,0754 g cm^{-3} e RMSEP de 0,0951 g cm^{-3}. Extra Trees combina árvores construídas com aleatorização de amostras e variáveis (Geurts et al., 2006). O resultado indica melhor ajuste nas divisões utilizadas, mas não comprova uma relação física não linear.

O Extra Trees apresentou R^2 de treinamento igual a 1,0 e erro próximo de zero, indicando possível sobreajuste. Além disso, a divisão por registro pode colocar leituras do mesmo corpo de prova nos dois subconjuntos. O R^2 do holdout, superior ao do 5-fold, corresponde a uma única divisão e pode depender de sua composição. A generalização deve ser testada por validação agrupada e por corpos de prova externos (Hein et al., 2009; Hein et al., 2017).

3.3 Modelo global e comparação com a literatura

Costa et al. (2018) obtiveram o melhor PLSR na superfície transversal serrada em serra-fita e medida por esfera de integração (r^2p = 0,87; RMSEP = 0,023 g cm^{-3}; RPD = 3,0). Com fibra óptica, a mesma superfície apresentou r^2p = 0,78, RMSEP = 0,035 g cm^{-3} e RPD = 2,1. Hein et al. (2009), porém, obtiveram os melhores modelos na superfície radial de *Eucalyptus urophylla*. Schimleck et al. (2005) encontraram diferenças pequenas entre duas orientações em *Pinus taeda*. Esses resultados indicam que o efeito do plano depende do material e da aquisição; justificam testar uma calibração combinada, mas não demonstram independência do plano.

Calibrações comuns já foram avaliadas para outras fontes de variação. Alves et al. (2012) ajustaram um PLSR conjunto para *Pinus pinaster* e *Larix* × *eurolepis* e obtiveram RPD de 3,1, próximo aos modelos específicos. Fujimoto et al. (2012) reuniram diferentes condições de umidade e obtiveram R^2 de 0,86 a 0,87. Esses estudos mostram que uma calibração pode incorporar variabilidade representada no treinamento. Entretanto, espécies e umidade não equivalem a planos anatômicos; portanto, constituem referência metodológica, não validação direta do modelo deste estudo.

Em relação ao melhor modelo de Costa et al. (2018), Extra Trees apresentou R^2 e RPD maiores, mas RMSEP de 0,0347 g cm^{-3}, superior aos 0,023 g cm^{-3} do modelo por esfera e próximo dos 0,035 g cm^{-3} da fibra óptica. O RPD foi favorecido pela maior dispersão da densidade básica no conjunto atual, e o R^2 também depende da amplitude da resposta. Assim, as métricas não permitem concluir superioridade. Essa comparação exigiria os mesmos corpos de prova, a mesma escala e um conjunto de teste comum.

3.4 Contribuição da plataforma e limitações

No NirToolkit, a Nir Connect executou as configurações registradas, aplicou os pré-processamentos dentro das divisões de treinamento e consolidou as métricas. Esse resultado descreve o funcionamento do fluxo computacional. A validade preditiva depende,

separadamente, do desenho de validação, da variável de referência e do teste em novos corpos de prova.

As limitações foram a divisão por registro, a repetição da densidade básica em três leituras, a ausência de rótulos de plano e a diferença entre a coluna densidade básica e a faixa publicada. A próxima análise deve agrupar as três leituras de cada corpo de prova na mesma partição, aplicar validação por grupos e testar corpos de prova externos. Os erros também devem ser calculados separadamente para radial, tangencial e transversal. Só então será possível avaliar se uma calibração única mantém desempenho nos três planos.

4. Conclusões

A Nir Connect, executada no ambiente NirToolkit, ajustou modelos de densidade básica com uma matriz que reuniu espectros dos planos radial, tangencial e transversal sem utilizar o plano como variável preditora. Entre as configurações avaliadas, Extra Trees com segunda derivada de Savitzky-Golay e janela de 25 pontos apresentou os menores erros na validação interna por registro espectral.

O modelo combinado apresentou R^2 e RPD superiores aos valores do melhor modelo específico de Costa et al. (2018), porém seu RMSEP foi maior. Como a distribuição da densidade básica, o tamanho do conjunto e o procedimento de validação foram diferentes, essas métricas não demonstram superioridade do modelo global. A presença de leituras do mesmo corpo de prova em treinamento e avaliação também impede interpretar os resultados como predição independente de novos indivíduos.

A aplicação sem seleção prévia do plano de leitura deverá ser avaliada após a conferência da coluna densidade básica, a reconstrução dos grupos de corpos de prova, a validação agrupada e o teste externo com cálculo de erro por plano. Até essa etapa, o resultado deve ser apresentado como comparação interna do fluxo de modelagem da plataforma.

5. Agradecimentos

Os autores agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES), Código de Financiamento 001; ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), processo nº 409701/2024-6; à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG), processo APQ-00742-23; e ao Programa INOV@ÇÃO UFLA, por meio do Termo de Outorga nº 032/2026 (Processo nº

23090.000734/2026-70), pelo apoio financeiro concedido. P.R.G. Hein recebeu apoio do CNPq por meio do processo nº 304353/2024-8.

6. Referências bibliográficas

Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2003). NBR 11941: Madeira: determinação da densidade básica básica. ABNT.

Alves, A., Santos, A., Rozenberg, P., Pâques, L. E., Charpentier, J.-P., Schwanninger, M., & Rodrigues, J. (2012). A common near infrared-based partial least squares regression model for the prediction of wood density of Pinus pinaster and *Larix* × *eurolepis*. Wood Science and Technology, 46, 157–175. https://doi.org/10.1007/s00226-010-0383-x

Costa, E. V. S., Rocha, M. F. V., Hein, P. R. G., Amaral, E. A., Santos, L. M., Brandão, L. E. V. S., & Trugilho, P. F. (2018). Influence of spectral acquisition technique and wood anisotropy on the statistics of predictive near infrared-based models for wood density. Journal of Near Infrared Spectroscopy, 26, 106–116. https://doi.org/10.1177/0967033518757070

Fujimoto, T., Kobori, H., & Tsuchikawa, S. (2012). Prediction of wood density independently of moisture conditions using near infrared spectroscopy. Journal of Near Infrared Spectroscopy, 20(3), 353–359. https://doi.org/10.1255/jnirs.994

Geurts, P., Ernst, D., & Wehenkel, L. (2006). Extremely randomized trees. Machine Learning, 63, 3–42. https://doi.org/10.1007/s10994-006-6226-1

Hein, P. R. G., Lima, J. T., & Chaix, G. (2009). Robustness of models based on near infrared spectra to predict the basic density in *Eucalyptus urophylla* wood. Journal of Near Infrared Spectroscopy, 17(3), 141–150. https://doi.org/10.1255/jnirs.833

Hein, P. R. G., Pakkanen, H., & dos Santos, A. A. (2017). Challenges in the use of near infrared spectroscopy for improving wood quality: A review. Forest Systems, 26(3), eR03. https://doi.org/10.5424/fs/2017263-11892

Li, Y., Via, B. K., Han, F., Li, Y., & Pei, Z. (2023). Comparison of various chemometric methods on visible and near-infrared spectral analysis for wood density prediction among different tree species and geographical origins. Frontiers in Plant Science, 14, 1121287. https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1121287

Sandak, J., Sandak, A., & Meder, R. (2016). Assessing trees, wood and derived products with near infrared spectroscopy: Hints and tips. Journal of Near Infrared Spectroscopy, 24, 485–505. https://doi.org/10.1255/jnirs.1255

Savitzky, A., & Golay, M. J. E. (1964). Smoothing and differentiation of data by simplified least squares procedures. Analytical Chemistry, 36, 1627–1639. https://doi.org/10.1021/ac60214a047

Schimleck, L. R., Stürzenbecher, R., Mora, C., Jones, P. D., & Daniels, R. F. (2005). Comparison of *Pinus taeda* L. wood property calibrations based on NIR spectra from the radial-longitudinal and radial-transverse faces of wooden strips. Holzforschung, 59(2), 214–218. https://doi.org/10.1515/HF.2005.034

Tsuchikawa, S. (2007). A review of recent near infrared research for wood and paper. Applied Spectroscopy Reviews, 42, 43–71. https://doi.org/10.1080/05704920601036707

Pirólise do bagaço de cana: estabilidade estrutural e estocagem de carbono do biochar

Geisianne de Carvalho Almeida[1]; Angélica de Cássia Oliveira Carneiro[1]; Danielly Moreira Gomes[1]; Raquel Julia Cipriano dos Santos[1]; Vanessa Vitória Soares de Almeida[1]; Bráulio da Silva de Oliveira[1]; Saulo Affonso Hygino[1]

[1] Universidade Federal de Viçosa

Resumo: O bagaço de cana-de-açúcar é um resíduo lignocelulósico gerado em grande volume pelo setor sucroenergético, com potencial para conversão termoquímica em biochar, material carbonáceo aplicável como condicionador de solo e agente de estocagem de carbono. Este trabalho teve como objetivo avaliar a influência da temperatura e do tempo de residência da pirólise nas propriedades do biochar produzido a partir do bagaço de cana-de-açúcar, visando sua aplicação agrícola e seu potencial de estocagem de carbono. A biomassa foi caracterizada quanto às propriedades físicas, químicas e térmicas, e os biochars foram produzidos em reator de bancada, em delineamento fatorial 3 × 3, combinando três temperaturas (450, 550 e 650 °C) e três tempos de residência (30, 45 e 60 minutos), com três repetições. Determinaram-se o rendimento gravimétrico e as propriedades químicas e físico-químicas dos biochars. A temperatura foi o principal fator responsável pelas alterações observadas, reduzindo o rendimento gravimétrico e os teores de materiais voláteis e elevando os teores de carbono fixo, carbono elementar e cinzas, resultando em materiais mais carbonizados e estáveis. Todos os biochars apresentaram caráter alcalino. O tratamento a 650 °C e 45 minutos proporcionou o maior estoque líquido de carbono. Conclui-se que o bagaço de cana-de-açúcar constitui matéria-prima promissora para produção de biochar por pirólise lenta, sendo a condição de 650 °C e 45 minutos a mais indicada para obtenção de biochars mais estáveis e com maior potencial de estocagem de carbono.

Palavras-chave: Resíduo Agroindustrial; Condicionador de Solo; Composição elementar.

Sugarcane bagasse pyrolysis: structural stability and carbon storage potential of biochar

Abstract: Sugarcane bagasse is a lignocellulosic residue generated in large volumes by the sugar-energy sector, with potential for thermochemical conversion into biochar, a carbonaceous material applicable as a soil conditioner and carbon storage agent. This study aimed to evaluate

the influence of pyrolysis temperature and residence time on the properties of biochar produced from sugarcane bagasse, targeting its agricultural application and carbon storage potential. The biomass was characterized regarding its physical, chemical and thermal properties, and the biochars were produced in a bench-scale reactor, following a 3 × 3 factorial design combining three temperatures (450, 550 and 650 °C) and three residence times (30, 45 and 60 minutes), with three replicates. Gravimetric yield and the chemical and physicochemical properties of the biochars were determined. Temperature was the main factor responsible for the observed changes, reducing gravimetric yield and volatile matter content while increasing fixed carbon, elemental carbon and ash contents, resulting in more carbonized and stable materials. All biochars showed alkaline character. The treatment at 650 °C and 45 minutes provided the highest net carbon stock. It is concluded that sugarcane bagasse is a promising feedstock for biochar production by slow pyrolysis, with 650 °C and 45 minutes being the most suitable condition for obtaining more stable biochars with greater carbon storage potential.

Keywords: Agro-industrial Waste; Soil Conditioner; Elemental composition.

1. Introdução

A cana-de-açúcar é uma das principais culturas agrícolas do Brasil, com a safra 2024/25 estimada em 677 milhões de toneladas (Companhia Nacional de Abastecimento, 2025). O processamento industrial gera grande volume de bagaço, correspondendo a 25%–30% da massa fresca processada, resíduo destinado majoritariamente à cogeração de energia por combustão direta (Alcarde *et al*., 2025). Essa prática, embora contribua para a autossuficiência energética do setor, converte a maior parte do carbono da biomassa em CO_2, limitando seu aproveitamento em produtos de maior valor agregado (Hiranobe *et al*., 2024).

A pirólise surge como rota alternativa para a valorização desse resíduo, permitindo converter parte do carbono da biomassa em biochar, material sólido, poroso e rico em carbono, com potencial de aplicação como condicionador de solo e agente de estocagem de carbono (Lehmann; Joseph, 2015). Quando incorporado ao solo, o biochar pode contribuir para a retenção de água, a disponibilidade de nutrientes e a redução da acidez em solos tropicais (Hossain et al., 2020), além de reter carbono em estruturas aromáticas mais estáveis, retardando seu retorno à atmosfera (Woolf et al., 2010).

As propriedades do biochar, contudo, são fortemente dependentes das condições operacionais da pirólise, sobretudo da temperatura e do tempo de residência, que determinam o grau de carbonização, a composição química e a estabilidade estrutural do material produzido (Tripathi et al., 2016). Temperaturas mais elevadas tendem a favorecer maior aromaticidade e recalcitrância do biochar, em detrimento do rendimento gravimétrico do processo (Guimarães et al., 2009). Compreender esse compromisso é essencial para direcionar a produção de biochar

conforme a finalidade pretendida, seja agronômica ou voltada à mitigação climática por meio da estocagem de carbono (Hallad et al., 2025).

Diante disso, este trabalho teve como objetivo avaliar a influência da temperatura e do tempo de residência da pirólise sobre a estabilidade estrutural e o potencial de estocagem de carbono de biochars produzidos a partir de bagaço de cana-de-açúcar.

2. Material e métodos

O bagaço de cana-de-açúcar (Saccharum spp.) foi obtido em uma usina sucroalcooleira localizada em Urucânia, MG. Após a coleta, o material foi homogeneizado, quarteado e peneirado em malha de 5 mm, sendo utilizadas as partículas retidas para a produção dos biochars.

O biochar foi produzido por meio de pirólise em atmosfera com disponibilidade limitada de oxigênio. A biomassa foi inserida em um contêiner metálico com dimensões nominais de 0,430 m × 0,160 m × 0,160 m, com volume de 0,011 m³, preenchendo aproximadamente 80% do seu volume útil (≈250 g). Em seguida, o contêiner foi tampado e inserido em um reator elétrico tipo mufla. A temperatura de tratamento foi previamente programada na mufla e, após a inserção do contêiner, aguardou-se o equipamento atingir a temperatura estabelecida. O tempo de residência foi contabilizado somente a partir do momento em que a mufla atingiu a temperatura de tratamento. Foram testadas nove combinações, com três temperaturas de pirólise (450, 550 e 650 °C) e três tempos de residência (30, 45 e 60 minutos), com três repetições por combinação, totalizando 27 unidades amostrais. Ao término da pirólise, o contêiner permaneceu fechado e foi resfriado por aproximadamente duas horas, utilizando-se mantas umedecidas para acelerar o resfriamento, antes da retirada do biochar.

A composição química elementar foi determinada conforme a norma (C, N, H, S, O) conforme as normas DIN EN 15104 (2011b) e DIN EN 15296 (2011a).

Foram calculadas as relações molares entre hidrogênio e carbono orgânico (H/Corg), conforme a metodologia Puro Standard: Biochar Methodology (Puro.earth, 2025), utilizada como indicador do grau de aromaticidade e da estabilidade estrutural do biochar, e a razão molar O/Corg, obtida de acordo com os critérios do European Biochar Certificate (EBC, 2023).

A estimativa do estoque de CO_2eq (carbono estocado bruto) foi calculada multiplicando-se a quantidade de biochar produzido pelo teor de carbono orgânico e pela razão molar entre as massas do dióxido de carbono e do carbono. O carbono orgânico foi calculado a partir do carbono elementar subtraído da fração inorgânica total dos biochars, uma vez que os teores de carbono inorgânico não foram determinados neste estudo. As perdas de carbono foram calculadas a partir do fator de permanência do carbono orgânico ao longo de 200 anos, considerando a razão molar H/Corg como indicador de aromaticidade e estabilidade. Para essa estimativa, adotou-se a temperatura de referência do solo de 20 °C, correspondente à média anual histórica do ar para a mesorregião da Zona da Mata mineira (INMET, 2022), premissa consistente com a aplicação do biochar em solos da mesma região de origem do bagaço. Os coeficientes de estabilidade do carbono foram parametrizados para esse limiar térmico, resultando em valores de 89,87 para M e 35,29 para α (Puro.earth, 2025).

O experimento foi conduzido em delineamento inteiramente casualizado (DIC), em esquema fatorial 3 × 3, com três repetições por tratamento, totalizando 27 unidades amostrais. Os dados foram submetidos aos testes de normalidade dos resíduos (Shapiro-Wilk) e de homogeneidade das variâncias (Bartlett); atendidos os pressupostos, procedeu-se à análise de variância (ANOVA) e, quando constatado efeito significativo dos fatores, as médias foram comparadas pelo teste de Tukey a 5% de significância. As análises estatísticas foram realizadas com o pacote ExpDes.pt no software R, e o Microsoft Excel® foi utilizado para organização e tabulação dos dados.

3. Resultados e discussão

O bagaço de cana-de-açúcar in natura apresentou composição estrutural com predominância de holoceluloses (62,25%), seguida por lignina total (22,61%) e extrativos (9,43%), além de composição elementar dominada por carbono (49,05%) e oxigênio (38,64%), com baixos teores de nitrogênio e enxofre. O elevado teor de holoceluloses, fração de menor estabilidade térmica, favorece a desvolatilização da biomassa durante a pirólise (Guimarães et al., 2009), enquanto a lignina, mais resistente à degradação, contribui para a formação da fração sólida carbonácea (Pinho et al., 2019; Tripathi et al., 2016), características que sustentam a análise das transformações observadas nos biochars produzidos.

Na Tabela 1 são apresentados os valores médios da composição química elementar dos biochars produzidos em diferentes temperaturas e tempos de residência de pirólise. Houve interação significativa entre os fatores para os teores de carbono, oxigênio e enxofre ($p \leq 0,05$); para nitrogênio e hidrogênio, não houve interação significativa, verificando-se apenas os efeitos isolados dos fatores.

Tabela 1. Composição química elementar dos biochars produzidos em diferentes temperaturas e tempos de residência

Temperatura (°C)	**30 min**	**45 min**	**60 min**	**Média**
CARBONO (%)				
450	76,550 Bc	77,750 Ac	77,550 Ac	77,282
550	85,050 Bb	84,300 Bb	86,650 Ab	85,333
650	88,000 Ca	90,050 Aa	88,900 Ba	88,983
ENXOFRE (%)				
450	0,034 Ba	0,083 Aa	0,024 Ba	0,047

Temperatura (°C)	30 min	45 min	60 min	Média
550	0,041 Aa	0,032 Ab	0,034 Aa	0,036
650	0,051 Aa	0,039 Ab	0,034 Aa	0,041
OXIGÊNIO (%)				
450	15,762 Aa	14,098 Ba	15,306 Aa	15,055
550	8,303 Ab	8,561 Ab	6,074 Bb	7,646
650	4,716 Ac	3,303 Bc	3,589 Bc	3,869
HIDROGÊNIO (%)				
450	3,360	3,390	3,280	3,340 a
550	2,780	2,620	2,430	2,610 b
650	2,280	2,000	1,940	2,070 c
Média	2,820 a	2,670 ab	2,550 b	
NITROGÊNIO (%)				
450	0,333	0,336	0,323	0,331 a
550	0,331	0,355	0,325	0,337 a
650	0,335	0,306	0,286	0,309 b
Média	0,333 a	0,332 ab	0,311 b	

Médias seguidas pela mesma letra, minúscula na coluna (comparando as temperaturas dentro de cada tempo) e maiúscula na linha (comparando os tempos dentro de cada temperatura), não diferem entre si pelo teste de Tukey a 95% de probabilidade. Para as variáveis sem interação significativa, as letras minúsculas comparam as médias marginais.

O teor de carbono aumentou com a elevação da temperatura de pirólise, atingindo o maior valor nos biochars produzidos na temperatura de 650 °C por 45 minutos (90,05%). Esse comportamento acompanhou o aumento observado para o carbono fixo (85,27 %) (Tabela 1), indicando que a elevação da temperatura promoveu aumento no teor de carbono da fração sólida. Durante a pirólise, ocorre a remoção de compostos ricos em hidrogênio e oxigênio na forma de gases e vapores condensáveis, aumentando proporcionalmente a concentração de carbono no biochar (Mukherjee *et al.*, 2022; Pinho *et al.*, 2019; Ravindiran *et al.*, 2024). Esse

comportamento reflete o avanço do processo de carbonização e a formação de estruturas carbonáceas mais condensadas e estáveis.

Embora o aumento do teor de carbono tenha sido observado em todas as temperaturas avaliadas, a influência do tempo de residência foi mais evidente nos tratamentos conduzidos a 550 e 650 °C. Em ambas as temperaturas, os maiores teores de carbono foram obtidos aos, 45 minutos enquanto o prolongamento do tempo para 60 minutos promoveu maiores tempos de residência, de forma que obteve-se alterações pouco expressivas. Esse resultado sugere que, nessas condições, a maior parte das reações responsáveis pelo enriquecimento da fração sólida em carbono ocorreu até aproximadamente 45 minutos de residência, sendo o prolongamento do tratamento pouco efetivo para aumentar o teor de carbono elementar. Comportamento semelhante foi observado por Zhang *et al*. (2024), que verificaram maior influência da temperatura sobre a composição elementar dos biochar, do que do tempo de residência. Em contrapartida, os teores de oxigênio e hidrogênio reduziram com o aumento da temperatura de pirólise. O oxigênio reduziu de aproximadamente 15,8% nos biochars produzidos a 450 °C para valores inferiores a 5% a 650 °C, enquanto o teor médio de hidrogênio reduziu de 3,34% para 2,07% entre essas mesmas temperaturas. Essa redução está associada à eliminação progressiva de grupos funcionais oxigenados e de estruturas alifáticas durante a pirólise, processo amplamente descrito para biomassas lignocelulósicas submetidas a temperaturas mais elevadas (Mukherjee *et al.*, 2022; Tripathi *et al.*, 2016; Zhao, Peng *et al.*, 2016).

Para o oxigênio, observou-se ainda efeito da interação entre temperatura e tempo de residência. Na temperatura de 650 °C, o tratamento conduzido por 30 minutos apresentou teor de oxigênio significativamente superior aos obtidos tempos deaos 45 e 60 minutos, que não diferiram entre si. Esse resultado indica que, nessa temperatura, a maior parte da remoção dos grupos funcionais oxigenados ocorreu nos primeiros 45 minutos de residência, não havendo alterações expressivas com o prolongamento do tempo para 60 minutos.

O teor de nitrogênio apresentou pequenas variações entre os tratamentos, permanecendo inferior a 0,36% em todas as condições avaliadas. Embora tenham sido observados efeitos significativos efeito significativo da temperatura e do tempo de residência, as diferenças absolutas foram discretas quando comparadas às verificadas para carbono, hidrogênio e oxigênio. Esse comportamento é esperado para biomassas lignocelulósicas, que apresentam baixo teor de nitrogênio e sofrem alterações relativamente pequenas desse elemento durante a pirólise (Lehmann *et al.*, 2015; Tomczyk *et al.*, 2020).

O teor de enxofre também permaneceu bastante reduzido em todos os tratamentos, com valores inferiores a 0,1%, apesar da interação significativa entre temperatura e tempo de residência. As diferenças observadas entre os tratamentos foram pequenas em termos absolutos, indicando reduzida influência prática das condições de pirólise sobre esse elemento. Sob o ponto de vista ambiental, esses baixos teores são desejáveis, uma vez que reduzem o potencial de formação de compostos sulfurados durante processos térmicos e favorecem a utilização agronômica do biochar, minimizando riscos de contaminação associados ao enxofre (Xiao et al., 2025).

As transformações promovidas pela temperatura de pirólise sobre a composição química e a estrutura dos biochars podem ser visualizadas no diagrama de Van Krevelen (Figura 1), que relaciona as razões atômicas H/C e O/C. Observou-se um deslocamento progressivo dos tratamentos em direção à região inferior esquerda do diagrama com o aumento da temperatura de pirólise, evidenciando a redução simultânea das razões H/C e O/C e, consequentemente, o avanço do processo de carbonização.

Figura 1. Diagrama de *Van Krevelen* e razões atômicas H/C e O/C dos biochars produzidos em diferentes condições de pirólise.

A biomassa in natura apresentou as maiores razões atômicas, com valores próximos de H/C ≈ 0,59 e O/C ≈ 0,60, características típicas de materiais lignocelulósicos ricos em grupos funcionais oxigenados. Após a pirólise, observou-se expressivo deslocamento dos tratamentos em direção à região inferior esquerda do diagrama, com menores valores para essas razões atômicas. Nos tratamentos conduzidos a 650 °C, os valores de H/C reduziram para aproximadamente 0,25–0,31, enquanto as razões O/C atingiram valores inferiores a 0,08. Essa redução demonstra a intensificação das reações de desidratação, descarboxilação e desvolatilização, resultando na formação de estruturas carbonáceas mais condensadas e aromáticas e no aumento da estabilidade química dos biochars (Mafu et al., 2017; Zhang et al., 2024; Zhao et al., 2016).

Segundo o European Biochar Certificate (EBC, 2023), biochars com razão H/Corg inferior a 0,7 apresentam estabilidade suficiente para aplicações relacionadas ao sequestro de carbono, enquanto valores inferiores a 0,4 indicam materiais com elevada estabilidade estrutural. Todos os biochars produzidos neste estudo atenderam ao primeiro critério e aqueles

obtidos a 650 °C apresentaram razões H/C inferiores a 0,4, enquadrando-se na categoria de maior estabilidade estabelecida pela certificação. Esses resultados indicam elevado potencial de permanência do carbono no solo e maior resistência à degradação microbiológica.

As tendências observadas no diagrama de Van Krevelen corroboram os resultados de composição química e elementar, evidenciando que a temperatura foi o principal fator responsável pelo avanço da carbonização e pela formação de biochars estruturalmente mais estáveis, comportamento também observado por Pires (2018) para biochars produzidos a partir de palha de cana-de-açúcar.

3.1 Estoque de CO_2

Houve interação significativa entre temperatura de pirólise e tempo de residência ($p \leq 0,05$) para as estimativas de carbono estocado bruto, carbono perdido e carbono líquido (Tabela 2), indicando que o efeito do tempo depende da temperatura empregada no processo.

Tabela 2. Balanço de carbono estocado bruto, carbono perdido e carbono líquido dos biochars produzidos sob diferentes tempos e temperaturas de pirólise

Temperatura (°C)	30 min	45 min	60 min
CARBONO BRUTO (t CO_2eq. t^{-1} de biochar)			
450	2,696 Bc	2,727 Ac	2,743 Ac
550	2,751 Cb	2,961 Bb	3,035 Ab
650	3,078 Ba	3,160 Aa	3,088 Ba
CARBONO PERDIDO (t CO_2eq. t^{-1} de biochar)			
450	0,779 Aa	0,784 Aa	0,774 Aa
550	0,791 Aa	0,695 Bb	0,674 Bb
650	0,656 Ab	0,625 ABc	0,605 Bc
CARBONO LÍQUIDO (t CO_2eq. t^{-1} de biochar)			
450	1,917 Ab	1,943 Ac	1,969 Ca
550	1,960 Cb	2,266 Bb	2,360 Ba
650	2,421 Ca	2,535 Aa	2,483 Ba

Letras minúsculas comparam temperaturas dentro de cada coluna/tempo e letras maiúsculas comparam tempos dentro de cada linha/temperatura.

O carbono estocado bruto aumentou com a elevação da temperatura de pirólise, variando de aproximadamente 2,70 tCO_2eq nos biochars produzidos a 450 °C para 3,16 tCO_2eq no tratamento conduzido a 650 °C por 45 minutos. Esse comportamento reflete diretamente o aumento do teor de carbono elementar observado anteriormente, evidenciando que temperaturas mais elevadas favoreceram maior enriquecimento da fração sólida em carbono. O efeito do tempo de residência foi mais evidente nas temperaturas de 550 e 650 °C, nas quais o tratamento de 45 minutos apresentou os maiores valores de carbono estocado bruto.

Em contrapartida, as estimativas de carbono perdido diminuíram com o aumento da temperatura de pirólise. Os menores valores foram observados nos biochars produzidos a 650 °C, indicando maior permanência do carbono no solo. Esse resultado está diretamente relacionado às menores razões H/C observadas nesses tratamentos, uma vez que biochars com menor razão H/C apresentam estruturas mais aromáticas e maior estabilidade química (Lehmann et al., 2015; Wang et al., 2016; Woolf et al., 2010).

Como consequência, os maiores valores de carbono líquido foram obtidos nos biochars produzidos a 650 °C, especialmente no tempo de residência de 45 minutos, que apresentou o maior potencial de remoção líquida de CO_2 (2,50 tCO_2eq). Esse resultado demonstra que o aumento da temperatura não apenas favorece a incorporação de carbono no biochar, mas também aumenta sua estabilidade, reduzindo as perdas estimadas ao longo do tempo e elevando o potencial efetivo de estocagem de carbono.

Os resultados demonstram que a temperatura de pirólise foi o principal fator responsável pelo potencial de estocagem de carbono dos biochars produzidos. Entre as condições avaliadas, o tratamento a 650 °C por 45 minutos apresentou o melhor desempenho, combinando elevado teor de carbono, baixa razão H/C, maior estabilidade estrutural e maior estoque líquido de CO_2 equivalente, representando o melhor compromisso entre carbonização e potencial de estocagem de carbono.

4. Conclusões

A estimativa do potencial de estocagem de carbono demonstrou que o aumento da temperatura de pirólise favoreceu a retenção de carbono em formas mais estáveis, reduzindo as perdas estimadas ao longo do tempo e aumentando o estoque líquido de CO_2 equivalente. Embora temperaturas mais elevadas tenham reduzido o rendimento gravimétrico do processo, a maior estabilidade do carbono compensou essa redução, resultando em biochars com maior potencial de remoção de carbono atmosférico.

Entre os tratamentos avaliados, a condição de 650 °C por 45 minutos apresentou o melhor desempenho, reunindo elevado teor de carbono elementar, maior teor de carbono fixo, menores razões H/C e O/C e maior potencial de estocagem líquida de carbono, sendo a combinação recomendada para a produção de biochar a partir de bagaço de cana-de-açúcar quando o objetivo é maximizar a estabilidade do carbono e o potencial de remoção de CO_2 da atmosfera.

Os resultados obtidos demonstram que a valorização do bagaço de cana-de-açúcar por meio da pirólise constitui uma estratégia promissora para o aproveitamento sustentável desse resíduo agroindustrial, agregando valor à biomassa e contribuindo simultaneamente para a produção de um insumo com potencial de aplicação agrícola e para a mitigação das mudanças climáticas por meio da estocagem de carbono.

5. Agradecimentos

Os autores agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG, processos APQ-05311-24 e APQ-04599-25) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq, processo 444395/2024-5) pelo financiamento da pesquisa, e à Embrapii pelas bolsas concedidas. Agradecem também à Universidade Federal de Viçosa e ao Laboratório de Painéis e Energia da Madeira (LAPEM) pelo suporte institucional e estrutural ao desenvolvimento deste trabalho.

6. Referências bibliográficas

Alcarde, A. R., & Silva, F. C. da. (2025). *Cana de açúcar (Geração de energia elétrica)*. Portal Embrapa. https://www.embrapa.br/web/agencia-de-informacao-tecnologica/cultivos/cana-de-acucar/pos-producao/processamento-da-cana-de-acucar/geracao-de-energia-eletrica

Companhia Nacional de Abastecimento. (2025). *Acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar: 4º levantamento safra 2024/25*. CONAB.

Deutsches Institut für Normung. (2011a). *DIN EN 15296:2011. Solid biofuels Calculation of analytical results from one base to another*. DIN.

Deutsches Institut für Normung. (2011b). *Solid Biofuels Determination of Total Content of Carbon, Hydrogen and Nitrogen*. DIN.

EBC. (2023). *European Biochar Certificate Guidelines for a Sustainable Production of Biochar*. Carbon Standards International (CSI).

Guimarães, J. L., Frollini, E., da Silva, C. G., Wypych, F., & Satyanarayana, K. G. (2009). Characterization of banana, sugarcane bagasse and sponge gourd fibers of Brazil. *Industrial Crops and Products*, 30(3), 407–415.

Hallad, S. C., Panwar, N. L., & Kavan Kumar, V. (2025). Investigating the carbon reduction potential of carbon derived from sugarcane Bagasse. *Discover Sustainability*, 6(1), 1130.

Hiranobe, C. T., Gomes, A. S., Paiva, F. F. G., Tolosa, G. R., Paim, L. L., Dognani, G., Cardim, G. P., Cardim, H. P., dos Santos, R. J., & Cabrera, F. C. (2024). Sugarcane Bagasse: Challenges and Opportunities for Waste Recycling. *Clean Technologies*, 6(2), 662–699.

Hossain, M. Z., Bahar, M. M., Sarkar, B., Donne, S. W., Ok, Y. S., Palansooriya, K. N., Kirkham, M. B., Chowdhury, S., & Bolan, N. (2020). Biochar and its importance on nutrient dynamics in soil and plant. *Biochar*, 2(4), 379–420.

Instituto Nacional de Meteorologia. (2022). *Normais Climatológicas do Brasil 1991–2020*. INMET.

Lehmann, J., & Joseph, S. (2015). *Biochar for environmental management: science, technology and implementation* (2. ed.). Routledge.

Mafu, L. D., Neomagus, H. W. J. P., Everson, R. C., Strydom, C. A., Carrier, M., Okolo, G. N., & Bunt, J. R. (2017). Chemical and structural characterization of char development during lignocellulosic biomass pyrolysis. *Bioresource Technology*, 243, 941–948.

Mukherjee, A., Patra, B. R., Podder, J., & Dalai, A. K. (2022). Synthesis of Biochar From Lignocellulosic Biomass for Diverse Industrial Applications and Energy Harvesting: Effects of Pyrolysis Conditions on the Physicochemical Properties of Biochar. *Frontiers in Materials*, 9.

Pinho, J. B. de, Bianchini, A., Pereira, P. S. X., Nunes, L. C., Daros, R. F., Silva, J. G. da, & Castro, D. A. (2019). Sugarcane Biochar for Agricultural Use Produced in Different Conditions of Pyrolysis. *Journal of Experimental Agriculture International*, 1–8.

Pires, I. C. S. A., Nakashima, G. T., Padilla, E. R. D., Santos, L. R. O., Varanda, L. D., Alesi, L. S., & Yamaji, F. M. (2018). Biochar de Palha de Cana-de-Açúcar: Caracterização e Estudo do Processo. *Revista Virtual de Química*, 10(4), 892–899.

Puro.earth. (2025). *Puro Standard: Biochar Methodology – Edition 2025, Version 2*. Puro.earth.

Ravindiran, G., Rajamanickam, S., Janardhan, G., Hayder, G., Alagumalai, A., Mahian, O., Lam, S. S., & Sonne, C. (2024). Production and modifications of biochar to engineered materials and its application for environmental sustainability: a review. *Biochar*, 6(1), 62.

Tomczyk, A., Sokołowska, Z., & Boguta, P. (2020). Biochar physicochemical properties: pyrolysis temperature and feedstock kind effects. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 19(1), 191–215.

Tripathi, M., Sahu, J. N., & Ganesan, P. (2016). Effect of process parameters on production of biochar from biomass waste through pyrolysis: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 55, 467–481.

Wang, J., Xiong, Z., & Kuzyakov, Y. (2016). Biochar stability in soil: meta-analysis of decomposition and priming effects. *GCB Bioenergy*, 8(3), 512–523.

Woolf, D., Amonette, J. E., Street-Perrott, F. A., Lehmann, J., & Joseph, S. (2010). Sustainable biochar to mitigate global climate change. *Nature Communications*, 1(1), 56.

Zhang, S., Jia, X., Wang, X., Chen, J., Cheng, C., Jia, X., & Hu, H. (2024). Using the Conditional Process Analysis Model to Characterize the Evolution of Carbon Structure in Taxodium ascendens Biochar with Varied Pyrolysis Temperature and Holding Time. *Plants*, 13(3), 460.

Zhao, P., Shen, Y., Ge, S., & Yoshikawa, K. (2016). Co-production of biochar, bio-oil, and syngas from Tamarix chinensis biomass under three different pyrolysis temperatures. *BioResources*, 11(3), 7476–7487.

Zhao, Y., Feng, D., Zhang, Y., Huang, Y., & Sun, S. (2016). Effect of pyrolysis temperature on char structure and chemical speciation of alkali and alkaline earth metallic species in biochar. *Fuel Processing Technology*, 141, 54–60.

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Plasticidade anatômica dos vasos e segurança hidráulica de clones de *Eucalyptus* cultivados em ambientes contrastantes

Tatiana de Fátima Martins Pires[1]; Renata Guilherme Cândido da Silva[2]; Gustavo Jaske da Conceição[3]; Bruna Louise Von Randow[1]; Gabriel Amado Ferreira Lauria[1]; Graziela Baptista Vidaurre[1]; Jordão Cabral Moulin[1]

[1] Universidade Federal do Espírito Santo 01
[2] Suzano S.A 02
[3] Klabin S.A 03

Resumo: O eucalipto é cultivado em diferentes regiões do Brasil sob condições climáticas contrastantes, sendo seu desenvolvimento fortemente influenciado pela disponibilidade hídrica. O Índice de Aridez Modificado (IAM) permite avaliar o grau de deficiência hídrica do ambiente. Este estudo teve como objetivo analisar o efeito de diferentes ambientes sobre os parâmetros anatômicos dos vasos e a segurança hidráulica de clones de *Eucalyptus*. Foram avaliados clones com idades entre 6 e 8 anos, provenientes de diferentes regiões do Brasil. Para cada clone, foram amostradas cinco árvores, das quais foram coletados discos nas posições do DAP e a 50% da altura comercial para análises anatômicas e hidráulicas. Os ambientes com IAM negativos (BA, MA e MG) proporcionaram em materiais com vasos de menor diâmetro e comprimento, menor comprimento de cauda, maior frequência de vasos e menores índices de vulnerabilidade e de mesomorfia. Conclui-se que a disponibilidade hídrica afeta variações anatômicas e segurança hidráulica.

Palavras-chave: Elementos de vasos; Índice de Aridez Modificado; Eficiência hídrica.

Anatomical vessel plasticity and hydraulic safety of *Eucalyptus* clones grown in contrasting environments

Abstract: *Eucalyptus* is cultivated across various regions of Brazil under contrasting climatic conditions, with its development strongly influenced by water availability. The Modified Aridity Index (IAM) allows for the assessment of the degree of environmental water deficit. This study aimed to analyze the effect of different environments on vessel anatomical parameters and the hydraulic safety of *Eucalyptus* clones. Clones aged between 6 and 8 years, sourced from different regions of Brazil, were evaluated. For each clone, five trees were sampled; wood discs were collected at breast height (DBH) and at 50% of the commercial height for anatomical and hydraulic analyses. Environments with negative IAM values (BA, MA, and MG) resulted in materials characterized by vessels with smaller diameters and lengths, shorter tail lengths, higher vessel frequency, and lower vulnerability and mesomorphy indices. It is concluded that water availability affects anatomical variations and hydraulic safety.

Keywords: Vessel elements; Modified Aridity Index; Water Use Efficiency.

12. Introdução

O Brasil apresenta ampla diversidade climática, abrangendo importantes regiões de cultivo de eucalipto. Apesar da elevada capacidade de aclimatação do gênero, seu crescimento e produtividade são fortemente influenciados pelas condições climáticas locais (Butler et al., 2022; Aparecido et al., 2025).

As variáveis climáticas, como precipitação, temperatura, déficit de pressão de vapor, umidade do ar, luminosidade e radiação, influenciam diretamente processos fisiológicos das plantas, incluindo fotossíntese, transpiração, crescimento cambial, absorção e transporte de água (Dagar et al., 2022). Nesse contexto, a disponibilidade hídrica é um fator determinante, pois afeta tanto a retenção de água no solo quanto a evapotranspiração. Assim, o índice de aridez constitui um importante indicador climático para avaliar a deficiência hídrica do ambiente, relacionando a precipitação à demanda atmosférica de água, representada pela evapotranspiração potencial (ETP) (Chakilu et al., 2024).

O déficit hídrico e altas temperaturas são fatores de estresse que mais limitam o desenvolvimento das plantas, devido resultarem em danos irreversíveis ou até a morte da planta. A seca reduz a reposição de água disponível no solo, enquanto alta temperatura aumenta a perda de água. Consequentemente, esses estresses geram alta tensão nos condutores das plantas, facilitando a formação de bolhas de ar (cavitação), bloqueando a passagem de água e assim gerando embolia (Qaderi; Martel; Dixon, 2019; Campos; Santos; Nacarath, 2021).

As plantas desenvolvem diferentes mecanismos de aclimatação para conseguirem sobreviver durante eventos de estresse abióticos. As modificações nos elementos anatômicos englobam variações no diâmetro de vasos, frequência de vasos, comprimento de vasos, lume de fibras, parede das fibras, quantidade de parênquimas (Salimath; Hegde; Manasa, 2025). Diferenças anatômicas entre espécies e diferentes ambientes podem resultar em diferentes níveis de plasticidade fenotípica na anatomia do xilema em resposta às diferentes condições climáticas (Li et al., 2017), que consequentemente vai influenciar na qualidade da madeira.

Dessa forma, o objetivo foi analisar o efeito de diferentes ambientes sobre as variações dos parâmetros dos elementos de vasos e sua relação sobre a vulnerabilidade, mesomorfia e condutividade hídrica do plantio.

13. Material e métodos

As amostras de madeiras de eucaliptos foram concedidas pelas empresas CMPC, Suzano, Vallourec e Veracel. Foram avaliados 6 clones comerciais de eucalipto, das respectivas espécies *Eucalyptus urophylla* (C1); *Eucalyptus urophylla* (C4); *Eucalyptus urophylla* (C5);

Eucalyptus urophylla x *Eucalyptus grandis* (C17); *Eucalyptus saligna* (20); *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus maidenii* (C21). Com idades variando de 6 a 8 anos, coletados em locais distribuídos em diferentes regiões do Brasil (Tabela 1).

Tabela 1 – Localização e caracterização dos sítios de coleta

Estado	Município	C	*Eucalyptus*	Anos	Espaçamento (m)
São Paulo	São Miguel Arcanjo	Cfa	(C1)	7	3,0 x 1,80
São Paulo	São Miguel Arcanjo	Cfa	(C4)	7	3,0 x 1,80
Maranhão	Açailândia	Aw	(C1)	7	3,50 x 2,60
Maranhão	Açailândia	Aw	(C4)	7	3,50 x 2,60
Bahia	Santa Cruz Cabrália	Af	(C17)	6	3,00 x 3,00
Minas Gerais	Pompéu	Aw	(C5)	6	3,10 x 2,40
Rio Grande do Sul	Encruzilhada do Sul	Cfa	(C20)	8	3,50 x 2,14
Rio Grande do Sul	Rio Pardo	Cfa	(C21)	8	3,00 x 2,50

C: Clima de acordo com a classificação de Köppen-Geiger (Alvares et al., 2013): Cfa – clima subtropical úmido com verão quente; Aw – clima tropical com inverno seco; Af – clima tropical úmido ou subúmido sem estação seca.

2.1 Amostragem da madeira e análises anatômicas

As árvores foram selecionadas em campo a partir do diâmetro médio. Foram selecionadas 5 árvores de cada clone que foram derrubadas e submetidas à cubagem rigorosa, no qual foram retirados discos com 2,5 cm de espessura nas posições do DAP e 50% da altura comercial.

Para as análises dos parâmetros anatômicos de cada disco de madeira, foram retirados corpos-de-prova (CP) à 20% e 80% de distância da medula com dimensões de 1,5 x 2,0 x 1,5 cm nas direções radiais, tangenciais e longitudinais respectivamente, para confecção de lâminas histológicas e macerado. O processo de produção de macerado seguiu a metodologia apresentada por Nicholls e Dadswell, retratado por Ramalho (1987). O macerado foi produzido para mensuração do comprimento dos elementos de vaso.

Para as análises dos parâmetros anatômicos dos vasos, os CP foram amolecidos em água à ebulição e em seguida fixados em micrótomo de deslize, para obtenção de cortes de espessura médias de 20 µm do plano transversal. Para cada tratamento, foram adquiridas 25 fotomicrografias do plano transversal, utilizando objetiva de 5×, as quais foram empregadas na

avaliação dos parâmetros anatômicos dos vasos. As análises do diâmetro tangencial e frequência dos vasos foram realizadas conforme a Iawa (1989).

As análises de comprimento dos vasos foram realizadas utilizando o material obtido no macerado. Foram realizadas 25 medições em um microscópio confocal, utilizando a objetiva de 20x para obtenção do comprimento do vaso e da sua cauda (apêndice). O índice de vulnerabilidade e índice de mesomorfia foram calculados segundo Carlquist (1977), a condutividade hidráulica (K_h) foi calculada com base na lei de Hagen-Poiseuille, de acordo com Scholz et al. (2013).

A densidade básica da madeira foi determinada a partir de cunhas opostas seguindo a NBR 11941 (ABNT, 2017).

2.2 Obtenção de dados para variáveis climáticas

Os dados de temperatura e precipitação dos plantios de São Miguel Arcanjo (SP) e Açailândia (MA) foram obtidos da estação meteorológica da empresa Suzano SA. Enquanto os dados de temperatura e precipitação de Santa Cruz Cabrália (BA), Encruzilhada do Sul (RS), Pompéu (MG) e Rio Pardo (RS), foram obtidos a partir do site POWER (https://power.larc.nasa.gov/), que disponibiliza dados de satélites estimados.

A evapotranspiração potencial (ETP), foi obtida utilizando o método proposto por Thornthwaite (1948). A ETP foi calculada de acordo com as equações 1 e 2.

$$ETP = 16 \times \left(10 \, x \, \frac{Tm}{I}\right)^{a} \qquad \text{se } 0 \leq Tm < 26{,}5\ ^{\circ}C \qquad (1)$$

$$ETP = -415{,}85 + 32{,}24 \times Tm - 0{,}43 \times Tm^2 \qquad \text{se } Tm \geq 26{,}5\ ^{\circ}C \qquad (2)$$

Para estimativa da relação entre a precipitação e a evapotranspiração, foi calculado o Índice de Aridez Modificado (IAM) baseado no índice de aridez proposto por Thornthwaite (1941), utilizando as seguintes equações 3 e 4:

$$IAM = \left(\frac{P}{ETP}\right) - 1 \text{ se } P < ETP \quad (3)$$

$$IAM = 1 - \left(\frac{ETP}{P}\right) \text{ se } P \geq ETP \quad (4)$$

Em que:

P: Precipitação e ETP: Evapotranspiração potencial.

14. Resultados e discussão

O Índice de Aridez indica o grau de deficiência hídrica do ambiente, quanto menor ou mais negativo o valor do IAM mais seco e severo é o clima. Os sítios situados em Maranhão, Bahia e Minas Gerais, apresentaram IAM negativos respectivamente de -2,98, -3,07 e -4,97, indicando climas mais secos com baixa disponibilidade hídrica. Enquanto os sítios de São Paulo e Rio Grande do Sul apresentaram valores de -0,03 e 2,34, indicando respectivamente em clima menos árido e úmido com melhor disponibilidade hídrica (Figura 1A).

Os clones das regiões menos árida (IAM -0,03) e úmida (IAM 2,34), apresentaram maiores diâmetros dos vasos e menores frequências. Enquanto as regiões com IAM negativos (BA, MA e MG) apresentaram menor comprimento de vasos, menores caudas, maior frequência de vasos (FV), menor índice de vulnerabilidade (IV) e menor Índice de Mesomorfia (IM). A condutividade hidraúlica (Kh) teve maior variação significativa no clone C20. O C21 apresentou menor diâmetro dos vasos (92,10 µm), IV de 8,64 e IM de 2286, não acompanhando o padrão observado para o C20 (Figura 1B).



Clone	IAM	CVC	CC	FV	DV	IV	IM	K_h
I - C1	-2,98	486 b	144 d	11.48 b	95.93 c	8.35 c	2706 c	69.83 c
II - C4	-2,98	506 b	151 c	10.82 c	98.66 c	9.11 c	3130 c	123.81 b
III - C17	-3,07	502 b	154 c	12.02 b	102.75 c	8.54 c	2875 c	85.91 c
IV - C5	-4,97	508 b	144 d	14.31 a	95.00 c	6.65 d	2444 c	96.73 c
V - C1	-0,03	516 b	177 b	7.62 d	118.43 a	15.60 a	5340 a	85.93 c
VI - C4	-0,03	556 a	190 a	7.88 d	111.14 b	14.36 a	5310 a	115.51 b
VII - C20	2,34	519 b	163 b	10.75 c	119.24 a	11.09 b	3946 b	158.51 a
VIII - C21	2,34	398 c	157 c	10.71 c	92.10 c	8.64 c	2286 c	85.19 c

B

Figura 1 – Mapa das regiões de plantio e dados dos Índices de Aridez Modificado (A); Tabela dos parâmetros anatômicos de vasos e condutividade hidráulica (K_h) (B). Médias seguidas da mesma letra na coluna não diferem entre si a 5% de significância pelo teste de Skott-Knott. IAM: Índice de Aridez Modificado; CVC: comprimento de vasos com cauda (µm); CC: comprimento de cauda; FV: frequência de vasos (n°.mm^{-2}); DV: diâmetro tangencial de vasos (µm); IV: Índice de Vulnerabilidade tangencial; IM: Índice de Mesomorfia tangencial; k_h: Condutividade Hidráulica.

Os maiores IV encontrados foram das regiões com maior IAM, coincidiram com os maiores diâmetros de vasos. No IV, quanto mais baixo ou próximo de zero for o resultado, mais

seguro e resistente são os vasos das plantas contra a seca. Já valores altos indicam que as plantas estão mais vulneráveis (Ewers; Jacobsen; López-Portillo, 2023). Os ambientes com maior IAM estiveram associados a vasos com diâmetro maiores, porém vasos com essa característica apresentam maior risco potencial de embolia em períodos secos, pois a tensão da coluna de água nesse período aumenta drasticamente (Hacke et al., 2022). Enquanto o ambiente com IAM negativos proporcionou materiais genéticos com maior segurança hídrica devido seus menores DV em maior FV, consequentemente gerando menor vulnerabilidade. No estudo de Barbosa et al. (2019), ao avaliarem a influência de diferentes condições climáticas na madeira de *E. grandis* x *E. urophylla* em Minas Gerais, encontraram resultados semelhantes. No qual, o clone plantado em Belo Oriente e Ferros (MG) locais que o plantio recebeu menor precipitação, apresentou menor IV, com menores DV e maior FV.

O comprimento dos elementos de vaso também pode interferir na segurança hídrica, comprimentos mais curtos como encontrado nos materiais genéticos dos ambientes de IAM negativos possuem mais resistência ao colapso e deformação. Enquanto vasos com maior comprimento como encontrado nos ambientes com maior IAM apresentaram menor resistência (Carlquist, 1977).

O índice de mesomorfia (IM) permite avaliar a tendência da anatomia do xilema em relação a ambientes mesomórficos ou xeromórficos, sendo valores superiores a 200 indicativos de mesomorfia (Carlquist, 1977). Todos os clones apresentaram valores de IM superiores a esse limite, sendo, portanto, classificados como mesomórficos. Entretanto, no ambiente de menor disponibilidade hídrica, foram observados menores valores de IM, indicando redução do grau de mesomorfia e uma tendência relativa a características mais xeromórficas, sem alterar a classificação dos clones como mesomórficos.

O fato dos materiais genéticos situados em regiões com boa disponibilidade hídrica terem apresentado maior capacidade hidráulica e consequentemente maior chance de embolia, sugere que possíveis ocorrências de eventos de secas prolongados nesses locais podem gerar riscos de falha hidráulica e comprometimento no plantio. No entanto, os mesmos clones vulneráveis a embolia apresentaram maior índice de mesomorfia, isso é, indicaram maior adaptação ao ambiente de clima mais úmido que estão inseridos e maior especificação para condução de água. O estudo de Câmara et al. (2020) corrobora com esses resultados, a arquitetura hidráulica do xilema em clones de *Eucalyptus* apresentou menor índice de vulnerabilidade em região de maior déficit hídrico, ou seja, vasos com menor diâmetro e mais numerosos.

Na Tabela 2 são apresentadas correlações entre densidade, dimensões das árvores e características dos vasos. A densidade da madeira apresentou correlação positiva com a frequência de vasos, negativa com o diâmetro dos vasos, o índice de vulnerabilidade e o índice de mesomorfia. Assim, nos clones avaliados, maiores valores de densidade estiveram associados a maior frequência e menor diâmetro dos vasos, bem como a menores valores de IV e IM, características compatíveis com maior segurança hidráulica. Esse padrão é semelhante ao observado por Lima et al. (2011), que encontraram maior frequência e menor diâmetro de vasos em clones de maior densidade.

Tabela 2 – Análise de correlação entre os parâmetros anatômicas da madeira e índices de segurança hídrica de 06 clones de *Eucalyptus*

	DM	H	CC	FV	DV	IV	IM	k_h
DM	-	-0,65	-0,66	0,68	-0,71	-0,77	-0,81	-0.23 ns
H	-	-	0,47	-0.26 ns	0,55	0,46	0,65	0,33
CC	-	-	-	-0,74	0,78	0,84	0,85	0,43
FV	-	-	-	-	-0.60	-0,93	-0,86	-0.08 ns
DV	-	-	-	-	-	0,79	0,81	0,46
IV	-	-	-	-	-	-	0,97	0.18 ns
IM	-	-	-	-	-	-	-	0.26 ns
kh	-	-	-	-	-	-	-	-

ns: correlação não significativa a um nível de 5% de probabilidade de (p-valor > 0,05). Valores em vermelho representam correlações negativas, enquanto valores em verde representam correlações positivas. DM: densidade da madeira; H: altura (m); Comprimento de vaso com cauda; FV: frequência de vasos ($n°.mm^{-2}$); DV: diâmetro de vasos (µm); IV: Índice de Vulnerabilidade; IM: Índice de Mesomorfia; K_h: Condutividade Hidráulica.

A altura apresentou correlação positiva com o DV, IV e IM, indicando que, entre os clones estudados, árvores de maior altura estiveram associadas a maiores valores dessas características. Por outro lado, a FV apresentou forte correlação negativa com IV e IM, evidenciando que o aumento da frequência esteve associado à redução desses índices. Chambers-Ostler et al. (2023), avaliaram a arquitetura hidráulica em duas espécies do gênero tropical *Cedrela* em relação ao gradiente de disponibilidade de água e altura da árvore. Os resultados encontrados mostraram que a disponibilidade hídrica limitou a altura máxima da

árvore e a altura da árvore ajustou o diâmetro de vasos para manter a condutividade hidráulica ao longo do caule. As árvores mais altas apresentaram vasos maiores, enquanto em locais mais secos, as árvores atingiram alturas menores, desenvolvendo vasos menores e menor vulnerabilidade.

O comprimento da cauda (CC) apresentou correlação positiva com o DV, IV e o IM. Assim, nos materiais analisados, maiores comprimentos de cauda estiveram associados a maiores diâmetros dos vasos e maiores valores de IV e IM. Burger e Richter (1991) relacionam os apêndices das extremidades dos vasos às características fenotípicas e ao desenvolvimento das árvores. Silva e Valle (2026) associam vasos mais curtos, de maior diâmetro e sem apêndices a determinadas estratégias adaptativas. Entretanto, nos clones avaliados neste estudo, a presença de apêndices foi observada em materiais cultivados tanto em ambientes de maior quanto de menor disponibilidade hídrica, não permitindo estabelecer a presença ou ausência dessas estruturas como um padrão único de adaptação às condições ambientais.

Nos materiais avaliados, maiores DV estiveram associados a maiores valores de IV e IM, indicando uma tendência de maior eficiência hidráulica acompanhada de menor segurança do sistema condutor, conforme discutido por Hacke et al. (2022). A condutividade hidráulica (Kh) também apresentou correlação positiva com o DV, associação compatível com os princípios da Lei de Hagen-Poiseuille, segundo os quais a capacidade de condução aumenta com o raio do vaso. Por outro lado, a FV não apresentou correlação significativa com Kh, indicando que, neste conjunto de dados, a variação da condutividade não esteve associada à frequência de vasos.

15. Conclusões

Os resultados indicaram que, nos clones avaliados, as variações na disponibilidade hídrica estiveram associadas às características anatômicas e funcionais dos vasos nos clones de *Eucalyptus*. Nos ambientes com IAM mais negativos, observaram-se, em geral, menores diâmetros e maior frequência de vasos, além de menores índices de vulnerabilidade e mesomorfia, indicando maior segurança hidráulica. A densidade da madeira e a altura das árvores também estiveram associadas aos parâmetros anatômicos dos vasos. Além disso, o comprimento dos apêndices dos vasos apresentou associação positiva com o diâmetro, IV e IM, evidenciando relações entre essas características nos materiais estudados.

16. Agradecimentos

À Fundação de Apoio à Pesquisa do Espírito Santo (FAPES) e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES). Ao ProDM e as empresas afiliadas: CMPC, Suzano, Vallourec e Veracel pelo fornecimento dos materiais genéticos.

17. Referências bibliográficas

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11941: madeira: determinação da densidade básica**. Rio de Janeiro, 2017. 6 p.

Aparecido, L. E. de O.; Torsoni, G. B.; Lima, R. F. de; Lima, G. de S. R.; Mesquita, D. Z. Redefining Eucalyptus cultivation in South America: adaptive strategies under future climate scenarios. **New Forests**, v. 56, n. 4, p. 36, 2025.

Barbosa, T. L.; Oliveira, J. T. da S.; Rocha, S. M. G.; Câmara, A. P.; Vidaurre, G. B.; Rosado, A. M.; Leite, F. P. Influence of site in the wood quality of *Eucalyptus* in plantations in Brazil. **Southern Forests: a Journal of Forest Science**, v. 81, n. 3, p. 247-253, 2019.

Burger, M. L.; Ritcher, H. G. **Anatomia da madeira**. São Paulo: Nobel, 1991

Butler, Jakob B.; Harrison, P. A. ; Vaillancourt, R. E.; Steane, D. A. ; Tibbits, J. F. G. ; Potts, B. M. Climate adaptation, drought susceptibility, and genomic-informed predictions of future climate refugia for the Australian forest tree *Eucalyptus globulus*. **Forests**, v. 13, n. 4, p. 575, 2022.

Câmara, A. P.; Vidaurre, G. B.; Oliveira , J. C. L.; Picoli, E. A. de T.; Almeida, M. N. F.; Roque, R. M.; Filho, M. T.; Souza, H. J. P.; Oliveira, T. R.; Campo, O. C. Changes in hydraulic architecture across a water availability gradient for two contrasting commercial *Eucalyptus* clones. **Forest Ecology and Management**, v. 474, p. 118380, 2020.

Campos, A. J. de M.; Santos, S. M.; Nacarath, I. R. F. F. Water stress in plants: a review. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 15, p. e311101523155-e311101523155, 2021.

Carlquist, S. Ecological factors in wood evolution: a floristic approach. **American journal of botany**, v. 64, n. 7, p. 887-896, 1977.

Chambers-Ostler, A.; Gloor, E.; Galbraith, D.; Groenendijk, P.; Brienen, R. Vessel tapering is conserved along a precipitation gradient in tropical trees of the genus Cedrela. **Trees**, v. 37, n. 2, p. 269-284, 2023.

Chakilu, G. G.; Sándor, S.; Zoltán, T.; Phinzi, K. The patterns of potential evapotranspiration and seasonal aridity under the change in climate in the upper Blue Nile basin, Ethiopia. **Journal of Hydrology**, v. 641, p. 131841, 2024.

Dagar, C. S.; Kumar, A.; Khichar, A. M. L.; Singh, S. Chapter 7 Agrometeorological variables are important for growth, development and potential yield of plants or crops: A Review. **Chief Editor Dr. RK Naresh**, v. 83, p. 99, 2022.

Ewers, F. W.; Jacobsen, A. L.; López-Portillo, J. Carlquist's indices for vulnerability and mesomorphy of wood: are they relevant today?. **IAWA Journal**, v. 44, n. 3-4, p. 355-367, 2023.

Hacke, U. G.; Jacobsen, A. L.; Pratt, R. B. Vessel diameter and vulnerability to drought-induced embolism: within-tissue and across-species patterns and the issue of survivorship bias. **Iawa Journal**, v. 44, n. 3-4, p. 304-319, 2022.

Iawa Committee. International Association of Wood. Anatomists. List of microscope features for hardwood identification. **IAWA Bulletin**, v. 10, n. 3, p. 234-332, 1989.

Li, Y.; Suontama, M.; Burdon, R. D.; Dungey, S. Genotype by environment interactions in forest tree breeding: review of methodology and perspectives on research and application. **Tree Genetics & Genomes**, v. 13, n. 3, p. 60, 2017.

Lima, I. L. et al. Dimensões anatômicas da madeira de *Tectona grandis* Linn. em função do espaçamento e da posição radial do tronco. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 39, n. 89, p. 61-68, mar. 2011.

Qaderi, Mirwais M.; Martel, Ashley B.; Dixon, Sage L. Environmental factors influence plant vascular system and water regulation. **Plants**, v. 8, n. 3, p. 65, 2019.

Ramalho, R. S. **O uso de macerado no estudo anatômico de madeiras**. Viçosa. UFV. p. 4, 1987.

Salimath, S. K.; Hegde, R.; Manasa, C. P. A. review on the effect of climate change on wood anatomical characters. **European Journal of Forest Research**, v. 144, n. 3, p. 655-667, 2025.

Scholz, A.; Klepsch, M.; Karimi, Z.; Jansen, S. How to quantify conduits in wood?. **Frontiers in plant science**, v. 4, p. 56, 2013.

Silva, M. P.; Valle, M. L. A. Análise da densidade básica e parâmetros anatômicos de três espécies madeireiras nativas da Mata Atlântica. **Revista do Instituto Florestal**, v. 38, p. 1-14, 2026.

Thornthwaite, C. W. An approach toward a rational classification of climate. **Geographical Review**, v.38, p.55-94, 1948.

Thornthwaite, C. W.; Holzman, B. Evaporation and transpiration. In: **Climate and Man: Yearbook of Agriculture** - 1941. Washington D.C: U.S. Department of Agriculture, 1941, p.545-550.

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Potencial anatômico de *Brosimum rubescens* para instrumentos musicais de corda

Joelma Araújo Costa[1]; Claudete Catanhede do Nascimento[2]; Jorge Alves Freitas[2]; Claudene Menezes Atayde Calderon[3]; Rafael de Azevedo Calderon[3]; Ausanira dos Santos Dantas[1]

[1] Universidade Federal do Amazonas (UFAM)
[2] Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia (INPA)
[3] Laboratório de Produtos Florestais (LPF)

Resumo: A anatomia da madeira é um critério importante na seleção de espécies para instrumentos de corda, devido à sua relação com propriedades estruturais. Este estudo caracterizou anatomicamente a madeira de *Brosimum rubescens* (pau-rainha), proveniente de manejo comunitário sustentável, e discutiu seu potencial de uso em fundos e laterais, em comparação com *Dalbergia nigra*. Foram realizadas análises anatômicas qualitativas e quantitativas em seções histológicas e lâminas maceradas, com mensuração de vasos, fibras e raios. *B. rubescens* apresentou elevada densidade, fibras mais longas, paredes celulares espessas, vasos de diâmetro moderado e raios mais altos e largos que *D. nigra*, evidenciando similaridades e diferenças anatômicas entre as espécies. Os resultados indicam potencial de *B. rubescens* como alternativa para componentes estruturais, especialmente fundos e laterais, embora estudos físicos, mecânicos e acústicos ainda sejam necessários para confirmar sua aplicação em luteria.

Palavras-chave: Anatomia do lenho; Luteria; Madeiras Amazônicas.

Anatomical potential of *Brosimum rubescens* for string musical instruments

Abstract: Wood anatomy is an important criterion in the selection of species for string instruments because of its relationship with structural properties. This study anatomically characterized the wood of *Brosimum rubescens* (pau-rainha), sourced from community-based sustainable forest management, and discussed its potential use for backs and sides in comparison with *Dalbergia nigra*. Qualitative and quantitative anatomical analyses were performed on histological sections and macerated material, including measurements of vessels, fibers, and rays. *B. rubescens* exhibited high density, longer fibers, thick cell walls, vessels of moderate diameter, and taller and wider rays than *D. nigra*, revealing anatomical similarities and differences between the species. The results suggest that *B. rubescens* has potential as an alternative for structural components, particularly backs and sides, although further studies on physical, mechanical, and acoustic properties are still required to confirm its suitability for lutherie.

Keywords: Wood anatomy; Lutherie; Amazonian woods.

1. Introdução

A anatomia da madeira exerce papel central na definição de suas aplicações tecnológicas, pois a organização e a proporção de vasos, fibras, raios e parênquima influenciam

diretamente as propriedades físicas, mecânicas e funcionais do material (Burger; Richter, 1991; Angyalossy et al., 2005; Lima et al., 2021). No contexto da luteria, essas características se relacionam ao desempenho vibracional, à propagação sonora e à resposta tímbrica dos instrumentos de corda, por influenciarem propriedades como densidade, rigidez e anisotropia da madeira (Wegst, 2006; Dinulică et al., 2021). Assim, os elementos xilemáticos constituem importantes indicadores do potencial estrutural e funcional da madeira para aplicações em instrumentos musicais.

A seleção de madeiras para instrumentos musicais, antes baseada sobretudo na experiência empírica de luthiers e arqueteiros, vem sendo progressivamente complementada por critérios científicos, que consideram, de forma integrada, propriedades anatômicas, físicas, mecânicas e acústicas (Slooten; Souza, 1993; Calvano et al., 2023). Para fundos e laterais dos instrumentos, destacam-se atributos como densidade, módulo de elasticidade e estabilidade dimensional, os quais são influenciados, entre outros fatores, pela organização, proporção e dimensões dos elementos xilemáticos (Wegst, 2006; Longui et al., 2017; Roitman, 2021). Entre as madeiras tradicionalmente empregadas nessa finalidade, destaca-se o jacarandá-da-Bahia (*Dalbergia nigra* (Vell.) Allemão ex Benth., Fabaceae), reconhecido pelo valor estético e pela longa tradição de uso em instrumentos de corda (Carvalho, 2003; Gasson, 2010). Sua inclusão no Apêndice I da CITES, em 1992, impôs rigorosas restrições ao comércio internacional, intensificando a busca por alternativas, e provenientes de manejo sustentável e com potencial para atender aos requisitos estruturais e funcionais exigidos pela luteria (CITES, 1992; UNEP-WCMC, 2020). Nesse cenário, madeiras amazônicas assumem importância estratégica, tanto pela elevada diversidade de espécies, quanto pelo potencial de aplicação em produtos de maior valor agregado, incluindo instrumentos musicais (Slooten; Souza, 1993; Reis et al., 2019; Bessa et al., 2022).

Entre essas espécies, destaca-se o pau-rainha (*Brosimum rubescens* Taub., Moraceae), madeira amazônica de alta densidade, dura, com cerne vermelho intenso e uso tradicional em produtos de maior valor, como movelaria fina e objetos especiais (Sales-Campos et al., 2001; Hayasida et al., 2008). Suas características anatômicas, como porosidade difusa, vasos de pequenos diâmetros, parênquima axial paratraqueal aliforme e raios estreitos, podem influenciar propriedades físicas e mecânicas da madeira, constituindo atributos relevantes para análises comparativas com espécies tradicionalmente empregadas na luteria (Slooten; Souza, 1993; LPF, 2023).

Apesar desse potencial, ainda são escassos os estudos que abordam de forma integrada a anatomia da madeira de *B. rubescens* com foco em sua aptidão para instrumentos de corda, o que limita avaliações mais consistentes sobre sua compatibilidade com características estruturais observadas em madeiras utilizadas para fundos e laterais, especialmente em comparação com referências clássicas como *D. nigra*. Diante disso, este trabalho teve como objetivo caracterizar anatomicamente a madeira de pau-rainha proveniente de manejo comunitário sustentável e discutir seu potencial para aplicação em instrumentos musicais de corda, com ênfase na comparação de suas macros e microcaracterísticas anatômicas com aquelas descritas para madeiras tradicionalmente utilizadas na luteria.

2. Material e métodos

2.1 Amostragem e preparo do material

Amostras de pau-rainha (*B. rubescens*) foram obtidas de discos de 5 cm de espessura retirados a 1,30 m de altura do tronco (DAP ≥ 50 cm) de três árvores em área de manejo florestal comunitário sustentável, em Cruzeiro do Sul, Acre, Brasil (7º47'09,55" S; 73º14'42,33" W). A seleção considerou ocorrência local, valor comercial e características preliminares da madeira. Também foram analisadas amostras de jacarandá-da-Bahia (*D. nigra*), espécie tradicionalmente utilizada em fundos e laterais de instrumentos de corda, empregada como padrão de referência. A identificação foi realizada no Laboratório de Anatomia e Identificação de Madeiras (COTEI/INPA), por procedimentos usuais em anatomia da madeira e confronto com xiloteca. Em laboratório, confeccionaram-se corpos de prova de 15x20x30 mm, orientados nas direções tangencial, radial e longitudinal. A densidade a 12% de umidade foi determinada segundo a NBR 7190 (ABNT, 1997), a partir de medições dimensionais e massa em balança de precisão.

2.2 Análise macroscópica e microscópica do lenho

As avaliações anatômicas seguiram recomendações de Coradin e Muñiz (1992), COPANT (1973) e IAWA Committee (1989). Na análise macroscópica, as superfícies transversais foram aplainadas em micrótomo de deslize e examinadas com lupa de 10x e imagens digitais, avaliando-se parênquima, poros, raios (visibilidade, tamanho e disposição) e caracteres organolépticos. Para a análise microscópica, confeccionaram-se lâminas histológicas e de lenho macerado, determinando comprimento e diâmetro de vasos, comprimento e largura de fibras, diâmetro do lume e espessura de parede das fibras, diâmetro de pontoações intervasculares e raio-vasculares e altura dos raios. As medições (n=25 por parâmetro e por

amostra, totalizando 325 por espécie) foram realizadas em microscópio (Labomed Luxeo 4D:10x) com software Pixel Pro. Os dados foram submetidos à análise estatística descritiva (média, desvio padrão e coeficiente de variação), com verificação de normalidade e homogeneidade de variâncias pelo teste de Shapiro-Wilk e comparação de médias entre espécies pelo teste de Tukey (α=0,05).

3. Resultados e discussão

As principais características anatômicas das madeiras estudadas são apresentadas na Tabela 1. A seguir, são discutidas as macros e microcaracterísticas anatômicas de *B. rubescens*, comparando-as com aquelas descritas para *D. nigra*, visando avaliar seu potencial anatômico para aplicação em instrumentos musicais de corda.

Tabela 1 – Valores médios (± desvio padrão) das características anatômicas dos elementos xilemáticos analisados *B. rubescens* (alternativa potencial) e *D. nigra* (referência tradicional na luteria)

Elementos xilemáticos	**Pau-rainha (*B. rubescens*)**	**Jacarandá-da-Bahia (*D. nigra*)**
Densidade (g/cm³)	1,05 a	0,78 b
Comprimento de vaso (µm)	489,3 ± 101,6 a	207,8 ± 27,9 b
Espessura da parede do vaso (µm)	6,0 ± 1,3 a	6,1 ± 1,9 a
Diâmetro tangencial do poro (µm)	160,6 ± 37,2 a	151,4 ± 29,3 a
Diâmetro da pontoação intervascular (µm)	6,8 ± 1,2 a	9,4 ± 0,9 b
Diâmetro da pontoação raio-vascular (µm)	6,0 ± 0,8 a	8,6 ± 0,9 b
Frequência de vasos (mm^{-2})	6,0 ± 1,9 a	4,8 ± 2,1 b
Comprimento de fibra (µm)	1377,4 ± 137,8 a	1018,8 ± 106,0 b
Largura de fibra (µm)	18,1 ± 2,7 b	22,0 ± 2,8 a
Diâmetro do lume da fibra (µm)	7,3 ± 2,2 b	10,3 ± 2,0 a
Espessura da parede da fibra (µm)	5,4 ± 0,8 a	5,9 ± 1,0 a
Altura do raio (µm)	363,2 ± 89,6 a	129,1 ± 12,0 b
Largura do raio (nº de células)	3,2 ± 0,9 a	1,6 ± 0,5 b
Frequência de raios (mm^{-1})	7,0 ± 1,2 b	17,0 ± 1,9 a

Médias seguidas da mesma letra na linha não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p > 0,05$).

Pau-rainha (*B. rubescens*) apresenta madeira pesada (1,05 g/cm³), dura, cerne vermelho-escuro brilhante, grã direita a levemente revessa e textura fina a média. As camadas de crescimento são pouco distintas, e os vasos apresentam porosidade difusa, ocorrendo predominantemente solitários ou em múltiplos de dois a quatro, frequentemente obstruídos por tilos (Figura 1a).

Microscopicamente, os elementos de vaso variam de curtos a longos, com placa de perfuração simples e pontoações areoladas. As fibras são libriformes, curtas, estreitas a médias, com lume reduzido e paredes espessas, características compatíveis com uma estrutura anatômica compacta. O parênquima axial é predominantemente paratraqueal aliforme simples (Figura 1a). Os raios são poucos frequentes, baixos, heterocelulares e predominantemente multisseriados, não estratificados (Figura 1b e 1c). Observa-se ainda a presença de canais secretores contendo tubos taníferos, além de cristais prismáticos pouco abundantes em células radiais. Jacarandá-da-Bahia (*D. nigra*) apresenta madeira pesada (densidade de 0,78 g/cm³), dura, cerne pardo-escuro arroxeado com listras pretas, textura fina a média e grã direita a irregular. As camadas de crescimento são pouco distintas, delimitadas por parênquima marginal, e os vasos apresentam porosidade difusa, ocorrendo predominantemente solitários ou em múltiplos de dois a quatro, parcialmente obstruídos por substâncias oleorresinosas (Figura 2a).

Microscopicamente, os elementos de vaso são curtos, com placa de perfuração simples e pontoações intervasculares areoladas, alternas e guarnecidas. As fibras são libriformes, muito curtas a curtas, com lume relativamente amplo e paredes espessas. O parênquima axial apresenta disposição variável, incluindo faixas e paratraqueal aliforme frequentemente confluente (Figura 2a). Os raios são muito finos, extremamente baixos, numerosos, predominantemente uni e bisseriados, homocelulares e nitidamente estratificados (Figura 2b e 2c), constituindo o principal traço distintivo da espécie. Não foram observados canais secretores, sendo registradas apenas inclusões de cristais prismáticos em células de parênquima axial.

As Figuras 1 e 2 ilustram os principais elementos xilemáticos nas seções transversal, tangencial e radial das madeiras analisadas.

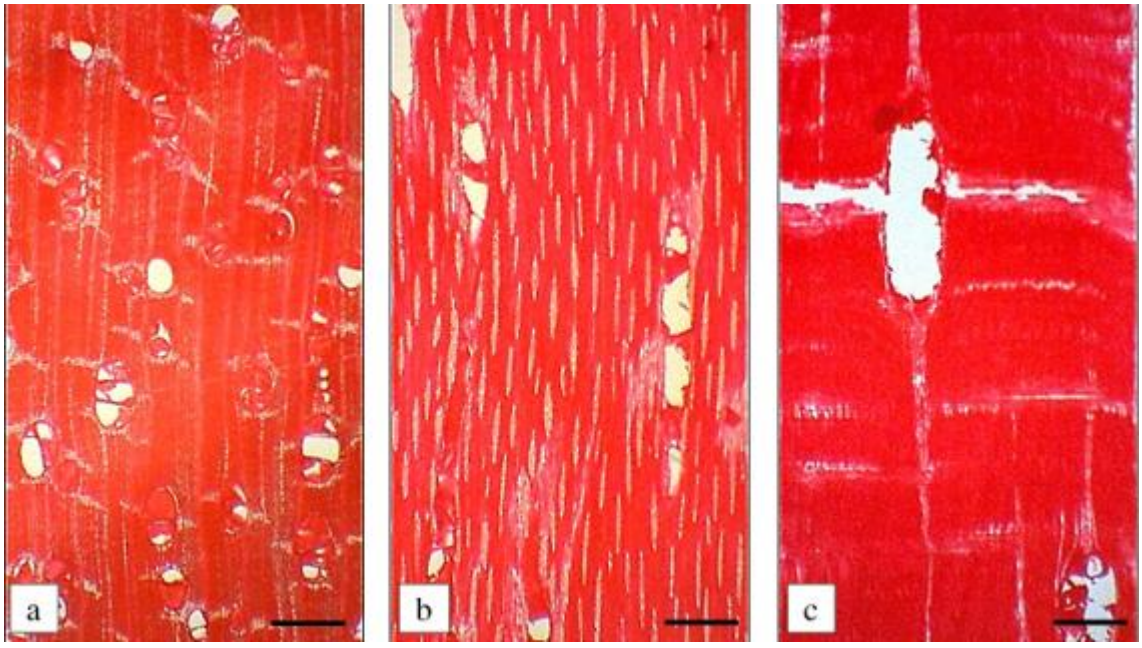


Figura 1 – *Brosimum rubescens* (pau-rainha). (a) Seção transversal com parênquima aliforme simples e vasos obstruídos por tilos. (b) Seção tangencial com raios bisseriados, não estratificados. (c) Seção radial com raios formados por células eretas e quadradas. Barra = 250 µm.

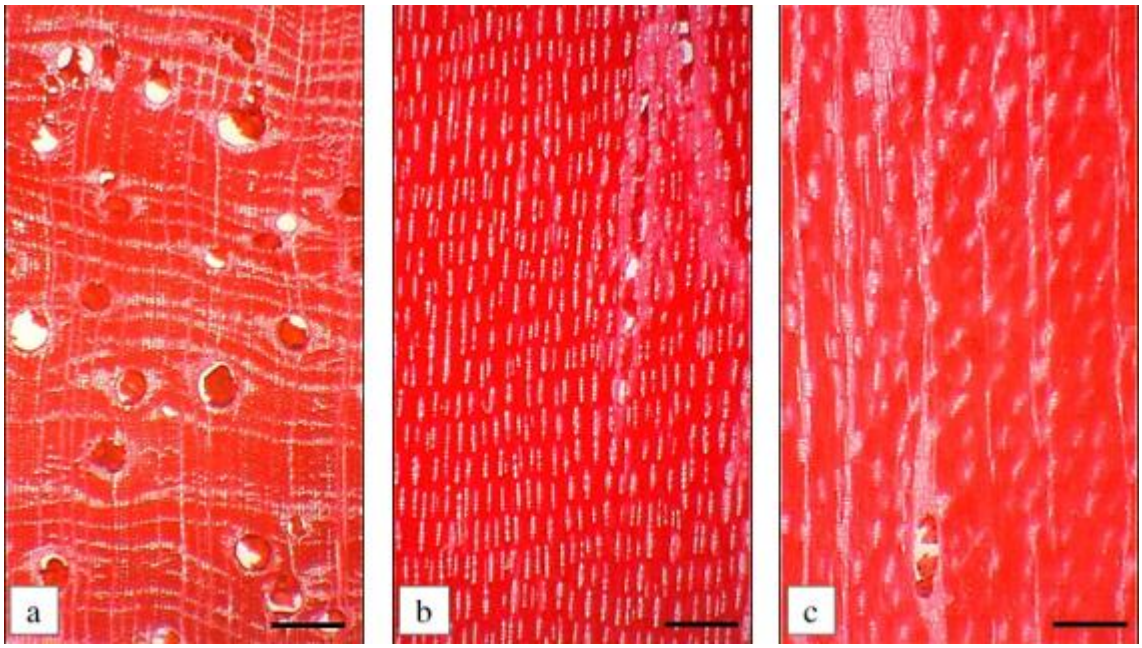


Figura 2 – *Dalbergia nigra* (jacarandá-da-Bahia). (a) Seção transversal com parênquima em faixas e vasos obstruídos por substâncias oleorresinosas. (b) Seção tangencial com raios uni e bisseriados, estratificados. (c) Seção radial com raios formados por células procumbentes. Barra = 250 µm.

As análises quantitativas evidenciaram diferenças entre pau-rainha e jacarandá-da-Bahia em diversas características anatômicas dos elementos xilemáticos. O pau-rainha apresentou vasos significativamente mais longos que *D. nigra*, bem como fibras de maior comprimento, enquanto o diâmetro tangencial dos vasos não diferiu entre as espécies. A combinação de baixa frequência de vasos, predominância de fibras e elementos de lenho mais longos tem sido associada, na literatura, a desempenho mecânico e acústico superior (Alves et al., 2008). Nesse contexto, as características anatômicas observadas em *B. rubescens* sugerem potencial para aplicações estruturais em instrumentos musicais; entretanto, avaliações específicas dessas propriedades ainda são necessárias para sua confirmação.

Diferenças adicionais foram observadas nas pontoações. Pau-rainha apresentou pontoações intervasculares e raio-vasculares com diâmetros estatisticamente inferiores aos de *D. nigra*, embora o diâmetro tangencial dos poros tenha permanecido semelhante entre as espécies. Essas diferenças indicam variações na organização anatômica do sistema vascular, as quais podem influenciar propriedades físicas e mecânicas da madeira. Entretanto, os efeitos dessas características sobre o comportamento vibracional dependem de outros fatores, como densidade, propriedades elásticas e composição da parede celular, não avaliados neste estudo.

No nível fibroso, pau-rainha apresentou fibras mais estreitas e com lúmen menor, enquanto *D. nigra* exibiu fibras mais largas e com lúmen mais amplo; a espessura da parede das fibras não diferiu de forma significativa entre as espécies. Diferenças na proporção entre lume e parede celular podem influenciar propriedades físicas e mecânicas da madeira e têm sido relacionadas, em alguns estudos, ao comportamento vibracional do material (Wegst, 2006; Brémaud et al., 2012). Assim, *B. rubescens* aproxima-se de *D. nigra* quanto à espessura da parede das fibras, diferindo principalmente pelas menores dimensões do lume e maior comprimento das fibras. Essas características anatômicas podem contribuir para diferenças nas propriedades físicas e mecânicas da madeira e indicam potencial para aplicações que demandem elevada rigidez estrutural. Entretanto, a influência dessas características sobre o desempenho acústico somente poderá ser confirmada mediante ensaios específicos de propriedades elásticas e vibracionais.

A principal diferença anatômica entre as espécies está na arquitetura dos raios. Pau-rainha apresentou raios mais altos e mais largos (multisseriados), em menor frequência por milímetro linear, enquanto *D. nigra* apresentou raios muito baixos, estreitos, numerosos e estratificados. Estudos indicam que raios baixos e numerosos promovem distribuição mais uniforme de descontinuidades radiais, contribuindo para comportamento vibracional mais

equilibrado, especialmente em frequências médias e altas. Já raios mais altos e menos frequentes indicam heterogeneidade radial mais pronunciada, com potencial para resposta tonal relativamente mais voltada a frequências graves e médias, com assinatura acústica própria (Coradin; Muñiz, 1991; Wegst, 2006; Calvano et al., 2023).

Em conjunto, os resultados mostram que *B. rubescens* compartilha com *D. nigra* diversas características anatômicas, como paredes celulares espessas, vasos de diâmetro moderado e organização anatômica semelhante à de madeiras tradicionalmente empregadas na luteria, além de apresentar diferenças no comprimento dos elementos celulares, na geometria das fibras e na arquitetura dos raios. Associadas à elevada densidade observada para a espécie, essas características indicam potencial para aplicação em instrumentos musicais de corda, especialmente em componentes estruturais como fundos e laterais. Entretanto, a confirmação desse potencial requer avaliações complementares das propriedades físicas, mecânicas e acústicas da madeira. Considerando que *D. nigra* permanece sob rigorosas restrições ao comércio internacional, torna-se relevante a busca por espécies alternativas provenientes de manejo sustentável. Estudos têm demonstrado que a similaridade de características anatômicas e físicas constitui um importante critério para a prospecção de madeiras com potencial tecnológico para aplicações na luteria (Slooten; Souza, 1993; Bessa et al., 2022; Calvano et al., 2023).

Dessa forma, os resultados obtidos neste estudo indicam que *B. rubescens*, proveniente de manejo comunitário sustentável, apresenta potencial como espécie alternativa para utilização em fundos e laterais de instrumentos de corda. Entretanto, a confirmação dessa aplicação depende da realização de estudos complementares que integrem a caracterização anatômica com avaliações físicas, mecânicas e acústicas da madeira, bem como ensaios em instrumentos acabados, preferencialmente em parceria com luthiers, de modo a validar seu desempenho comparação com madeiras tradicionalmente empregadas na luteria.

4. Conclusões

Os resultados deste estudo demonstram que *Brosimum rubescens* apresenta características anatômicas compatíveis com madeiras tradicionalmente empregadas na luteria, destacando-se pelas dimensões dos elementos xilemáticos, arquitetura de raios e elevada densidade. Em comparação com *Dalbergia nigra*, a espécie apresentou similaridades e diferenças anatômicas que indicam potencial para aplicação em componentes estruturais de instrumentos musicais de corda, como fundos e laterais. Considerando as restrições impostas ao

uso de *D. nigra* e a necessidade de espécies provenientes de manejo sustentável, *B. rubescens* constitui uma alternativa promissora, cuja viabilidade tecnológica deverá ser confirmada por estudos complementares envolvendo propriedades físicas, mecânicas e acústicas, bem como avaliações em instrumentos acabados.

5. Agradecimentos

Os autores agradecem à CAPES/Brasil (PIPD-PPGCIFA/UFAM) pelo apoio financeiro, ao LEAM/INPA pela infraestrutura laboratorial e à UFAM pelo suporte institucional.

6. Referências bibliográficas

Alves, E. S., Longui, E. L., & Amano, E. (2008). Pernambuco wood (*Caesalpinia echinata*) used in the manufacture of bows for string instruments. *IAWA Journal, 29*(3), 323–335.

Angyalossy, V., Amano, E., & Alves, E. S. (2005). Madeiras utilizadas na fabricação de arcos para instrumentos de corda: Aspectos anatômicos. *Acta Botanica Brasilica, 19*(4), 819–834.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. (1997). *NBR 7190: Projeto de estruturas de madeira*. ABNT.

Bessa, F., Sousa, V., Quilhó, T., & Pereira, H. (2022). An integrated similarity analysis of anatomical and physical wood properties of tropical species from India, Mozambique, and East Timor. *Forests, 13*(10), 1675. https://doi.org/10.3390/f13101675

Brémaud, I., El Kaïm, Y., Guibal, D., Minato, K., Thibaut, B., & Gril, J. (2012). Characterisation and categorisation of the diversity in viscoelastic vibrational properties between 98 wood types. *Annals of Forest Science, 69*(3), 373–386.

Burger, L. M., & Richter, H. G. (1991). *Anatomia da madeira*. Nobel.

Calvano, S., Negro, F., Ruffinatto, F., Zanuttini-Frank, D., & Zanuttini, R. (2023). Use and sustainability of wood in acoustic guitars: An overview based on the global market. *Heliyon, 9*(4), e15218. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e15218

Carvalho, P. E. R. (2003). *Espécies arbóreas brasileiras*. Embrapa Florestas.

Comisión Panamericana de Normas Técnicas (COPANT). (1973). *COPANT: Normas para descrição anatômica da madeira*.

Convention on International Trade in Endangered Species of Wild Fauna and Flora. (1992). *Amendments to Appendices I and II of the Convention adopted by the Conference of the*

Parties at its eighth meeting, Kyoto, Japan, 2–13 March 1992. https://cites.org/sites/default/files/eng/cop/08/E-Amendments.pdf

Coradin, V. T. R., & Muñiz, G. I. B. (1991). *Normas e procedimentos de estudos de anatomia de madeira: I. Angiospermae. II. Gimnospermae* (LPF – Série Técnica n. 15). IBAMA.

Dinulică, F., Stanciu, M. D., & Savin, A. (2021). Correlation between anatomical grading and acoustic–elastic properties of resonant spruce wood used for musical instruments. *Forests, 12*(8), 1122. https://doi.org/10.3390/f12081122

Gasson, P., Miller, R., Stekel, D. J., Whinder, F., & Ziemińska, K. (2010). Wood identification of *Dalbergia nigra* (CITES Appendix I) using quantitative wood anatomy, principal components analysis and naïve Bayes classification. *Annals of Botany, 105*(1), 45–56. https://doi.org/10.1093/aob/mcp270

Hayasida, W., Sousa, A. S. D., Lima, M. P., Nascimento, C. C., & Ferreira, A. G. (2008). Proposta de aproveitamento em resíduos de pau-rainha (*Brosimum rubescens*) descartados pelo setor madeireiro. *Acta Amazonica,38(4): 749 - 752*.

IAWA Committee. (1989). List of microscopic features for hardwood identification. *IAWA Bulletin, 10*, 219–332.

Laboratório de Produtos Florestais. (2023). *Brosimum rubescens – Banco de dados Madeiras Brasileiras*. Serviço Florestal Brasileiro. https://lpf.florestal.gov.br/pt-br/madeiras-brasileiras

Lima, P. A. F., Dias, V. S., Jesus, A. N. M., Santos, A. M., Vieira, T. S., Melo, J. A. S., Lima, J. F., Alves, T. S., Sousa, K. G. A., & Silva, V. M. (2021). Características anatômicas e suas influências nas propriedades da madeira: Um referencial teórico. Em W. V. Evangelista (Ed.), *Madeiras nativas e plantadas do Brasil: Qualidade, pesquisas e atualidades* (Vol. 2, pp. 14–31). Editora Científica.

Longui, E. L., Moureira, J. A., Lombardi, D. R., Silva Júnior, F. G., & Alves, E. S. (2017). Potential use of *Libidibia ferrea* and *Poincianella pluviosa* woods for bows of string instrument. *European Journal of Wood and Wood Products, 76*, 357–368.

Reis, P. C. M., Reis, L. P., Souza, A. L., Carvalho, A. M. M. L., Mazzei, L., Reis, A. R. S., & Torres, C. M. M. E. (2019). Agrupamento de espécies madeireiras da Amazônia com base em propriedades físicas e mecânicas. *Ciência Florestal, 29*, 336–346.

Roitman, L. (2021). *Avaliação das propriedades de sete espécies de madeiras da Amazônia brasileira para fabricação de instrumentos musicais* (Dissertação de mestrado). Universidade de Brasília.

Sales-Campos, C., Mendonça, M. S., & Vianez, B. F. (2001). Influência da estrutura anatômica de *Brosimum rubescens* Taub. (Moraceae) no processo de microdistribuição do CCA-A. *Acta Amazonica, 31*(4), 615–631.

Slooten, H. J. van der, & Souza, M. R. (1993). *Avaliação das espécies madeireiras da Amazônia selecionadas para a manufatura de instrumentos musicais*. INPA.

UNEP-WCMC. (2020). *CITES species checklist (Appendices I, II and III)*. https://checklist.cites.org

Wegst, U. G. K. (2006). Wood for sound. *American Journal of Botany, 93*(10), 1439–1448. https://doi.org/10.3732/ajb.93.10.1439

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Potencial Antifúngico do Extrato da Madeira de *Mimosa tenuiflora* frente à Cepa de *Candida albicans*

Ana Helise Abreu Rodrigues da Silva[1]; Ana Cristina Almeida dos Santos[1]; Michael Araujo Rodrigues[1]; Carlos Augusto Cardoso Fernandes[1]; Rosimeire Cavalcante dos Santos[2]; Águida Aparecida de Oliveira[1]; Fernanda de Nobrega Medeiros[1]; Natália Dias de Souza[1]

[1] Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (UFRRJ)
[2] Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN)

Resumo: A candidíase invasiva representa um importante desafio de saúde pública devido ao aumento de cepas de *Candida albicans* resistentes aos azóis, tornando necessária a busca por novos agentes antifúngicos de origem natural. Este estudo avaliou o potencial antifúngico do extrato metanólico da madeira de *Mimosa tenuiflora* (Willd.) Poir. frente a *C. albicans*. A madeira foi coletada na Fazenda Milhã/Poço da Pedra, Rio Grande do Norte, Brasil, moída e submetida à extração sequencial com cicloexano, acetato de etila e metanol. A atividade antifúngica do extrato metanólico foi determinada pelo método de microdiluição em caldo (CLSI M27-A3), utilizando a cepa de referência *C. albicans* ATCC 90028. A Concentração Inibitória Mínima (CIM) foi determinada por ensaio colorimétrico com resazurina, empregando Itraconazol e Anfotericina B como controles. O extrato apresentou CIM de 1,88 mg/mL e foi capaz de inibir uma cepa resistente ao Itraconazol (CIM > 0,016 mg/mL), enquanto a Anfotericina B apresentou CIM de 0,004 mg/mL. Embora o extrato bruto tenha apresentado potência inferior aos antifúngicos convencionais, sua atividade frente a um fenótipo resistente sugere mecanismos de ação alternativos, indicando que a madeira de *M. tenuiflora* constitui uma fonte biotecnológica promissora para o desenvolvimento de novos antifúngicos.

Palavras-chave: Candidíase; Azóis; Resistência antifúngica

Antifungal Potential of *Mimosa tenuiflora* Wood Extract Against *Candida albicans* Strains Resistant to Itraconazole

Abstract: Invasive candidiasis represents a major public health challenge due to the increasing prevalence of azole-resistant *Candida albicans* strains, highlighting the need to identify new antifungal agents from natural sources. This study evaluated the antifungal potential of the methanolic wood extract of *Mimosa tenuiflora* (Willd.) Poir. against *C. albicans*. Wood samples were collected from Fazenda Milhã/Poço da Pedra, Rio Grande do Norte, Brazil, ground, and subjected to sequential extraction with cyclohexane, ethyl acetate, and methanol. The antifungal activity of the methanolic extract was assessed using the broth microdilution method according to the CLSI M27-A2 guideline, employing the reference strain *C. albicans* ATCC 90028. The Minimum Inhibitory Concentration (MIC) was determined by a resazurin-based colorimetric assay, using itraconazole and amphotericin B as control antifungal agents. The methanolic extract exhibited an MIC of 1880 µg/mL and was able to inhibit an itraconazole-resistant strain (MIC > 0,016 mg/mL), whereas amphotericin B showed an MIC of 0.004 mg/mL. Although the crude extract displayed lower potency than conventional antifungal drugs, its activity against an azole-resistant phenotype suggests alternative mechanisms of action. These findings indicate that *M. tenuiflora* wood is a promising biotechnological source for the development of novel antifungal agents.

Keywords: Candidiasis; Azoles; Antifungal resistance

1. Introdução

A candidíase invasiva representa um desafio de saúde pública, caracterizada por taxas de mortalidade alarmantes (aproximadamente 40 %) e uma incidência global crescente, impulsionada pelo aumento da população imunocomprometida (Parslow et al., 2022; Kothalawala et al., 2019). O principal agente etiológico, *Candida albicans*, é um comensal que, sob desequilíbrio homeostático, transita para uma forma patogênica agressiva (Ponde et al., 2021). A patogenicidade de *C. albicans* é exacerbada por sua notável capacidade de formar biofilmes em tecidos e dispositivos médicos (Gómez-Gaviria et al., 2023). Estas estruturas complexas conferem ao fungo uma recalcitrância intrínseca aos mecanismos de defesa do hospedeiro e às terapias antifúngicas convencionais (Fan et al., 2022).

O cenário clínico é agravado pela pressão seletiva do uso extensivo de antifúngicos, culminando na emergência global de cepas resistentes (Talapko et al., 2021). Diante da escassez de opções terapêuticas eficazes contra biofilmes e cepas resistentes, o desenvolvimento de novos agentes tornaram-se prioridades máximas (Parslow et al., 2022). Neste contexto, a prospecção de fitoquímicos bioativos emerge como uma estratégia promissora, oferecendo moléculas de amplo espectro, baixa toxicidade e mecanismos de ação inovadores que visam a virulência fúngica em vez de apenas a viabilidade celular (Ribeiro et al., 2018).

A *Mimosa tenuiflora* (Willd.) Poir. (jurema preta), uma espécie endêmica da Caatinga, destaca-se na etnofarmacologia brasileira pelo seu uso no tratamento de infecções e feridas (Cruz et al., 2016). Seu perfil fitoquímico é rico em metabólitos secundários bioativos, notadamente taninos e flavonoides (Crepaldi et al., 2022), que sustentam diversas atividades biológicas (Rizwan et al., 2022). Estudos prévios validaram o potencial da espécie, demonstrando atividade antifúngica da casca contra *Aspergillus flavus* e dermatófitos (*Trichophyton spp.*), além de eficácia antibacteriana contra organismos formadores de biofilme (Hernandez et al., 2021; Biasi-Garbin et al., 2016; Macêdo-Costa et al., 2018).

Apesar do potencial antimicrobiano estabelecido para a casca e folhas, não há uma investigação das propriedades da madeira (lenho) de *M. tenuiflora* contra patógenos humanos como *C. albicans*. A madeira de espécies da Caatinga é uma fonte rica em extrativos que conferem durabilidade à planta (Dias et al., 2019; Zidanes et al., 2025), sugerindo um perfil químico distinto e inexplorado de compostos bioativos que podem atuar contra leveduras oportunistas.

Dessa forma, o presente estudo teve como objetivo avaliar o potencial antifúngico inexplorado do extrato da madeira de *Mimosa tenuiflora* contra *Candida albicans*.

2. Material e métodos

Material

O estudo foi desenvolvido na Fazenda Milhã/Poço da Pedra, localizada no estado do Rio Grande do Norte (RN), Brasil. O empreendimento rural é de propriedade particular e possui 1.132,78ha de mata nativa de Caatinga sob manejo florestal sustentável, está situada nas coordenadas 5°35'47.3"S 35°51'59.6"W, na região Agreste, microrregião de Serra Verde/RN. Foram derrubadas três árvores da espécie *M. tenuiflora* (jurema preta), sendo retirados de cada árvore discos de madeira nas posições de 0 % (junto ao colo da árvore), 25 %, 50 %, 75 % e 100 % da altura comercial. Sendo, portanto, uma amostra de cada árvore, totalizando três amostras para o estudo.

Preparo dos extrativos da madeira

Os discos de madeira foram descascados e cavaqueados, excluindo as regiões defeituosas, e em seguida os cavacos sadios foram processados em moinho de facas tipo Willey. A fração que foi utilizada para o preparo dos extrativos foi referente a porção que atravessou a peneira de malha 40 mesh e que se manteve retida na peneira de 60 mesh como preconiza a norma da Technical Association of the Pulp and Paper Industry (TAPPI, 1997).

Foram adicionados 10g de madeira seca homogeneizada de cada amostra em diferentes cartuchos de papel filtro e em seguida os mesmos cartuchos foram submetidos a três processos de extrações sucessivas com os solventes ciclo hexano, acetato de etila e metanol por 12 horas em aparelho soxhlet, utilizando-se 250 mL de solvente por cada extração. Após esse período tabela, contando com um rotavapor, o material contido no balão no qual continha o material solúvel foi concentrado. Os extratos foram transferidos para um recipiente e levados a capela até a completa evaporação do solvente em temperatura ambiente (Abreu et al., 2006).

Avaliação da Atividade Antifúngica através da determinação da concentração inibitória mínima (CIM)

A suscetibilidade antifúngica foi avaliada pelo método de microdiluição em caldo, conforme o método de microdiluição em caldo, conforme o protocolo M27-A3 do CLSI (2008) Utilizou-se a cepa de referência *Candida albicans* (ATCC 90028), previamente reativada em

ágar Sabouraud dextrose (35 °C/24 h). O inóculo foi padronizado espectrofotometricamente (530 nm) e diluído em meio RPMI-1640 (tamponado com MOPS, pH 7.0 e filtrado a 0.22 µm) para atingir uma concentração final nos poços de 1.0 a 5.0 x 10^3 UFC/mL.

O ensaio foi conduzido em microplacas de 96 poços, onde o extrato metanólico e os controles positivos (itraconazol e anfotericina B) foram solubilizados em um veículo de DMSO/Tween 80/RPMI (1:1:8). Realizou-se uma diluição seriada (razão 2), estabelecendo faixas de concentração de 7.5 a 0.015 mg/mL para o extrato e de 16 a 0.031 µg/mL para os fármacos. O sistema incluiu controles de esterilidade, crescimento e interferência do solvente.

Após incubação a 35 °C por 48 horas, a leitura foi realizada por método colorimétrico mediante a adição de 20 µL de resazurina (0.01 mg/mL) e reincubação por 2 horas. A CIM foi definida como a menor concentração capaz de inibir a atividade metabólica fúngica, evidenciada pela manutenção da coloração azul (estado oxidado) do indicador em contraste com a cor rosa (estado reduzido) do crescimento positivo. Os ensaios foram realizados em triplicata, em três experimentos independentes.

3. Resultados e discussão

A partir das extrações realizadas com a madeira de *M. tenuiflora* foram encontrados os teores de extrativos descritos na Tabela 1 para cada solvente utilizado no procedimento.

Tabela 1 – Teores de extrativos obtidos da madeira de *M. tenuiflora* utilizando solventes orgânicos.

Solventes	Teor de Extrativos (%)
Acetato de Etila	2,890
Metanol	6,974
Cicloexano	0,149
Extrativos totais	10,013

O Metanol foi o solvente que obteve maior rendimento na extração. Em relação ao valor de extrativos totais, apresenta-se inferior ao indicado por Batista (2020), que apresentou um teor de 14,62%, essa diferença pode ser explicada por diferença na idade dos indivíduos em ambas as pesquisas.

A Tabela 2 apresenta a atividade antifúngica do extrato metanólico da madeira de *Mimosa tenuiflora* frente à levedura *Candida albicans* (ATCC 90028), determinada pelo método da Concentração Inibitória Mínima.

Tabela 2 – Concentração Inibitória Mínima (CIM) em mg/mL do extrato da madeira de *M. tenuiflora* sobre o fungo de *Candida albicans* (ATCC 90028).

Tratamento	Tipo de extrato	*Candida albicans*
Itraconazol	Controle	-
Anfotericina B	Controle	0,004
Extrato *M. tenuiflora*	Metanol	1,88

(-) não houve inibição do fungo

A avaliação da atividade antifúngica revelou que o extrato metanólico da madeira de *Mimosa tenuiflora* inibiu o crescimento de *Candida albicans* (ATCC 90028) com uma Concentração Inibitória Mínima (CIM) de 1,88 mg/mL. A relevância deste resultado é verificada ao se confrontar o perfil de suscetibilidade da cepa frente aos controles.

Enquanto a Anfotericina B manteve sua alta atividade inibitória/antifúngica (CIM = 0,004 mg/mL), o Itraconazol falhou em inibir o crescimento fúngico. Este dado confirma a resistência desta cepa ao Itraconazol, corroborando o cenário de crise descrito por Kothalawala et al. (2019) e Talapko et al. (2021), que alertam para a crescente ineficácia terapêutica desta classe. Portanto, a capacidade do extrato de madeira de *M. tenuiflora* de inibir uma cepa recalcitrante ao Itraconazol sugere que seus constituintes bioativos operam por mecanismos distintos, atendendo à necessidade urgente de novas classes antifúngicas enfatizada por Parslow e Thornton (2022).

Embora a CIM de 1,88 mg/mL seja numericamente superior à do fármaco purificado, a comparação direta entre uma matriz complexa e um composto isolado deve ser ponderada. Ao contextualizar com a literatura da própria espécie, nota-se que a sensibilidade fúngica é dependente do patógeno, Biasi-Garbin et al. (2016) reportaram CIMs mais baixas (0,156 – 2,50 mg/mL) para extratos de *M. tenuiflora* contra dermatófitos (Trichophyton spp.). Essa discrepância indica que leveduras do gênero *Candida* podem possuir barreiras de parede celular ou mecanismos de efluxo mais robustos contra os fitoquímicos desta planta do que os fungos filamentosos.

A atividade inibitória observada encontra respaldo na abrangente constituição fitoquímica da *M. tenuiflora*. Crepaldi et al. (2022) e Nascimento et al. (2016) destacam a eficiência do metanol na extração de fenóis, flavonoides e taninos desta espécie, indicando que estes grupos são os prováveis mediadores da ação antifúngica. Especificamente sobre os flavonoides, Borges et al. (2017) identificaram a catequina na planta, uma molécula que, segundo Dufossé et al. (2021), possui atividade comprovada na perturbação da homeostase iônica e integridade da

parede celular fúngica. Similarmente, Hernandez et al. (2021) e Guo et al. (2021) demonstraram que taninos condensados da casca são capazes de inibir processos metabólicos complexos, como a síntese de micotoxinas em *Aspergillus flavus*.

Adicionalmente, a perspectiva terapêutica deste extrato pode exceder a ação fungistática direta. Macêdo-Costa et al. (2018) já documentaram a eficácia antibacteriana de *M. tenuiflora* contra organismos formadores de biofilme, enquanto Rizwan et al. (2022) e Cruz et al. (2016) validaram suas propriedades anti-inflamatórias. Com base nessas evidências, é plausível supor que seus metabólitos atuem na modulação de fatores de virulência de *C. albicans*, como a adesão celular, ou na resposta imune do hospedeiro. Esta abordagem "anti-virulência" alinha-se com as estratégias modernas de desenvolvimento de fármacos propostas por Nasim et al. (2022), posicionando a madeira de *M. tenuiflora* como uma fonte promissora para a prospecção de moléculas líderes capazes de atuar em sinergismo (polypharmacology) com terapias existentes.

4. Conclusões

O presente estudo valida o potencial antifúngico do extrato metanólico da madeira de *Mimosa tenuiflora* (Willd.) Poir contra *Candida albicans*. Embora a atividade inibitória direta (CIM de 1,88 mg/mL) seja moderada em comparação a fármacos isolados, a capacidade do extrato de inibir o crescimento de uma cepa que se mostrou resistente ao Itraconazol constitui um achado de significativa relevância clínica. Portanto, a madeira de *M. tenuiflora* emerge como uma fonte pouco explorada para investigações futuras que visem não apenas o isolamento de moléculas líderes, mas também a avaliação de efeitos sobre a virulência fúngica e o sinergismo com terapias convencionais.

5. Agradecimentos

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela concessão da bolsa de Iniciação Científica, que possibilitou o desenvolvimento desta pesquisa.

6. Referências bibliográficas

ABREU, H. S.; CARVALHO, A. M.; MONTEIRO, M. B. O.; PEREIRA, R. P. W.; SILVA, H. R.; SOUZA, K. C. A.; AMPARO, K. F.; CHALITA, D. B. Métodos de análise química da madeira: Métodos de análise química utilizados no Laboratório de Química da Madeira do Departamento de Produtos Florestais do Instituto de Florestas da UFRRJ. Série

Técnica Floresta e Ambiente, Seropédica, p. 1-20, 2006. Disponível em: https://app.periodikos.com.br/article/587fb4d30e88251a6ab65ffe/pdf/stfloram-0-1.pdf.

Batista, F. G. (2020). Resistência natural de madeiras de cinco espécies do bioma Caatinga em ensaio de campo [Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Norte]. Repositórios Latino-Americanos. https://repositorioslatinoamericanos.uchile.cl/items/8ddfd632-c942-4a34-b0f6-0e3ce52e3495

BIASI-GARBIN, R. P.; DEMITTO, F. de O.; AMARAL, R. C. R. do; FERREIRA, M. R. A.; SOARES, L. A. L.; SVIDZINSKI, T. I. E.; BAEZA, L. C.; YAMADA-OGATTA, S. F. Antifungal potential of plant species from Brazilian Caatinga against dermatophytes. Revista do Instituto de Medicina Tropical de São Paulo, v. 58, e. 18, 2016. DOI: https://doi.org/10.1590/S1678-9946201658018.

BORGES, I. V.; CAVALCANTI, L. S.; NETO, A. F.; ALMEIDA, J. R. G. da S.; ROLIM, L. A.; ARAÚJO, E. C. da C. Identification of the antimicrobial fraction of Mimosa tenuiflora extract. Comunicata Scientiae, [S. l.], v. 8, n. 1, p. 155-164, 2017. DOI: https://doi.org/10.14295/cs.v8i1.1493.

Clinical and Laboratory Standards Institute. (2008). *Reference method for broth dilution antifungal susceptibility testing of yeasts: Approved standard* (3rd ed.; CLSI document M27-A3). Clinical and Laboratory Standards Institute.

CREPALDI, A. L.; BISPO, A. S. da R.; CRUZ, D. C. B.; TAVECHIO, W. L. G.; ARAÚJO, F. M.; ROCHA, T. V. S.; ANDRADE, J. P.; EVANGELISTA-BARRETO, N. S. Phytochemical screening, toxicity and antimicrobial activity of different Mimosa tenuiflora extracts on Aeromonas strains. Semina: Ciências Agrárias, [S. l.], v. 43, n. 2, p. 641–656, 2022. DOI: https://doi.org/10.5433/1679-0359.2022v43n2p641.

CRUZ, M. P.; ANDRADE, C. M. F.; SILVA, K. O.; SOUZA, E. P. de; YATSUDA, R.; MARQUES, L. M.; DAVID, J. P.; DAVID, J. M.; NAPIMOGA, M. H.; CLEMENTE-NAPIMOGA, J. T. Antinoceptive and anti-inflammatory activities of the ethanolic extract, fractions and flavones isolated from Mimosa tenuiflora (Willd.) Poir (Leguminosae). PLoS ONE, v. 11, n. 3, e0150839, 2016. DOI: https://doi.org/10.1371/journal.pone.0150839.

DIAS, A. F.; ANDRADE, C. R.; PROTÁSIO, T. de P.; BRITO, J. O.; TRUGILHO, P. F.; OLIVEIRA, M. P.; DAMBROZ, G. B. V. Thermal profile of wood species from the brazilian semi-arid region submitted to pyrolysis. Cerne, v. 25, n. 1, p. 44-53, 2019. DOI: https://doi.org/10.1590/01047760201925012602

DUFOSSÉ, L.; FOUILLAUD, M.; CARO, Y. Fungi and Fungal Metabolites for the Improvement of Human and Animal Nutrition and Health. Journal of Fungi, v. 7, n. 4, e. 274, 2021. DOI: https://doi.org/10.3390/jof7040274.

FAN, F.; LIU, Y.; LIU, Y.; LV, R.; SUN, W.; DING, W.; CAI, Y.; LI, W.; LIU, X.; QU, W. Candida albicans biofilms: antifungal resistance, immune evasion, and emerging therapeutic strategies. International Journal of Antimicrobial Agents, v. 60, n. 5–6, p. 106673, 2022. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ijantimicag.2022.106673.

GÓMEZ-GAVIRIA, M.; RAMÍREZ-SOTELO, U.; MORA-MONTES, H. M. Non-albicans Candida species: immune response, evasion mechanisms, and new plant-derived alternative therapies. Journal of Fungi, v. 9, n. 1, p. 11, 2023. DOI: https://doi.org/10.3390/jof9010011.

GUO, J.; ZHANG, M.; QIAO, D.; SHEN, H.; WANG, L.; WANG, D.; LI, L.; LIU, Y.; LU, H.; WANG, C.; DING, H.; ZHOU, S.; ZHOU, W.; WEI, Y.; ZHANG, H.; XI, W.; ZHENG, Y.; WANG, Y.; TANG, R.; ZENG, L.; XU, H.; WU, W. Prevalence and antifungal susceptibility of Candida parapsilosis species complex in Eastern China: a 15-year retrospective study by ECIFIG. Frontiers in Microbiology, v. 12, e. 644000, 2021. DOI: https://doi.org/10.3389/fmicb.2021.644000.

HERNANDEZ, C.; CADENILLAS, L.; MAGHUBI, A. E.; CACERES, I.; DURRIEU, V.; MATHIEU, C.; BAILLY, J.-D. Mimosa tenuiflora aqueous extract: role of condensed tannins in anti-aflatoxin B1 activity in Aspergillus flavus. Toxins, v. 13, n. 6, e. 391, 2021. DOI: https://doi.org/10.3390/toxins13060391.

KOTHALAWALA, M.; JAYAWEERA, J. A. A. S.; ARUNAN, S.; JAYATHILAKE, A. C.; JUDE, P. J. The emergence of non-albicans candidemia and evaluation of HiChrome Candida differential agar and VITEK2 YST® platform for differentiation of Candida bloodstream isolates in teaching hospital Kandy, Sri Lanka. BMC Microbiology, v. 19, e. 136, 2019. DOI: https://doi.org/10.1186/s12866-019-1518-3.

MACÊDO-COSTA, M. R.; SANTOS, C. A. O. dos; LUCENA, E. R. de; PEREIRA, M. do S. V.; LIMA, K. C. de. Antibacterial and anti-adherent effect of Mimosa tenuiflora and Myrciaria cauliflora on dental biofilm bacteria. African Journal of Microbiology Research, v. 12, n. 8, p. 181-185, 2018. DOI: https://doi.org/10.5897/AJMR2018.8796.

NASCIMENTO, M. S.; PAIVA-SOUZA, I. O.; FERNANDES, X. A.; MORAES, S. Z. da C. de; ARAÚJO, S. S.; SHAN, A. Y. K. V.; CAMARGO, E. A.; SANTANA, A. E. G.; ARAÚJO, B. S.; ESTEVAM, C. S. Anti-inflammatory and antioxidant activities of the

hydroethanol extract and fractions of the bark of Mimosa tenuiflora (Willd.) Poir. African Journal of Pharmacy and Pharmacology, v. 10, n. 39, p. 823-831, 2016. DOI: https://doi.org/10.5897/AJPP2016.4648.

NASIM, N.; SANDEEP, I. S.; MOHANTY, S. Plant-derived natural products for drug discovery: current approaches and prospects. Nucleus, v. 65, p. 399-411, 2022. DOI: https://doi.org/10.1007/s13237-022-00405-3.

PARSLOW, B. Y.; THORNTON, C. R. Continuing shifts in epidemiology and antifungal susceptibility highlight the need for improved disease management of invasive candidiasis. Microorganisms, v. 10, n. 6, p. 1208, 2022. DOI: https://doi.org/10.3390/microorganisms10061208.

PONDE, N. O.; LORTAL, L.; RAMAGE, G.; NAGLIK, J. R.; RICHARDSON, J. P. Candida albicans biofilms and polymicrobial interactions. Critical Reviews in Microbiology, v. 47, n. 1, p. 91–111, 2021. DOI: https://doi.org/10.1080/1040841X.2020.1843400.

RIBEIRO, M.; SIMÕES, L. C.; SIMÕES, M. Biocides. In: SCHMIDT, T. M. (Ed.). Encyclopedia of Microbiology. 4. ed. Academic Press, 2018. p. 478–490. ISBN 9780128117378. DOI: https://doi.org/10.1016/B978-0-12-809633-8.12118-1.

RIZWAN, K.; MAJEED, I.; BILAL, M.; RASHEED, T.; SHAKEEL, A.; IQBAL, S. Phytochemistry and diverse pharmacology of Genus Mimosa: A review. Biomolecules, v. 12, n. 1, e. 83, 2022. DOI: https://doi.org/10.3390/biom12010083.

TALAPKO, J.; JUZBAŠIĆ, M.; MATIJEVIĆ, T.; PUSTIJANAC, E.; BEKIĆ, S.; KOTRIS, I.; ŠKRLEC, I. Candida albicans—The Virulence Factors and Clinical Manifestations of Infection. Journal of Fungi, v. 7, n. 2, p. 79, 2021. DOI: https://doi.org/10.3390/jof7020079.

TECHNICAL ASSOCIATION OF THE PULP AND PAPER INDUSTRY - TAPPI. TAPPI T 204 cm-97: solvent extractives of wood and pulp. Atlanta: TAPPI Press, 1997. Disponível em: <https://www.tappi.org>. Acesso em: 4 maio. 2026

ZIDANES, U. L.; LIMA, A. C. C. de; DIAS, M. C.; LIMA, G. S. R. de; VIEIRA, H. C.; MORI, F. A.; FERREIRA, R. L. C.; BRAZ, R. L. Anatomical, physical, and chemical characterization of native Caatinga wood species using integrated microscopic and spectroscopic techniques. Holzforschung, v. 79, n. 10, p. 465-478, 2025. DOI: https://doi.org/10.1515/hf-2025-0048.

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Potencial físico-estrutural da associação entre biochar e esterco bovino para condicionador de solo

Hemanuelly Ferreira Breda Lãn Oliveira[1]; Tayná Rebonato Oliveira[1]; Felipe Gabriel dos Santos Araújo[1]; Kamilly da Silva Pereira[1]; Clara Espósito Gualandi[1]; Michel Picanço Oliveira[1]; Ananias Francisco Dias Júnior[1]

[1] Universidade Federal do Espírito Santo

Resumo: A combinação de biochar com resíduos orgânicos tem sido investigada como alternativa para o desenvolvimento de materiais aplicáveis ao manejo do solo. Neste estudo, avaliou-se biochar de casca de café, esterco bovino e o blend biochar–esterco bovino, preparado na proporção 50:50, com o objetivo de compreender como a associação desses materiais altera atributos físicos, texturais, funcionais e estruturais relacionados ao seu potencial uso como condicionador de solo. Os materiais foram caracterizados quanto à densidade aparente, propriedades texturais por adsorção/dessorção de N_2, grupos funcionais por FTIR e perfil estrutural por DRX. O blend biochar-esterco bovino apresentou densidade aparente intermediária entre biochar de casca de café e esterco bovino, maior área superficial BET, volume total de poros intermediário e menor diâmetro médio de poros, indicando alteração na organização físico-textural da matriz. Os espectros de FTIR evidenciaram que o blend preservou grupos funcionais associados aos dois materiais, enquanto os difratogramas de raios X indicaram a coexistência de frações amorfas/carbonáceas e sinais cristalinos relacionados à fração mineral. Os resultados demonstram que o blend biochar–esterco bovino reuniu atributos físico-texturais, funcionais e estruturais dos dois materiais em uma matriz com organização distinta daquela observada nos componentes isolados, indicando potencial para o desenvolvimento de condicionadores de solo.

Palavras-chave: Valorização de resíduos; Casca de café; Pirólise.

Physical-structural potential of the association between biochar and cattle manure as a soil conditioner

Abstract: The combination of biochar with organic residues has been investigated as an alternative for developing materials applicable to soil management. In this study, coffee husk biochar, cattle manure, and the biochar–cattle manure blend, prepared at a 50:50 ratio, were evaluated to understand how the association of these materials changes physical, textural, functional, and structural attributes related to their potential use as soil conditioners. The materials were characterized in terms of bulk density, textural properties by N_2 adsorption/desorption, functional groups by FTIR, and structural profile by XRD. The biochar–cattle manure blend showed intermediate bulk density between, coffee husk biochar and cattle manure, higher BET surface area, intermediate total pore volume, and smaller average pore diameter, indicating changes in the physical-textural organization of the matrix. FTIR spectra showed that the blend preserved functional groups associated with both materials, while X-ray diffractograms indicated the coexistence of amorphous/carbonaceous fractions and crystalline signals related to the mineral fraction. The results demonstrate that the biochar–cattle manure blend combined physical-textural, functional, and structural attributes of both materials within a

matrix exhibiting an organization distinct from that observed in the individual components, indicating its potential for the development of soil conditioners.

Keywords: Waste valorization; Coffee husk; Pyrolysis.

1. Introdução

A elevada dependência de fertilizantes convencionais representa um desafio para a eficiência dos sistemas agrícolas, uma vez que parte dos nutrientes aplicados não permanece disponível no sistema solo-planta. Fertilizantes nitrogenados estão sujeitos à volatilização de amônia, lixiviação de nitrato e emissão de N_2O, enquanto fertilizantes fosfatados apresentam baixa disponibilidade devido à adsorção, precipitação e transformação em formas orgânicas no solo. Além disso, fertilizantes químicos solúveis podem ser facilmente perdidos por lixiviação, escoamento superficial e lavagem, com estimativas de perdas ambientais de 40–70% de N, 80–90% de P e 50–70% de K (Wang et al., 2022). Essas perdas reduzem a eficiência agronômica, aumentam custos e intensificam impactos ambientais, como eutrofização e degradação da qualidade do solo (Feng et al., 2024).

Nesse contexto, o biochar tem recebido atenção como material promissor para aplicações agrícolas, por ser um sólido rico em carbono obtido pela conversão termoquímica de biomassas. Suas propriedades, como área superficial, estrutura porosa, morfologia e presença de grupos funcionais, favorecem sua aplicação como condicionador de solo, adsorvente e componente de formulações de liberação lenta (Varkolu et al., 2025; Wang et al., 2022). Estudos também indicam que o biochar pode reduzir perdas de nutrientes no solo e prolongar a eficiência de fertilizantes (Wang et al., 2022). Contudo, biochars produzidos a partir de resíduos vegetais podem apresentar baixo conteúdo de nutrientes e baixa disponibilidade imediata, o que limita sua capacidade de suprir, isoladamente, as exigências nutricionais das plantas (Kumar et al., 2026).

A combinação do biochar com resíduos orgânicos, como o esterco bovino, surge como alternativa para integrar uma matriz carbonácea estável a uma fonte orgânica de nutrientes e compostos funcionais. A aplicação de esterco bovino pode alterar propriedades do solo e aumentar a disponibilidade de nutrientes, especialmente em sistemas com limitações químicas (Feng et al., 2024). Além disso, a aplicação conjunta de biochar e esterco animal tem sido associada ao aumento da produtividade agrícola e à melhoria de atributos do solo, embora esses efeitos dependam da proporção entre os componentes e das condições de aplicação (Huang et al., 2025). Huang et al. (2025), ao avaliarem diferentes proporções de biochar e esterco bovino

em solo salinizado cultivado com algodão, observaram que a combinação 50:50 apresentou o maior potencial para aumento da produtividade, indicando que a proporção entre os materiais influencia a resposta do sistema solo-planta.

Apesar desse potencial, o comportamento do blend biochar–esterco bovino não pode ser assumido apenas a partir das características dos materiais isolados. Propriedades como porosidade, área superficial, grupos funcionais, hidrofobicidade e interação com água são influenciadas pela matéria-prima e pelas condições de pirólise do biochar (Adhikari et al., 2023). Além disso, grupos contendo oxigênio e nitrogênio, como C=O e C–O, podem participar de ligações de hidrogênio com moléculas de água, influenciando a interação entre a superfície do biochar e a água (Zhang et al., 2024). Assim, o objetivo deste trabalho foi caracterizar biochar de casca de café, esterco bovino e o blend biochar–esterco bovino, visando compreender como a combinação desses materiais altera atributos relacionados ao seu potencial uso como condicionador de solo.

2. Material e métodos

Coleta e preparo do material

O biochar de casca de café utilizado foi produzido a partir de casca de café, em temperatura final de pirólise de 600°C. O esterco bovino foi coletado em uma propriedade rural localizada no município de Jerônimo Monteiro, ES. Após a coleta, o esterco bovino foi seco ao ar. Ambos os materiais foram submetido à classificação granulométrica em peneiras de 2 e 7 mm, visando à padronização do tamanho das partículas e sua homogeneização. O blend biochar-esterco bovino foi preparado pela mistura manual dos dois materiais, na proporção 50:50, em base mássica.

Densidade aparente

A densidade aparente dos materiais foi determinada com auxílio de proveta graduada e balança analítica, conforme adaptação da NBR 11941 (ABNT, 2003). Para cada material foram realizadas três repetições.

Propriedades texturais por adsorção de N_2

A área superficial específica foi determinada pelo método Brunauer–Emmett–Teller (BET). O volume total de poros foi obtido a partir da isoterma de adsorção em pressão relativa próxima à saturação, p/p_0 = 0,99000. A área, o volume acumulado e a distribuição de tamanho

de poros foram avaliados pelo método Barrett–Joyner–Halenda (BJH), considerando os ramos de adsorção e dessorção das isotermas.

Espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier

A identificação dos grupos funcionais presentes nos materiais foi realizada por espectroscopia no infravermelho médio com transformada de Fourier em modo ATR. Os espectros das amostras foram obtidos em espectrofotômetro Bruker, modelo Tensor 27, em temperatura ambiente, na faixa de 400 a 4000 cm^{-1}, com resolução de 4 cm^{-1}.

Difração de raios X

A caracterização estrutural dos materiais foi realizada por difração de raios X. As amostras foram analisadas em difratômetro Rigaku MiniFlex 600, utilizando radiação Cu Kα, com comprimento de onda de 1,54 Å. As análises foram conduzidas na faixa de 2θ de 5° a 70°, com taxa de varredura de 2° min^{-1} e passo de 0,02°.

3. Resultados e discussão

Densidade aparente e propriedades texturais dos materiais

A Tabela 1 apresenta os valores de densidade aparente dos materiais. O blend biochar-esterco bovino apresentou valor intermediário em relação aos materiais isolados, indicando que a mistura 50:50 entre biochar de casca de café e esterco bovino não resultou na predominância física de apenas um dos componentes, mas em uma matriz com comportamento próprio. Essa característica é relevante para materiais destinados à aplicação no solo, uma vez que a baixa densidade e a forma pulverulenta do biochar podem favorecer perdas durante manuseio, transporte, armazenamento e aplicação, especialmente por ação do vento e da chuva. Mohammadi (2021) destaca que essas limitações estão entre os principais desafios associados ao uso direto do biochar em campo.

Tabela 1 – Densidade aparente de biochar, esterco bovino e blend biochar–esterco bovino

Material	Densidade aparente ($g.cm^{-3}$)
BC	0,3062 ± 0,0104

EB	0,2571 ± 0,0346
BCE	0,2827 ± 0,0126

*BC = Biochar de Casca de Café; EB = Esterco Bovino; BCE = Blend Biochar-Esterco Bovino.

As propriedades texturais também indicaram que o blend biochar-esterco bovino não se comportou apenas como uma média dos materiais isolados. O blend apresentou a maior área superficial BET, volume total de poros intermediário e menor diâmetro médio de poros (Tabela 2). Esse conjunto sugere que a combinação entre biochar de casca de café e esterco bovino favoreceu maior exposição de superfície acessível ao N_2, possivelmente associada à organização heterogênea das partículas na mistura. No entanto, o aumento da área superficial não foi acompanhado pelo maior volume total de poros, que foi observado no EB.

Tabela 2 – Propriedades texturais de biochar, esterco bovino e blend biochar–esterco bovino

Material	Área superficial BET ($m^2\ g^{-1}$)	Volume total de poros ($cm^3\ g^{-1}$)	Diâmetro médio de poros (nm)	Área BJH adsorção ($m^2\ g^{-1}$)	Volume BJH adsorção ($cm^3\ g^{-1}$)
BC	1,4649	0,00671	18,3150	4,57391	0,00846
EB	1,6975	0,00870	20,4932	4,96237	0,01071
BCE	2,0655	0,00764	14,7907	4,84830	0,00955

*BC = Biochar de Casca de Café; EB = Esterco Bovino; BCE = Blend Biochar-Esterco Bovino.

Esse resultado reforça que a interpretação da área superficial deve ser feita em conjunto com outros atributos do material. Zhang et al. (2024) demonstraram que maior área superficial específica não implica necessariamente maior capacidade de retenção de água em biochars, especialmente quando essa área está associada à maior aromaticidade, menor polaridade e maior hidrofobicidade da superfície. Os autores destacam que grupos contendo oxigênio e nitrogênio podem ter maior influência sobre a interação com moléculas de água do que a área superficial isoladamente.

A distribuição do volume de poros mostrou predominância da faixa de 2–10 nm em todos os materiais (Tabela 3).

Tabela 3 – Distribuição percentual do volume de poros por faixa de diâmetro

Material	2-10 nm (%)	10-20 nm (%)	20-50 nm (%)	>50 nm (%)
BC	58,15	19,69	10,74	11,42
EB	49,66	18,13	14,17	18,04
BCE	54,91	17,38	13,99	13,72

*BC = Biochar de Casca de Café; EB = Esterco Bovino; BCE = Blend Biochar-Esterco Bovino.

O blend biochar-esterco bovino manteve a predominância de poros nessa faixa, como observado no biochar de casca de café, mas também apresentou participação relativa de poros entre 20–50 nm superior à do biochar de casca de café, aproximando-se parcialmente do comportamento do esterco bovino. Assim, o blend reuniu características texturais dos dois materiais: maior superfície acessível, volume de poros intermediário e predominância de mesoporos menores.

Do ponto de vista funcional, essas características podem influenciar a interação do material com água e solutos no solo. Entretanto, a retenção hídrica em materiais à base de biochar não depende apenas dos poros medidos por adsorção de N_2. Adhikari et al. (2023) observaram que a retenção de água pode ocorrer tanto em poros intraparticulares quanto nos espaços entre partículas, sendo influenciada por forma, tamanho de partícula, rugosidade e hidrofobicidade. Dessa forma, os resultados obtidos indicam potencial físico-textural do blend biochar-esterco bovino, mas não permitem afirmar, de forma direta, maior retenção de água ou maior eficiência agronômica sem ensaios específicos em solo.

Grupos funcionais dos materiais por FTIR

Os espectros de FTIR evidenciaram diferenças na composição funcional dos materiais avaliados (Figura 1). Foram observadas bandas na região de 3200–3600 cm^{-1}, principalmente em esterco bovino e blend biochar-esterco bovino, atribuídas ao estiramento de grupos hidroxila associados à água adsorvida e compostos orgânicos oxigenados. A banda em 2926,70 cm^{-1} foi relacionada ao estiramento de ligações C–H de grupos alifáticos, sendo mais evidente nas amostras contendo esterco bovino. Bandas próximas de 2910–2920 cm^{-1} e 2858 cm^{-1} são frequentemente atribuídas a vibrações de CH_2 presentes em estruturas de celulose, hemicelulose e lignina, com tendência de redução após processos térmicos mais intensos.

Na região de 1568,51 cm^{-1}, as bandas podem estar associadas a vibrações de C=C em estruturas aromáticas, C=O conjugado ou outros grupos orgânicos. Essa atribuição deve ser feita com cautela, pois bandas próximas de 1600–1700 cm^{-1} podem estar relacionadas tanto a compostos aromáticos e alcenos quanto a grupos carbonílicos. A banda em 1371,41 cm^{-1} pode ser atribuída a deformações de C–H em grupos alifáticos, enquanto a banda intensa próxima de 1024,28 cm^{-1}, mais evidente em biochar de casca de café e blend biochar-esterco bovino, está relacionada a vibrações de C–O, C–O–C e possíveis contribuições de compostos oxigenados ou

constituintes minerais. Bandas entre 1000 e 1200 cm^{-1} são frequentemente associadas ao estiramento C–O de grupos presentes em materiais lignocelulósicos e biochars.

O espectro do blend biochar-esterco bovino apresentou comportamento intermediário entre biochar de casca de café e esterco bovino, preservando bandas características dos dois materiais. Essa resposta indica que a mistura 50:50 manteve contribuições funcionais da matriz carbonácea pirolisada e do resíduo orgânico de origem animal. A presença de grupos oxigenados é relevante porque esses grupos podem atuar em interações com moléculas de água, especialmente por ligações de hidrogênio, conforme discutido por Zhang et al. (2024). Assim, os resultados de FTIR complementam os dados texturais ao indicar que o potencial do blend biochar-esterco bovino como condicionador de solo não depende apenas da porosidade, mas também da composição funcional da superfície.

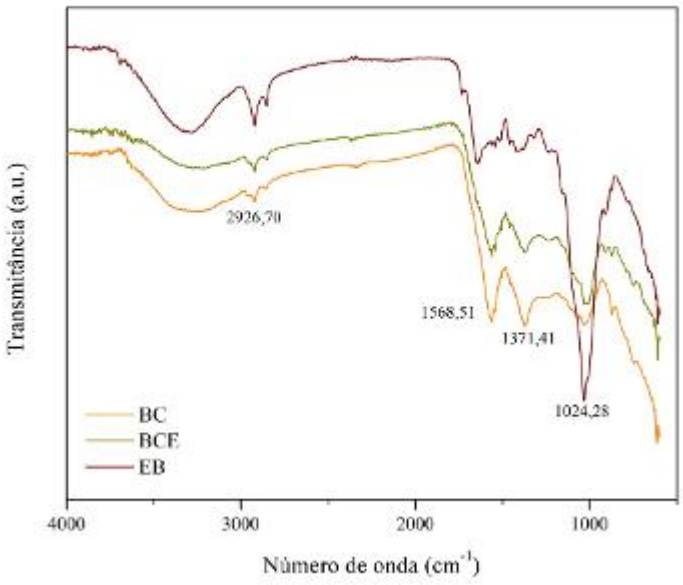


Figura 1 – Espectros de FTIR dos materiais avaliados: biochar de casca de café (BC), esterco bovino (EB) e blend biochar–esterco bovino (BCE).

Perfil estrutural dos materiais por DRX

Os difratogramas de raios X apresentaram perfis distintos entre os materiais avaliados (Figura 2). O biochar de casca de café exibiu uma elevação ampla de intensidade principalmente entre 15° e 30° em 2θ, indicando contribuição de regiões amorfas ou de baixa organização cristalina, coerente com a formação de uma matriz carbonizada heterogênea após a pirólise. Rambhatla et al. destacam que a ausência de picos cristalinos bem definidos pode indicar predominância de fase amorfa e que a avaliação da cristalinidade em materiais lignocelulósicos pode ser complexa devido às alterações estruturais durante o processamento térmico.

O esterco bovino apresentou picos cristalinos mais definidos, especialmente em torno de 36° e próximo de 68° em 2θ, indicando maior contribuição de fases cristalinas, possivelmente associadas à fração mineral do esterco bovino. Essa interpretação é compatível com estudos que relatam a presença de fases minerais em biochars e resíduos orgânicos, como quartzo, calcita, halita e outros compostos, embora a identificação específica dessas fases dependa de comparação com fichas cristalográficas. Por isso, neste trabalho, os picos foram discutidos de forma qualitativa, sem atribuição mineralógica definitiva.

O blend biochar-esterco bovino apresentou comportamento intermediário, reunindo a elevação ampla observada no biochar de casca de café e picos cristalinos associados ao esterco bovino. Esse resultado indica que o blend não constitui uma matriz estruturalmente homogênea, mas um material composto, no qual coexistem frações amorfas/carbonáceas e fases cristalinas. A presença dessas frações pode ser importante para o comportamento futuro do material no solo, uma vez que fases minerais presentes em biochars e matérias-primas podem influenciar propriedades dos substratos, incluindo disponibilidade de nutrientes e liberação de compostos.

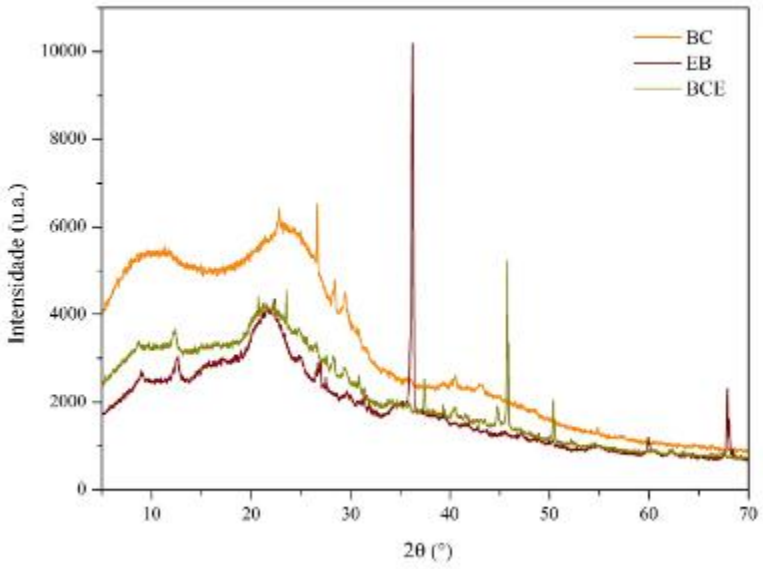


Figura 2 – Difratogramas de raios X de biochar de casca de café (BC), esterco bovino (EB) e blend biochar–esterco bovino (BCE).

4. Conclusões

A associação entre biochar de casca de café e esterco bovino na proporção 50:50 resultou em uma matriz com organização físico-textural distinta dos materiais isolados. Embora a densidade aparente e o volume total de poros tenham apresentado valores intermediários, o blend apresentou maior área superficial BET e menor diâmetro médio de poros que ambos os

componentes, evidenciando que sua configuração textural não corresponde apenas à combinação intermediária de suas propriedades.

A preservação de grupos funcionais associados ao biochar e ao esterco bovino, juntamente com a coexistência de frações amorfas/carbonáceas e cristalinas, demonstra que a associação mantém contribuições funcionais e estruturais de ambos os materiais. Esse conjunto de atributos amplia as possibilidades de interação da matriz com água e solutos e constitui uma base físico-química favorável à sua investigação como condicionador de solo.

Os resultados, portanto, demonstram o potencial da associação entre biochar e esterco bovino como estratégia de valorização conjunta desses materiais. Estudos em solo são necessários para verificar se os atributos identificados se refletem na retenção de água e nutrientes e em sua disponibilidade. A partir dessa avaliação, experimentos de cultivo poderão determinar se esses efeitos resultam em melhorias no desenvolvimento e na produtividade das culturas.

5. Agradecimentos

Os autores agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), à Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação do Espírito Santo (FAPES) e à Universidade Federal do Espírito Santo (UFES) pelo apoio financeiro, institucional e estrutural concedido para o desenvolvimento deste trabalho.

6. Referências bibliográficas

Adhikari, S., Mahmud, M. A. P., Nguyen, M. D., & Timms, W. (2023). Evaluating fundamental biochar properties in relation to water holding capacity. Chemosphere, 328, Article 138620. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.138620

Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2003). Madeira: determinação da densidade básica (ABNT NBR 11941). ABNT.

Feng, X., Liu, C., Li, Y., Xu, J., Zhang, J., & Meng, Q. (2024). The long-term effect of cattle manure application on soil P availability and P fractions in saline-sodic soils in the Songnen Plain of China. Agronomy, 14(12), Article 3059. https://doi.org/10.3390/agronomy14123059

Huang, C., Hou, S., Wang, B., Song, Y., Abulatijiang, A., Min, J., Sheng, J., Jiang, P., Wang, Z., & Cheng, J. (2025). Effects of a combination of biochar and cow manure on soil nutrients and cotton yield in salinized fields. Journal of Arid Land, 17(7), 1014–1026. https://doi.org/10.1007/s40333-025-0054-2

Kumar, S., Kumar, R., & Sindhu, S. S. (2026). Biochar and biofertilizers combined fertilization technology for modulating soil health, plant growth and environmental sustainability. Total Environment Microbiology, 2(2), 100083. https://doi.org/10.1016/j.temicr.2026.100083

Mohammadi, A. (2021). Overview of the benefits and challenges associated with pelletizing biochar. Processes, 9(9), Article 1591. https://doi.org/10.3390/pr9091591

Varkolu, M., Gundekari, S., Omvesh, Palla, V. C. S., Kumar, P., Bhattacharjee, S., & Vinodkumar, T. (2025). Recent advances in biochar production, characterization, and environmental applications. Catalysts, 15(3), Article 243. https://doi.org/10.3390/catal15030243

Wang, C., Luo, D., Zhang, X., Huang, R., Cao, Y., Liu, G., Zhang, Y., & Wang, H. (2022). Biochar-based slow-release of fertilizers for sustainable agriculture: A mini review. Environmental Science and Ecotechnology, 10, Article 100167. https://doi.org/10.1016/j.ese.2022.100167

Zhang, H., Cheng, Y., Zhong, Y., Ni, J., Wei, R., & Chen, W. (2024). Roles of biochars' properties in their water-holding capacity and bound water evaporation: Quantitative importance and controlling mechanism. Biochar, 6, Article 30. https://doi.org/10.1007/s42773-024-00317-2

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Predição da densidade básica da madeira de *Eucalyptus* por variáveis resistográficas e dendrométricas

Leonardo Amador Cruz[1]; Camila da Silva Claer[1]; Jair Aparecido Gabriel[1]; Karina Zamprogno Ferreira[1]; Karoliny do Carmo Gandra[1]; Rodolfo Manoel Lemes da Costa[1]

[1] Sylvamo do Brasil Ltda.

Resumo: A resistografia é uma técnica não destrutiva com potencial para estimar a densidade básica da madeira em árvores em pé, contribuindo para programas de melhoramento genético de *Eucalyptus*. Este estudo teve como objetivo desenvolver e avaliar modelos de regressão linear para estimar a densidade básica da madeira a partir da integração de variáveis resistográficas e dendrométricas. Foram avaliadas 1.375 árvores pertencentes a 78 materiais genéticos distribuídos em 24 experimentos de melhoramento genético, sendo 401 árvores submetidas à determinação destrutiva da densidade básica. Após o controle de qualidade da base de dados e a remoção de outliers, as análises foram conduzidas com 352 árvores. O índice médio de resistência à perfuração apresentou elevada correlação com a densidade básica (r = 0,74). O modelo de regressão linear múltipla, composto pelo índice médio de resistência à perfuração, incremento médio anual e volume médio individual, apresentou R^2 = 0,608 e RMSE de 17,2 kg m^{-3}, mantendo desempenho consistente na validação cruzada (R^2 = 0,595 ± 0,102). Os resultados demonstram que a integração entre variáveis resistográficas e de crescimento melhora a predição da densidade básica, reforçando o potencial da resistografia como ferramenta de fenotipagem não destrutiva para programas de melhoramento genético florestal.
Palavras-chave: Fenotipagem; Melhoramento Genético; Qualidade da Madeira.

Prediction of *Eucalyptus* wood basic density using resistographic and dendrometric variables

Abstract: Resistance drilling is a non-destructive technique with potential for estimating wood basic density in standing trees, supporting *Eucalyptus* breeding programs. This study aimed to develop and evaluate linear regression models to predict wood basic density by integrating resistance drilling and dendrometric variables. A total of 1,375 trees representing 78 genetic materials from 24 breeding trials were evaluated, of which 401 trees were destructively sampled for wood basic density determination. After quality control and outlier removal, the analyses were conducted using 352 trees. Mean drilling resistance showed a strong correlation with wood basic density (r = 0.74). The selected multiple linear regression model, including mean drilling resistance, mean annual increment, and individual tree volume, achieved R^2 = 0.608 and RMSE = 17.2 kg m^{-3}, maintaining consistent performance during five-fold cross-validation (R^2 = 0.595 ± 0.102). The results demonstrate that integrating resistance drilling and growth variables improves the prediction of wood basic density, highlighting the potential of resistance drilling as a non-destructive phenotyping tool for forest tree breeding programs.
Keywords: Phenotyping; Forest Tree Breeding; Wood Quality.

1. Introdução

O gênero *Eucalyptus* consolidou-se como a principal fonte de fibra para a indústria global de celulose e papel, com o Brasil ocupando posição de destaque nesse cenário (Magaton

et al., 2009). Em 2024, a celulose respondeu por US$ 10,38 bilhões do saldo da balança comercial brasileira, evidenciando sua importância para a competitividade do setor florestal (IBÁ, 2025).

Nesse contexto, a crescente demanda por produtividade e eficiência tem impulsionado os programas de melhoramento genético de *Eucalyptus* na busca por materiais que conciliem elevado crescimento e qualidade da madeira, uma vez que ganhos em produtividade podem comprometer propriedades tecnológicas essenciais ao desempenho industrial (Resende & Barbosa, 2005; Paludzyszyn Filho & Santos, 2011; Assis et al., 2015; Fundová, 2012).

Entre as propriedades tecnológicas da madeira, a densidade básica destaca-se por sua influência sobre o rendimento da polpação, o consumo específico de madeira e a eficiência operacional da indústria de celulose (Couto et al., 2013; Pádua et al., 2019; Downes et al., 2018). Além disso, sua elevada herdabilidade torna essa característica estratégica para programas de melhoramento genético e para a seleção de materiais superiores (Demuner & Bertolucci, 1994; Sette Jr. et al., 2012).

O avanço dos programas de melhoramento depende da fenotipagem em larga escala de características de crescimento e qualidade da madeira (Schimleck et al., 2019). Entretanto, os métodos convencionais para determinação da densidade básica apresentam limitações relacionadas ao custo, ao tempo de processamento e ao caráter destrutivo das amostragens (Ukrainetz & O'Neill, 2010; Dias et al., 2017; Trachta et al., 2024).

Nesse contexto, a resistografia destaca-se como uma técnica de avaliação não destrutiva (*Non-Destructive Evaluation* – NDE), baseada na mensuração da resistência à perfuração de uma haste metálica inserida radialmente no tronco, produzindo perfis relacionados à estrutura anatômica do lenho (Rinn et al., 1996). Diversos estudos demonstram seu potencial para estimar a densidade básica da madeira e apoiar a seleção de genótipos superiores em programas de melhoramento florestal (Couto et al., 2013; Downes et al., 2018; Pádua et al., 2019; Schimleck et al., 2019).

Entretanto, a precisão das estimativas obtidas por resistografia pode ser influenciada por fatores genéticos, ambientais, de crescimento e operacionais, como a fricção da haste e a configuração do equipamento (Nicolas et al., 2020; Ukrainetz & O'Neill, 2010; Gendvilas et al., 2024a, 2024b; Trachta et al., 2024). Além disso, a incorporação de variáveis dendrométricas pode aumentar a capacidade preditiva dos modelos, evidenciando a necessidade de abordagens mais robustas e com maior capacidade de generalização (Couto et al., 2013; Dias et al., 2017).

Dessa forma, o presente estudo teve como objetivo desenvolver e avaliar modelos preditivos, baseados na integração de variáveis resistográficas e dendrométricas, para estimar a densidade básica da madeira de *Eucalyptus* por meio de regressão linear, visando subsidiar a seleção de materiais superiores em programas de melhoramento genético florestal.

2. Materiais e métodos

2.1. Área experimental e delineamento amostral

O estudo foi conduzido com dados provenientes de 24 experimentos de melhoramento genético de *Eucalyptus*, implantados em São Paulo e Minas Gerais, em delineamento de blocos casualizados. Os experimentos contemplaram materiais genéticos de espécies puras de *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus urophylla*, bem como híbridos dessas espécies. Com base no ranqueamento genético e nas avaliações fenotípicas de campo, foram selecionados 78 materiais genéticos. As avaliações resistográficas foram realizadas em 1.375 árvores, abrangendo, sempre que possível, pelo menos três blocos experimentais por material e três árvores por bloco. Posteriormente, um dos blocos foi selecionado para as análises destrutivas da densidade básica da madeira, totalizando 401 árvores avaliadas.

2.2. Aquisição e processamento dos dados resistográficos

A resistência à perfuração da madeira foi obtida utilizando o resistógrafo IML-RESI PD-400 (IML Instrumenta Mechanik Labor GmbH, Alemanha). As medições foram realizadas na altura do diâmetro à altura do peito (DAP; 1,30 m), preferencialmente no sentido norte-sul e evitando regiões com defeitos estruturais.

O equipamento foi configurado com velocidade de alimentação de 100 cm min^{-1}, rotação de 2.500 rpm e estágio de alimentação 3. Durante a perfuração radial do tronco, foram registrados continuamente os perfis de resistência e de avanço da broca.

Os perfis resistográficos foram submetidos a uma rotina computacional de pré-processamento desenvolvida neste estudo, que incluiu a identificação automática do início da madeira, a remoção da casca, a delimitação do trecho útil do perfil e a correção do efeito de atrito da haste por ajuste linear ao longo da profundidade de perfuração. Após o processamento, foram extraídos o índice médio de resistência à perfuração (*drill_mean*) e o índice médio de avanço da broca (*feed_mean*), utilizados nas análises estatísticas e no desenvolvimento dos modelos preditivos.

Adicionalmente, foram obtidas dos inventários florestais as variáveis dendrométricas diâmetro à altura do peito (DAP), altura total (H), volume médio individual (VMI), incremento médio anual (IMA) e idade das árvores.

2.3. Determinação da densidade básica da madeira

As árvores selecionadas foram abatidas e seccionadas em toretes de 50 cm, coletados nas posições correspondentes a 0, 25, 50, 75 e 100% da altura comercial (Figura 1).

Os toretes foram transformados em cavacos, e a densidade básica da madeira foi determinada no Laboratório de Qualidade da Madeira da Sylvamo Brasil pelo método do máximo teor de umidade (MTU), seguindo o procedimento operacional da empresa, em conformidade com a metodologia descrita por Foelkel et al. (1971) e com a ABNT NBR 11941.



Figura 1 – Esquema de amostragem longitudinal das árvores para determinação da densidade básica da madeira. Fonte: Elaboração própria.

2.4 Análises estatísticas e modelagem preditiva

Previamente ao ajuste dos modelos, foi realizado o controle de qualidade da base de dados por meio da identificação de valores discrepantes (outliers). A detecção foi realizada separadamente para cada material genético em cada experimento pelo método do intervalo interquartil (IQR), adotando fator igual a 1. As observações classificadas como discrepantes foram removidas antes das análises estatísticas.

As relações entre as variáveis foram avaliadas pelo coeficiente de correlação de Pearson. Em seguida, foram ajustados modelos de regressão linear simples e múltipla para predição da densidade básica da madeira a partir de variáveis resistográficas e dendrométricas.

Nos modelos de regressão múltipla, a seleção das variáveis explicativas foi realizada com base no Critério de Informação de Akaike (AIC). O modelo selecionado foi avaliado por validação cruzada k-fold (k = 5), sendo seu desempenho quantificado por meio da raiz do erro quadrático médio (RMSE), do erro absoluto médio (MAE), do coeficiente de determinação (R^2) e do viés médio das predições (Bias). Todas as análises foram realizadas no software R.

3. Resultados e discussão

3.1. Caracterização da base experimental

Após o controle de qualidade da base de dados e a remoção das observações classificadas como discrepantes (outliers), a modelagem foi conduzida com 352 árvores provenientes de 24 experimentos de melhoramento genético de Eucalyptus. As estatísticas

descritivas das variáveis utilizadas no desenvolvimento dos modelos preditivos são apresentadas na **Tabela 1**.

Tabela 1 – Estatísticas descritivas das variáveis utilizadas na modelagem.

Variável	Média ± DP	Mediana	Mínimo	Máximo
***drill_mean* (%)**	23,66 ± 2,47	23,88	17,16	30,57
***feed_mean* (%)**	14,75 ± 2,94	14,13	9,03	25,36
DB (kg.m^{-3})	468,10 ± 29,87	469,30	374,50	558,90
DAP (cm)	14,88 ± 2,47	14,60	8,12	21,10
H (m)	20,03 ± 3,63	19,20	4,20	27,60
VMI (m^3.árvore^{-1})	0,168 ± 0,080	0,144	0,018	0,419
IMA (m^3.ha^{-1}.ano^{-1})	50,45 ± 18,61	49,75	7,62	111,27
IDADE (anos)	4,55 ± 1,03	4,88	3,12	6,20

3.2. Análise de correlação

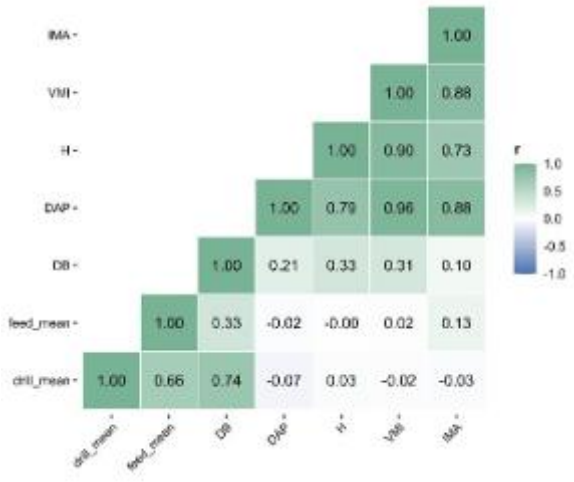


Figura 2 – Matriz de correlação de Pearson entre as variáveis resistográficas, dendrométricas e a densidade básica da madeira.

A matriz de correlação de Pearson (**Figura 2**) evidenciou associação positiva entre a densidade básica da madeira (DB) e a resistência média à perfuração (*drill_mean*), que apresentou o maior coeficiente de correlação entre as variáveis avaliadas (r = 0,74). A velocidade média de avanço (*feed_mean*) apresentou correlação moderada com a densidade básica (r = 0,33), enquanto as variáveis dendrométricas apresentaram correlações fracas (0,10 ≤ r ≤ 0,33). Entre estas, destacaram-se as elevadas correlações entre DAP e VMI (r = 0,96), H e VMI (r = 0,90), DAP e IMA (r = 0,88) e VMI e IMA (r = 0,88), evidenciando a forte associação entre os atributos de crescimento.

Os resultados corroboram o potencial da resistografia para a estimativa não destrutiva da densidade básica da madeira, em concordância com estudos conduzidos em diferentes espécies florestais, que reportaram associação consistente entre a resistência à perfuração e a densidade básica da madeira (Rinn et al., 1996; Fundova et al., 2018; Pádua et al., 2019; Singh et al., 2022). Essa associação é esperada, uma vez que a resistência à perfuração reflete características anatômicas e estruturais do lenho diretamente relacionadas à densidade básica (Dias et al., 2017).

3.3. Regressão linear simples

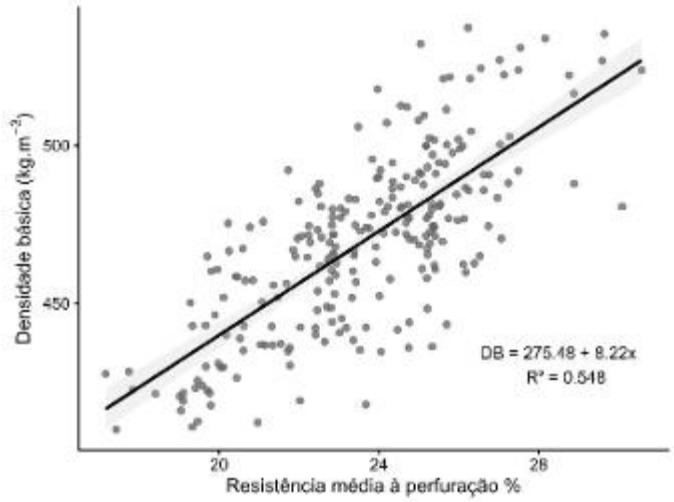


Figura 3 – Relação entre a densidade básica da madeira e a média da resistência à perfuração.

A regressão linear simples evidenciou associação positiva e altamente significativa entre o índice médio de resistência à perfuração e a densidade básica da madeira ($p < 0,001$), resultando em coeficiente de determinação (R^2) de 0,548 (**Figura 3**). O modelo explicou aproximadamente 55% da variabilidade da densidade básica, confirmando o potencial da resistografia para sua estimativa não destrutiva.

Os resultados situam-se dentro da faixa reportada para espécies do gênero *Eucalyptus*, cujos coeficientes de determinação variam entre 0,54 e 0,74 (Gouvêa et al., 2011; Couto et al., 2013; Singh et al., 2022). Da mesma forma, Gouvêa et al. (2011) obtiveram R^2 de até 0,74 em híbridos de *Eucalyptus grandis* × *Eucalyptus urophylla*, demonstrando o potencial da técnica para aplicações em programas de melhoramento genético e na caracterização da qualidade tecnológica da madeira.

Como parte da variabilidade da densidade básica permaneceu não explicada pelo modelo simples, foram avaliadas combinações entre variáveis resistográficas e dendrométricas para o desenvolvimento de modelos de regressão linear múltipla.

3.4. Desenvolvimento do modelo de regressão linear múltipla

Foram avaliadas doze combinações entre variáveis resistográficas e dendrométricas, utilizando o Critério de Informação de Akaike (AIC) para seleção do modelo. Apenas dois modelos apresentaram ΔAIC inferior a 2, indicando suporte estatístico semelhante (**Tabela 2**). O modelo composto pelo índice médio de resistência à perfuração (*drill_mean*), incremento médio anual (IMA) e volume médio individual (VMI) apresentou o menor valor de AIC e foi selecionado por representar a alternativa mais parcimoniosa.

Tabela 2 – Modelos de regressão linear múltipla com maior suporte segundo o Critério de Informação de Akaike (AIC).

Mod.	Variáveis	AIC	ΔAIC	R^2	R^2aj	RMSE
1	$DB=\beta_0 + \beta_1 \cdot drill_mean + \beta_2 \cdot IMA + \beta_3 \cdot VMI + \varepsilon$	1963	0	0,608	0,603	17,2
2	$DB=\beta_0 + \beta_1 \cdot drill_mean + \beta_2 \cdot IMA + \beta_3 \cdot DAP + \beta_4 \cdot VMI + \varepsilon$	1965	1,77	0,608	0,601	17,2

O modelo selecionado composto pelas variáveis *drill_mean*, IMA e VMI, apresentou a seguinte equação: $\widehat{DB} = 290{,}25 + 7{,}46 \cdot \text{drill_mean} - 0{,}59 \cdot \text{IMA} + 190{,}72 \cdot \text{VMI}$. O modelo apresentou R^2 = 0,608, R^2 ajustado = 0,603 e RMSE de 17,2 kg m^{-3}, representando ganho de desempenho em relação à regressão linear simples. Os valores de VIF variaram entre 1,04 e 3,64, indicando ausência de multicolinearidade entre as variáveis preditoras.

A inclusão das variáveis de crescimento elevou o coeficiente de determinação de 0,548 para 0,608, correspondendo a um aumento de 6,0 pontos percentuais, evidenciando que IMA e VMI fornecem informações complementares à resistografia. Resultados semelhantes foram reportados por Couto et al. (2013), Dias et al. (2017) e Uthappa et al. (2017), que também observaram aumento da capacidade preditiva ao integrar variáveis resistográficas e dendrométricas. Sob o ponto de vista biológico, esse comportamento pode ser explicado pela maior proporção de lenho juvenil em árvores de crescimento acelerado, geralmente associada a menores valores de densidade básica (Fundová, 2012).

Embora as correlações fenotípicas entre resistografia e densidade básica sejam frequentemente moderadas devido à influência de fatores ambientais e das condições de crescimento, correlações genéticas superiores a 0,90, chegando a 0,99 em *Eucalyptus globulus*, têm sido reportadas na literatura (Fundová, 2012; Fundova et al., 2018; Nicolas et al., 2020). Esses resultados reforçam o potencial da resistografia como ferramenta de fenotipagem não destrutiva para a seleção precoce de materiais superiores em programas de melhoramento genético florestal.

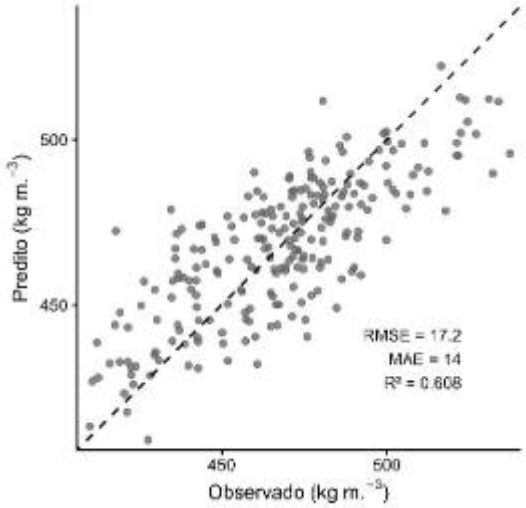


Figura 4 – Relação entre os valores observados e preditos pelo modelo de regressão linear múltipla selecionado.

A distribuição dos valores observados e preditos evidenciou boa concordância entre as estimativas do modelo e os valores experimentais, sem indicação visual de desvios sistemáticos ao longo da faixa de variação da densidade básica da madeira (**Figura 4**).

A capacidade de generalização do modelo foi avaliada por validação cruzada k-fold (k = 5), cujas métricas são apresentadas na **Tabela 3**.

Tabela 3 – Desempenho do modelo de regressão linear múltipla durante a validação cruzada (*k* = 5).

Fold	**RMSE (kg m⁻³)**	**MAE (kg m⁻³)**	**R²**	**Bias (kg m⁻³)**
1	15,44	12,79	0,612	0,05
2	18,16	14,12	0,421	0,49
3	20,11	16,53	0,657	-5,34
4	15,00	12,00	0,679	3,89
5	18,65	15,77	0,607	0,89
Média ± DP	**17,47 ± 2,18**	**14,24 ± 1,92**	**0,595 ± 0,102**	**−0,004 ± 3,34**

A validação cruzada indicou desempenho consistente entre as cinco partições, com RMSE médio de 17,47 ± 2,18 kg m⁻³, MAE de 14,24 ± 1,92 kg m⁻³, R^2 de 0,595 ± 0,102 e viés médio próximo de zero (−0,004 ± 3,34 kg m⁻³), evidenciando boa capacidade de generalização e ausência de tendência sistemática nas predições. A análise dos resíduos confirmou a adequação do modelo, com distribuição compatível com a normalidade segundo o teste de Shapiro–Wilk (W = 0,996; *p* = 0,836).

4. Conclusão

A resistografia mostrou-se uma ferramenta promissora para a estimativa não destrutiva da densidade básica da madeira de *Eucalyptus*. A integração do índice médio de resistência à perfuração com variáveis de crescimento resultou em um modelo de regressão linear múltipla com bom desempenho preditivo e adequada capacidade de generalização. Assim, a abordagem proposta apresenta potencial para apoiar a fenotipagem não destrutiva e o suporte a seleção de materiais superiores em programas de melhoramento genético florestal.

5. Agradecimentos

Os autores agradecem às equipes operacionais do Melhoramento Genético e Qualidade da Madeira da área de Pesquisa e Desenvolvimento da Sylvamo Brasil pelo suporte técnico e colaboração na condução das atividades experimentais que possibilitaram a realização deste estudo.

6. Referências bibliográficas

Assis, T. F., Abad, J. I. M., & Aguiar, A. (2015). Melhoramento genético do eucalipto. In M. V. Schumacher & M. Vieira (Eds.), *Silvicultura do eucalipto no Brasil* (1ª ed.). Editora UFSM.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2003). *NBR 11941: Madeira — Determinação da densidade básica*. ABNT.

Couto, A. M., Trugilho, P. F., Neves, T. A., Protásio, T. P., & Sá, V. A. (2013). Modeling of basic density of wood from Eucalyptus grandis and Eucalyptus urophylla using nondestructive methods. Cerne, 19(1), 27–34. https://doi.org/10.1590/S0104-77602013000100004

Demuner, B. J., & Bertolucci, F. L. G. (1994). Seleção florestal: Uma nova abordagem a partir de estimativas de parâmetros genéticos e fenotípicos para características da madeira e polpa de eucalipto. O Papel, 55(1), 16–23.

Dias, D. da C., Colodette, J. L., Thiersch, C. R., Leite, H. G., & Gomide, J. L.. (2017). USO DA TÉCNICA DE RESISTOGRAFIA E DE VARIÁVEIS DENDROMÉTRICAS NA MODELAGEM DA DENSIDADE BÁSICA DE POVOAMENTOS CLONAIS DE Eucalyptus. Ciência Florestal, 27(2), 609–619. https://doi.org/10.5902/1980509827746

Downes, G. M., Lausberg, M., Potts, B. M., Pilbeam, D. L., Bird, M., & Bradshaw, B. (2018). Application of the IML Resistograph to the infield assessment of basic density in plantation eucalypts. *Australian Forestry*. https://doi.org/10.1080/00049158.2018.1500676

Foelkel, C. E. B., Brasil, M. A. M., & Barrichelo, L. E. G. (1971). Métodos para determinação da densidade básica de cavacos para coníferas e folhosas. *IPEF*, *(2/3)*, 65–74.

Fundová, I. (2012). *In situ wood quality assessment in interior spruce* (Master's thesis). The University of British Columbia.

Fundova, I., Funda, T., & Wu, H. X. (2018). Non-destructive wood density assessment of Scots pine (Pinus sylvestris L.) using Resistograph and Pilodyn. PLOS ONE, 13(9), e0204518. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0204518

Gendvilas, V., Downes, G. M., Lausberg, M., Harrington, J. J., & Lee, D. J. (2024a). Predicting wood density using resistance drilling: The effect of varying feed speed and RPM. *Forests, 15*(4), 579. https://doi.org/10.3390/f15040579

Gendvilas, V., Lee, D. J., Kain, D. P., Kumar, C., Downes, G. M., Lausberg, M., & Harrington, J. J. (2024b). Predicting wood density using resistance drilling: The effect of instrument and operator. *Forests, 15*(1), 157. https://doi.org/10.3390/f15010157

Gouvêa, A. F. G., Trugilho, P. F., Gomide, J. L., Silva, J. R. M., Andrade, C. R., & Alves, I. C. N. (2011). Determinação da densidade básica da madeira de eucaliptos por diferentes métodos não destrutivos. Revista Árvore, 35(2), 349–358.

Indústria Brasileira de Árvores. (2025). *Relatório anual 2025: Indústria brasileira de árvores plantadas*. https://iba.org/wp-content/uploads/2025/10/relatorioAnual2025.pdf

Magaton, A. S., Colodette, J. L., Gouvêa, A. F. G., Gomide, J. L., Santos, M. C., Muguet, M., & Pedrazzi, C. (2009). Eucalyptus wood quality and its impact on kraft pulp production and use. TAPPI Journal, 8(8), 32–39. https://doi.org/10.32964/TJ8.8.32

Nicolas, H., Williams, D., Downes, G., Harrison, P. A., Vaillancourt, R. E., & Potts, B. M. (2020). Application of resistance drilling to genetic studies of growth, wood basic density and bark thickness in *Eucalyptus globulus*. *Australian Forestry, 83*(3), 1–8. https://doi.org/10.1080/00049158.2020.1808276

Pádua, F. A., Tomeleri, J. O. P., Franco, M. P., Silva, J. R. M., & Trugilho, P. F. (2019). Recommendation of non-destructive sampling method for density estimation of *Eucalyptus* wood. *Maderas: Ciencia y Tecnología, 21*(4), 565–572. https://doi.org/10.4067/S0718-221X2019005000412

Paludzyszyn Filho, E., & Santos, P. E. T. (2011). Programa de melhoramento genético de eucalipto da Embrapa Florestas: Resultados e perspectivas (Documentos 214). Embrapa Florestas.

Resende, M. D. V., & Barbosa, M. H. P. (2005). Melhoramento genético de plantas de propagação assexuada. Embrapa Florestas.

Rinn, F., Schweingruber, F. H., & Schär, E. (1996). RESISTOGRAPH and X-ray density charts of wood: Comparative evaluation of drill resistance profiles and X-ray density charts of different wood species. *Holzforschung, 50*(4), 303–311.

Schimleck, L., Dahlen, J., Apiolaza, L. A., Downes, G., Emms, G., Evans, R., Moore, J., Paques, L., Van den Bulcke, J., & Wang, X. (2019). Non-destructive evaluation techniques and what they tell us about wood property variation. Forests, 10(9), 728. https://doi.org/10.3390/f10090728

Sette Jr, C. R., Oliveira, I. R. de ., Tomazello Filho, M., Yamaji, F. M., & Laclau, J. P.. (2012). Efeito da idade e posição de amostragem na densidade e características anatômicas da madeira de Eucalyptus grandis. Revista Árvore, 36(6), 1183–1190. https://doi.org/10.1590/S0100-67622012000600019

Silva, C. E. S., Pace, J. H. C., Gomes, F. J. B., Carvalho, P. C. L., Reis, C. A., Latorraca, J. V. F., Rolim, S. G., & Carvalho, A. M. (2020). Comparison between Resistograph analysis with physical properties of the wood of Brazilian native tree species. *Floresta e Ambiente, 27*(1), e20190052. https://doi.org/10.1590/2179-8087.005219

Singh, K. P., Siregar, I. Z., Abad, J. I. M., & Karlinasari, L. (2022). Non-destructive modeling using a drilling resistance tool to predict wood basic density of standing trees in a *Eucalypts* plantation in North Sumatra, Indonesia. *Biodiversitas, 23*(12), 6218–6226. https://doi.org/10.13057/biodiv/d231217

Trachta, M. A., Acosta, J. J., & Walker, T. D. (2024). Removing friction and bark improves drill resistance data for selection on wood density in *Pinus taeda* plantations. *Forest Products Journal, 75*(1), 26–33. https://doi.org/10.13073/FPJ-D-24-00042

Ukrainetz, N. K., & O'Neill, G. (2010). An analysis of sensitivities contributing measurement error to Resistograph values. *Canadian Journal of Forest Research, 40*(4), 806–811. https://doi.org/10.1139/X10-019

Uthappa, A. R., Hegde, M., Kumar, P. K., Singh, B. G., & Prashanth, R. S. (2017). Rapid measurement of density of wood in progeny trial of Acacia mangium Willd. using Resistograph—A nondestructive method. In A. Kumar & A. Mukherjee (Eds.), Wood is good: Current trends and future prospects in wood utilization (pp. 41–51). Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-10-3115-1_4

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Predição do Teor e da Relação S/G da Lignina por Espectroscopia de Infravermelho Próximo (NIR)

Thainá Parreiras Alves[1]*; Larisse Aparecida Ribas Batalha[1]; Nilton Louvem Da Silva Junior[1]; Luana Capuchi de Paula Nascimento[1]; Carlos Antonio Alves dos Santos[1]; Julia Rodrigues de Araujo Gomes[2]; Fernando José Borges Gomes[1]; Roberto Carlos Costa Lelis[1]

[1] Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro – UFRRJ, Brasil

[2] Ibema, Brasil

*Autor correspondente: thainaparreiras@ufrrj.br

Resumo: As propriedades químicas da madeira, especialmente o teor de lignina, impactam rendimento da polpação e consumo de reagentes na linha de fibras. A reatividade da lignina pode ser correlacionada com a sua relação siringila/guaiacila, sendo que maiores proporções de unidades siringila favorecem a deslignificação. Dessa forma ferramenta analíticas que visem determinar a qualidade da madeira para a produção de celulose são de grande interesse. A técnica de infravermelho próximo surge como técnica promissora para estimar propriedades da madeira quando combinada com métodos estatísticos multivariados. Nesse estudo, 100 amostras de clones comerciais de *Eucalyptus spp.* foram preparadas para análises químicas e espectrais usando técnica de espectroscopia NIR. O modelo gerado a partir dos espectros com aplicação de modelagem estatística que obteve melhor resultado para lignina apresentou R^2c=0,92 e R^2p=0,91, enquanto, os espectros de modelagem da S/G da lignina obtiveram R^2c=0,90 e R^2p=0,83. Indicando alto potencial do NIR para estimativas confiáveis, contribuindo para melhorar a eficiência industrial.

Palavras-chave: Reatividade da lignina; Deslignificação; Modelagem estatística.

Prediction of Lignin Content and S/G Ratio Using Near-Infrared (NIR) Spectroscopy

Abstract: The chemical properties of wood, especially its lignin content, affect pulping yield and reagent consumption in the fiber production line. Lignin reactivity can be correlated with its syringyl-to-guaiacyl ratio, with higher proportions of syringyl units favoring delignification. Thus, analytical tools designed to determine wood quality for pulp production are of great interest. Near-infrared spectroscopy emerges as a promising technique for estimating wood properties when combined with multivariate statistical methods. In this study, 100 samples of commercial clones of Eucalyptus spp. were prepared for chemical and spectral analysis using near-infrared (NIR) spectroscopy. The model generated from the spectra using statistical modeling, which yielded the best results for lignin, showed R^2c = 0.92 and R^2p = 0.91, while the spectra from the lignin S/G ratio modeling yielded R^2c = 0.90 and R^2p = 0.83. This indicates NIR's high potential for reliable estimates, contributing to improved industrial efficiency.

Keywords: Lignin reactivity; Delignification; Statistical Modeling.

1. Introdução

O setor de celulose e papel no Brasil é referência mundial em bioeconomia. Esse crescimento se deve principalmente ao aumento na produção de celulose de fibra curta, que chegou a 22,5 milhões de toneladas em 2024 (IBÁ, 2025).

A composição química da madeira e suas proporções desempenham forte impacto na qualidade do processo de polpação e nas propriedades da polpa celulósica produzida, os principais constituintes químicos são os polissacarídeos, celulose e hemiceluloses, a lignina, os extrativos e os componentes inorgânicos (VEDOVOTTO et al., 2026).

A lignina é um polímero não-polissacarídico, constituído de unidades derivadas do fenilpropano (Costa, 2012). É formada por três álcoois precursores que dão origem às unidades fenilpropanóides denominadas siringil (S), guaiacil (G) e hidroxifenil (H). Em madeiras de folhosas existe uma mistura de quantidades significativas de subestruturas G e S. (CHEN, 1992; FUKUZUKA, 2001; HIGUCHI et al., 1977)

O teor de lignina é altamente ligado a eficiência da produção da polpa celulósica, visto que seus elevados níveis impactam a demanda de carga de álcali no licor, dificultando tanto o processo de polpação, quanto o branqueamento da celulose (GOMES, 2024).

A caracterização química do teor de lignina é usualmente executada de forma analítica, no qual demanda de um processo laboratorial extenso e de elevada complexidade operacional com várias etapas sucessivas de preparo, tratamento e análise das amostras (CRUZ et al., 2019).

A unidade siringila apresenta estrutura mais reativa, sendo está mais fácil de ser dissolvida durante o processo de polpação kraft. Logo, acredita-se que madeiras com alta relação siringila/guaiacila (S/G) sejam mais fáceis de deslignificar (TSUTSUMI et al., 1995). A relação S/G afeta a solubilização da madeira no processo kraft, ao ponto que o aumento dessa relação (maior S ou menor G) facilita a polpação (HINCHEE et al., 2011).

Nesse cenário, a espectroscopia de infravermelho próximo (NIR) é uma técnica analítica não destrutiva, que opera na faixa de 780 a 2500 nm e permite a determinação das estruturas moleculares e variáveis quantitativas em diversos materiais orgânicos (MARTINS et al., 2025). As ligações químicas do material interagem com as ondas eletromagnéticas e ressoam o campo elétrico gerado pela vibração da ligação se alinha com a radiação incidente (OZAKI et al., 2021).

Para a validação do modelo, é necessário a calibração do instrumento portátil e do *software* utilizado através de estatísticas multivariadas, com a aplicação ou não de pré-tratamentos matemáticos (NUNES, 2012).

Diante desse contexto, o presente trabalho tem o objetivo de constatar a eficiência da espectroscopia de infravermelho próximo (NIR) na predição do teor de lignina e sua relação S/G em amostras de serragem de *Eucalyptus* spp.. A comparação entre os dados de laboratório e os modelados através do NIR é fundamental para futuras aplicações da tecnologia em ambientes operacionais e industriais como no controle de qualidade da matéria-prima em fábricas de celulose, na seleção florestal e em programas de melhoramento genético.

2. Material e métodos

100 amostras de cavacos de madeira foram coletadas de diferentes espécies de *Eucalyptus*, previamente selecionados por sua relevância comercial. O teor absolutamente seco dos cavacos foi obtido com o auxílio de uma estufa de circulação forçada de ar, com temperatura de 105 ± 2 °C por 24 horas. Posteriormente, foram processados em moinho de facas e peneirados, sendo utilizada para as análises a fração granulométrica entre 40 e 60 mesh visando reduzir os efeitos físicos relacionados ao tamanho de partículas durante as análises químicas e espectroscópicas.

As amostras tiveram alíquotas direcionadas para duas determinações distintas do teor de lignina total. Uma fração foi destinada à análise química pelo método Klason (TAPPI T 12 wd-82), enquanto outra parcela da mesma amostra foi utilizada para a predição do teor de lignina pela lzsxeitura espectral usando a espectroscopia NIR (MicroNIR).

Os espectros foram obtidos diretamente na superfície de cada amostra de serragem, utilizando um espectrômetro portátil MicroNIR (Viavi Solutions Inc., CA, United States), operando na região de infravermelho próximo. Foram pesados 2,0g de massa úmida da amostra de serragem, na temperatura de 23 ± 1ºC com umidade de 55 ± 1%, sendo realizadas as leituras em cadinhos de porcelana.

Os espectros foram registrados na faixa de 880 a 1660 nm, com 125 variáveis espectrais. Posteriormente exportados para análise quimiométrica no software Chemoface. Os espectros obtidos foram organizados em planilhas e processados para comparação direta com os resultados laboratoriais.

A análise da relação S/G passou pelo mesmo processo de divisão, diferenciando na parte de análise química que foi pelo método de oxidação alcalina do nitrobenzeno realizada a 170°C por 2,5h, conforme procedimento Chen et al, (1992).

2.1 Determinação do teor de lignina pelo método Klason

Com o material absolutamente seco, pesou-se 0,30g, o qual foi submetido à hidrólise primária com 3,0 mL de ácido sulfúrico (H_2SO_4) a 72% durante 1 hora, a 30 ± 1 °C com agitação periódica. Em seguida, a solução foi diluída para aproximadamente 4% de H_2SO_4 e submetida à hidrólise secundária em autoclave a 121 °C por 60 minutos.

Após o resfriamento, a suspensão foi filtrada em cadinho de vidro sinterizado previamente seco e pesado. O resíduo insolúvel foi lavado com água destilada quente, seco em estufa a 105 °C por 24 horas, posteriormente, pesada em uma balança de precisão.

A lignina solúvel foi determinada por espectrofotometria UV-Vis a 205 nm, conforme o protocolo NREL (*National Renewable Energy Laboratory*), e a lignina total foi obtida pela soma das frações insolúvel e solúvel. Os valores de lignina total foram utilizados como referência para o desenvolvimento dos modelos de calibração do NIR.

2.2 Determinação da relação S/G pelo método da oxidação alcalina do nitrobenzeno

A análise da relação S/G foi realizada de duas formas, uma utilizando 5 ml de NaOH 2N e 0,5 ml de nitrobenzeno, e 0,2 gramas de serragem livre de extrativos e a outra com 7 ml de NaOH 2N e 0,5 ml de nitrobenzeno para madeira livre de extrativos. No reator aquecido e monitorado por termostato, a uma temperatura de 170° utilizando o tempo de residência 2,5h. Ao término da reação, o reator quente foi imediatamente resfriado com água fria e, em seguida, 1 ml de 5-iodovanilina (80 mg dissolvidos em 5 ml de 1,4-dioxano) foi adicionado como padrão interno. A mistura foi extraída três vezes com diclorometano e a fase orgânica foi descartada. A fase aquosa (solução alcalina) foi acidificada com HCl 2N até pH 2,5, e então extraída com diclorometano (3x). A fase orgânica foi coletada e seca com sulfato de sódio anidro, um mL da solução foi evaporado, o resíduo foi resuspendido com 0,5 mL de acetona, e injetado no cromatógrafo para leitura e quantificação da reatividade da lignina.

2.3 Análise da estatística

Antes da modelagem estatística, os espectros foram submetidos a procedimentos de pré-processamento obtidos no *software* estatístico Chemoface versão 1.66 (NUNES et al., 2012), com o objetivo de reduzir efeitos físicos decorrentes do espalhamento da luz, diferenças de granulometria e ruídos instrumentais.

Os espectros coletados pelo NIR foram avaliados pela análise de componentes principais (PCA) visando reduzir a dimensão dos dados e identificar os *outliers*, relacionando

possíveis agrupamentos entre amostras. Os componentes principais foram selecionados de acordo com a porcentagem acumulada da variância explicada, sendo utilizados os componentes PC1 e PC2 para representação gráfica dos resultados.

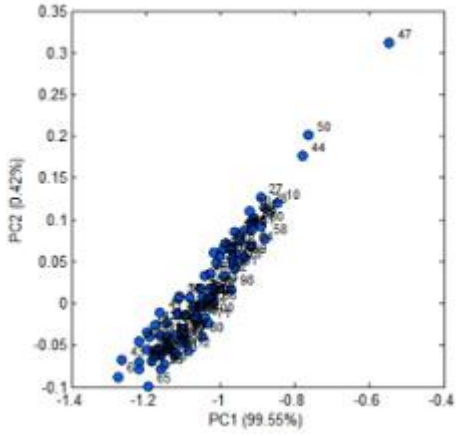
Após a análise exploratória por PCA, foram desenvolvidos modelos de regressão por mínimos quadrados parciais (PLS) para estimar o teor de lignina e a relação S/G das amostras de *Eucalyptus* spp..

Na modelagem, a matriz X foi composta pelos valores de absorbância obtidos em cada comprimento de onda do espectro NIR, enquanto a matriz Y correspondeu aos teores de lignina e relação S/G determinados em laboratório, utilizados como valores de referência.

3. Resultados e discussão

3.1 Análise de Componentes Principais (PCA)

A Figura 1 apresenta esses resultados, com a presença (Figura 1a) e com a retirada dos outliers (Figura 1b) encontrados na primeira rodada de PCA com a finalidade de aumentar a qualidade dos espectros e elevar a similaridade espectral entre os diferentes clones de *Eucalyptus* spp.. Ao examinar os scores, encontrou-se dois constituintes em agrupamento, o componente principal 1 (PC1) e o 2 (PC2), explicaram 99,69% e 0,28%, respectivamente, totalizando 99,97% da variabilidade dos dados coletados.

A 

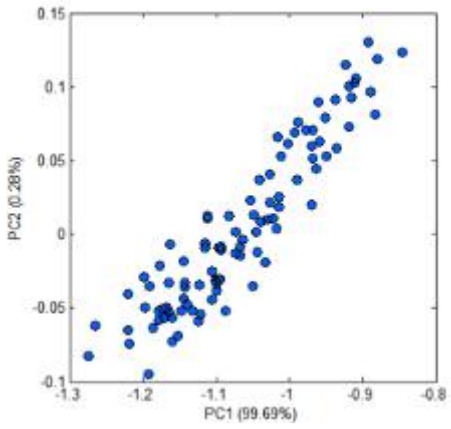
B 

Figura 1 - PCA com *outliers* (A) e PCA sem *outliers* (B) de espectros coletados nas serragens utilizando o NIR.

A elevada porcentagem de variância do PC1 indica forte correlação entre os comprimentos de onda do espectro NIR (MANLEY, 2014), característica frequentemente observada em materiais lignocelulósicos, nos quais as bandas espectrais apresentam alta sobreposição devido às vibrações combinadas e aos sobretons das ligações químicas C–H, O–H e C–O presentes na madeira (SCHWANNINGER et al., 2011).

Dessa forma, os resultados da PCA indicaram alta homogeneidade e qualidade analítica, sendo considerado adequado para a etapa subsequente de calibração dos modelos de regressão por mínimos quadrados parciais (PLS). O comportamento confirma que a PCA identificar padrões de variabilidade antes da modelagem quimiométrica (TSUCHIKAWA; KOBORI, 2015).

3.2 Modelos PLS para estimar o teor e relação S/G da lignina

A Tabela 1 apresenta os resultados das estatísticas relacionadas às validações cruzada e independente para o teor de lignina e a Tabela 2 para relação S/G da lignina, com base nos espectros sem tratamento com e sem os *outliers*.

Tabela 1 – Resultados das análises estatísticas para a predição do teor de lignina

Tratamento	Parâmetros	Validação Cruzada	Validação Independente
Sem tratamento e com outliers	R^2c	0,77	0,89
	RMSEc	0,83	0,60
	R^2cv	0,70	-
	RMSEcv	0,96	-
	R^2p	-	0,87
	RMSEp	-	1,78
	$R^2m(test)$	-	0,69
Sem tratamento e sem outliers	R^2c	0,83	0,92
	RMSEc	0,60	0,42
	R^2cv	0,77	-
	RMSEcv	0,69	-
	R^2p	-	0,91
	RMSEp	-	1,32
	$R^2m(test)$	-	0,83
SNV sem outliers		0,87	0,90

	R^2c	0,52	0,45
	RMSEc	0,80	-
	R^2cv	0,64	-
	RMSEcv	-	0,89
	R^2p	-	1,28
	RMSEp	-	0,84
	$R^2m(test)$		

A melhoria observada após a aplicação do SNV demostra que correções de espalhamento reduzem efeitos físicos associados à granulometria e à dispersão da luz (BARNES et al., 1989).

A melhoria observada após a aplicação do SNV evidencia a importância do pré-processamento na redução dos efeitos de espalhamento da radiação, favorecendo a construção de modelos mais robustos. Resultado semelhante foi observado por Baldin et al. (2020), que obtiveram $R^2 = 0,74$ para a predição de lignina total em *Eucalyptus benthamii*, demonstrando a eficiência da espectroscopia NIR associada ao PLS na estimativa da composição química da madeira.

Os resultados obtidos neste estudo também são consistentes com o trabalho de Mesquita et al. (2024), que desenvolveram modelos de regressão utilizando espectroscopia NIR para estimar a densidade básica e a composição química da madeira de *Eucalyptus* spp., incluindo o teor de lignina, avaliando os modelos por validação cruzada e validação independente. Os autores concluíram que modelos devidamente calibrados e validados apresentam elevada robustez e potencial para aplicação em programas de melhoramento genético e no controle de qualidade industrial, corroborando o desempenho observado no presente trabalho.

Tabela 2 – Resultados das análises estatísticas para a predição da relação S/G das amostras analisadas

Tratamento	**Parâmetros**	**Validação Cruzada**	**Validação Independente**
Sem tratamento e com outliers	R^2c	0,87	0,88
	RMSEc	0,066	0,061
	R^2cv	0,79	-
	RMSEcv	0,083	-
	R^2p	-	0,79
		-	0,087
		-	0,59

	RMSEp		
	R²m(test)		
Sem tratamento e sem outliers	R²c	0,90	0,90
	RMSEc	0,058	0,056
	R²cv	0,84	-
	RMSEcv	0,074	-
	R²p	-	0,83
	RMSEp	-	0,078
	R²m(test)	-	0,67

Alves et al. (2011) utilizando *Eucalyptus globulus* e com aplicação da primeira derivada em combinação com normalização vetorial, observou em R²=0,97 e RMSECV= 0,025. Essa diferença é explicada através da homogeneidade das amostras de mesma espécie analisada. Contudo, Lupoi et al. (2014) com diversos equipamentos, incluindo o NIR, encontrou R²cv= 0,79 a 0,82, demostrando compatibilidade com os resultados encontrados neste trabalho.

4. Conclusões

A partir dos resultados expostos foi possível constatar que a predição do teor de lignina através da Espectroscopia de Infravermelho Próximo (NIR) é favorável para aplicação em futuros trabalhos e no setor florestal. A análise dos dados espectrais demostrado pela validação independente são mais robustos e confiáveis para predição do teor de lignina.

Referente a relação S/G, os resultados demostram a necessidade de maior exploração do tema, com os dados encontrados foi possível comprovar a aplicação do NIR. Embora os resultados sejam ligeiramente inferiores aos melhores modelos reportados na literatura para populações mais homogêneas, o desempenho alcançado é expressivo considerando a elevada variabilidade genética das 100 amostras avaliadas e a utilização da oxidação alcalina do nitrobenzeno como método de referência.

A utilização do NIR juntamente com análises estatísticas apresenta-se como uma solução promissora para as demandas da indústria de base florestal, facilitando no processo de polpação e branqueamento no setor de celulose.

5. Agradecimentos

Os autores agradecem à Fundação Carlos Chagas Filho de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro (FAPERJ) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia em Inovação em Biorrefinaria de Materiais Lignocelulósicos e a Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro pelo apoio concedido ao desenvolvimento deste trabalho.

6. Referências bibliográficas

1. Alves, A., Simões, R., Stackpole, D. J., Vaillancourt, R. E., Potts, B. M., Schwanninger, M., & Rodrigues, J. (2011). Determination of the syringyl/guaiacyl ratio of *Eucalyptus globulus* wood lignin by near infrared-based partial least squares regression models using analytical pyrolysis as the reference method. *Journal of Near Infrared Spectroscopy, 19*, 343–348.
2. Baldin, T., Talgatti, M., Silveira, A. G., Marchiori, J. N. C., Santos, G. A., Santos, O. P., & Valente, B. M. R. T. (2020). Qualidade da madeira de *Eucalyptus benthamii* para produção de celulose por espectroscopia no infravermelho próximo (NIRS). *Scientia Forestalis, 48*(126), e3192. https://doi.org/10.18671/scifor.v48n126.05
3. Barnes, R. J., Dhanoa, M. S., & Lister, S. J. (1989). Standard normal variate transformation and de-trending of near-infrared diffuse reflectance spectra. *Applied Spectroscopy, 43*(5), 772–777.
4. Chen, L. C. (1992). Nitrobenzene and cupric oxide oxidations. In C. W. Dence, S. Y. Lin, & T. E. Timell (Eds.), *Methods in lignin chemistry* (pp. 301–321). Springer-Verlag.
5. Costa, T. H. F. (2012). *Avaliação da recalcitrância de diferentes regiões oriundas de entrenós de cana-de-açúcar em híbridos com teores variados de lignina* (Dissertação de mestrado). Universidade de São Paulo.
6. Cruz, V. M. V., Dangelo, J. V. H., & Oliveira, V. B. L. G. (2019). Determinação do teor de lignina total em amostras do processo de extração da lignina do licor negro. *Outubro, 22*, 24.
7. Fukushima, K. (2001). Regulation of syringyl to guaiacyl ratio in lignin biosynthesis. *Journal of Plant Research, 114*(4), 499–508.
8. Gomes, J. R. A. (2024). *Uso da tecnologia NIR para a mensuração da densidade básica da madeira visando a produção de polpa celulósica Kraft* (Monografia de graduação). Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro.

9. Higuchi, T., Shimada, M., Nakatsubo, F., & Tanahashi, M. (1977). Differences in biosyntheses of guaiacyl and syringyl lignins in woods. *Wood Science and Technology, 11*(2), 153–167.
10. Hinchee, M., Bassa, A. G. M. C., Rottmann, W., Chang, S., & Kwan, B. (2011). Biotech enhanced levels of syringyl lignin improves *Eucalyptus* pulping efficiency. In *Proceedings of the 5th International Colloquium on Eucalyptus Pulp* (pp. 8–11). Universidade Federal de Viçosa.
11. IBÁ. (2025). *Relatório anual 2025*. Indústria Brasileira de Árvores.
12. Lupoi, J. S., Singh, S., Davis, M., et al. (2014). High-throughput prediction of eucalypt lignin syringyl/guaiacyl content using multivariate analysis: A comparison between mid-infrared, near-infrared, and Raman spectroscopy for model development. *Biotechnology for Biofuels, 7*, 93. https://doi.org/10.1186/1754-6834-7-93
13. Manley, M. (2014). Near-infrared spectroscopy and hyperspectral imaging: Non-destructive analysis of biological materials. *Chemical Society Reviews, 43*(24), 8200–8214. https://doi.org/10.1039/C4CS00062E
14. Martins, C. C. N., et al. (2025). Prediction of wood and charcoal quality parameters of *Eucalyptus* and *Corymbia* clones using benchtop and portable NIR instruments.
15. Mesquita Pimenta, E., Dos Santos Brito, E. G., Ramalho, F. M. G., & Hein, P. R. G. (2024). Validação de modelos utilizando espectroscopia no infravermelho próximo para estimativa da densidade básica e composição química da madeira de eucalipto. *iForest, 17*, 338–345. https://doi.org/10.3832/ifor4516-017
16. Nunes, C. A., Freitas, M. P., Pinheiro, A. C. M., & Bastos, S. C. (2012). Chemoface: A novel free user-friendly interface for chemometrics. *Journal of the Brazilian Chemical Society, 23*(11), 2003–2010.
17. Ozaki, Y., Huck, C. W., Tsuchikawa, S., & Engelsen, S. B. (Eds.). (2021). *Near-infrared spectroscopy: Theory, spectral analysis, instrumentation, and applications*. Springer.
18. Schwanninger, M., Rodrigues, J., & Fackler, K. (2011). A review of band assignments in near infrared spectra of wood and wood components. *Journal of Near Infrared Spectroscopy, 19*, 287–308. https://doi.org/10.1255/jnirs.955
19. Tsuchikawa, S., & Kobori, H. (2015). A review of recent application of near infrared spectroscopy to wood science and technology. *Journal of Wood Science, 61*, 213–220. https://doi.org/10.1007/s10086-015-1467-x

20. Tsutsumi, Y., Kondo, R., Sakai, K., & Imamura, H. (1995). The difference of reactivity between syringyl lignin and guaiacyl lignin in alkaline systems. *Holzforschung*, *49*(5), 423–428. https://doi.org/10.1515/hfsg.1995.49.5.423
21. Vedovotto, D. O. H. M., Farias, D. T., Roubuste, R. R., Wacht, W. L., Silva, D. M., Monteiro, C. R., Rehbein, M., Schmitt, E., Coldebella, R., & Pedrazzi, C. (2026). Comparative study of the chemical components of *Pinus taeda* wood in kraft pulping. *Ciência Florestal*, *36*, e93109. https://doi.org/10.5902/1980509893109
22. Technical Association of the Pulp and Paper Industry (1982). TAPPI T12 wd-82. https://www.tappi.org/content/pdf/standards/numeric_index_tms.pdf
23. Cleiton A. Nunes (2016). Chermoface (Versão 1.66). https://www.ufla.br/chemoface/?page_id=4

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Processo de secagem de madeiras ao ar livre em Curuá-PA

José Cícero Pereira Júnior[1]; Natalia Durigon Melo[1]; Ludmilla Morais Pereira[1]; Igor da Costa Martins[2]; Demétrio Ribeiro Corrêa[2]; Cesar Bentes cerdeira[2]; Ronilson Rabelo Paz[2]; Iêdo Souza Santos[3]

[1] Pós-graduando do Programa de Engenharia Florestal, Universidade do Estado de Santa Catarina - UDESC
[2] Estudante de Engenharia Florestal, Programa Forma Pará, Universidade do Estado do Pará – UEPA
[3] Departamento de Ciências e Tecnologia
E-mail: pereirajunior.jc@outlook.com.

Resumo: A secagem da madeira é uma etapa fundamental para melhorar sua estabilidade dimensional, reduzir o teor de umidade e aumentar sua adequação para diferentes aplicações industriais. Nesse contexto, este estudo teve como objetivo avaliar os efeitos da secagem natural nas madeiras de *Anacardium giganteum* e *Virola surinamensis* no município de Curuá, Pará. Foram utilizadas 34 peças de madeira, sendo 17 de cada espécie, submetidas à secagem ao ar livre por um período de 20 dias. As peças foram empilhadas com o uso de tabiques e protegidas por cobertura de telhas, visando favorecer a circulação de ar e minimizar a incidência direta de intempéries. Antes e após a secagem, foram realizadas medições de largura, espessura e comprimento com auxílio de paquímetro e trena, permitindo avaliar as alterações dimensionais ocorridas. Os resultados indicaram que *Virola surinamensis* apresentou maior retração dimensional, bem como maior incidência de torcimento, arqueamento e rachaduras de topo. Em contrapartida, *Anacardium giganteum* apresentou maior ocorrência de encanoamento durante o período de secagem. A madeira apresentou teor de umidade inicial médio de 57% e teor de umidade final de 28%, correspondendo a uma redução aproximada de 50,9% após o período experimental. Conclui-se que a secagem ao ar livre constitui uma alternativa viável para a redução da umidade da madeira, embora seu desempenho esteja diretamente relacionado às condições ambientais locais, especialmente à elevada umidade relativa do ar característica da região.

Palavras-chave: Secagem natural; estabilidade dimensional; madeira tropical.

Outdoor wood drying process in Curuá-PA

Abstract: Wood drying is a fundamental process for improving dimensional stability, reducing moisture content, and enhancing the suitability of wood for different industrial applications. In this context, this study aimed to evaluate the effects of natural drying on the wood of *Anacardium giganteum* and *Virola surinamensis* in the municipality of Curuá, Pará, Brazil. A total of 34 wood pieces were used, comprising 17 samples from each species, which were subjected to air drying for a period of 20 days. The samples were stacked with spacers and protected by a roof covering to promote air circulation and minimize direct exposure to weather conditions. Before and after the drying period, measurements of width, thickness, and length were taken using a caliper and measuring tape, allowing the assessment of dimensional changes. The results indicated that *Virola surinamensis* showed greater dimensional shrinkage, as well as a higher incidence of twisting, bowing, and end checking. In contrast, *Anacardium giganteum* presented a higher occurrence of cupping during the drying period. The wood showed an average initial moisture content of 57% and a final moisture content of 28%, corresponding to

an approximate reduction of 50.9% after the experimental period. It can be concluded that air drying is a viable alternative for reducing wood moisture content; however, its performance is directly influenced by local environmental conditions, especially the high relative humidity characteristic of the region.

Keywords: Air drying; dimensional stability; tropical wood.

1. Introdução

A secagem da madeira é uma etapa fundamental do processamento madeireiro, pois reduz o teor de umidade e melhora a estabilidade dimensional e a qualidade do material para diferentes usos. Além disso, influencia diretamente as propriedades físicas e mecânicas da madeira, uma vez que a redução da umidade pode provocar alterações dimensionais e modificar seu comportamento estrutural (Galvão & Jankowsky, 1985; Fraga *et al*., 2022).

Durante a secagem, a perda de água contida na madeira pode causar retrações, deformações e defeitos, comprometendo a qualidade do produto final. A intensidade dessas alterações depende de fatores relacionados à espécie, às condições ambientais e ao método de secagem empregado. Na secagem ao ar livre, temperatura, umidade relativa do ar e circulação de ventos exercem influência direta sobre a remoção da água e o equilíbrio higroscópico da madeira (Souza *et al*., 2016).

Entre os métodos utilizados para redução da umidade, a secagem ao ar livre destaca-se pelo baixo custo operacional e pela facilidade de aplicação, sendo frequentemente utilizada como etapa inicial do processamento. Entretanto, sua eficiência está diretamente relacionada às condições climáticas locais e ao correto empilhamento das peças. O uso de tabiques entre as tábuas favorece a circulação do ar e contribui para uma secagem mais uniforme, reduzindo gradientes de umidade e a ocorrência de defeitos (Stangerlin *et al*., 2009; Susin *et al*., 2014).

A Amazônia abriga diversas espécies florestais com potencial madeireiro, muitas das quais ainda possuem poucas informações sobre seu comportamento durante a secagem. Dentre essas espécies destacam-se *Virola surinamensis* e *Anacardium giganteum*. A madeira de *A. giganteum* apresenta potencial para utilização na produção de celulose, lâminas faqueadas, compensados e embalagens leves (Embrapa Amazônia Oriental, 2021). Já *V. surinamensis* possui relevância ecológica e econômica, além de características tecnológicas que favorecem seu aproveitamento industrial (Costa et al., 2017).

Considerando a importância da secagem para a qualidade da madeira e a necessidade de informações tecnológicas sobre espécies amazônicas, o presente trabalho teve como objetivo

avaliar as variações dimensionais da madeira de *Virola surinamensis* e *Anacardium giganteum* submetidas à secagem ao ar livre por empilhamento, no município de Curuá, Pará

2. Material e métodos

O experimento foi conduzido conforme o fluxograma (Figura 1), no pátio da Escola São Raimundo Nonato, localizada no município de Curuá, Pará, nas coordenadas 1°54'19"S e 55°10'11"W. O período de secagem ocorreu entre os dias 09 a 29 de janeiro de 2026 (totalizando 20 dias), sob condições ambientais típicas da região. Os dados climáticos utilizados para caracterização do período experimental foram obtidos na estação meteorológica automática com dados pluviométricos ativos mais próxima, localizada no município de Belterra, Pará.

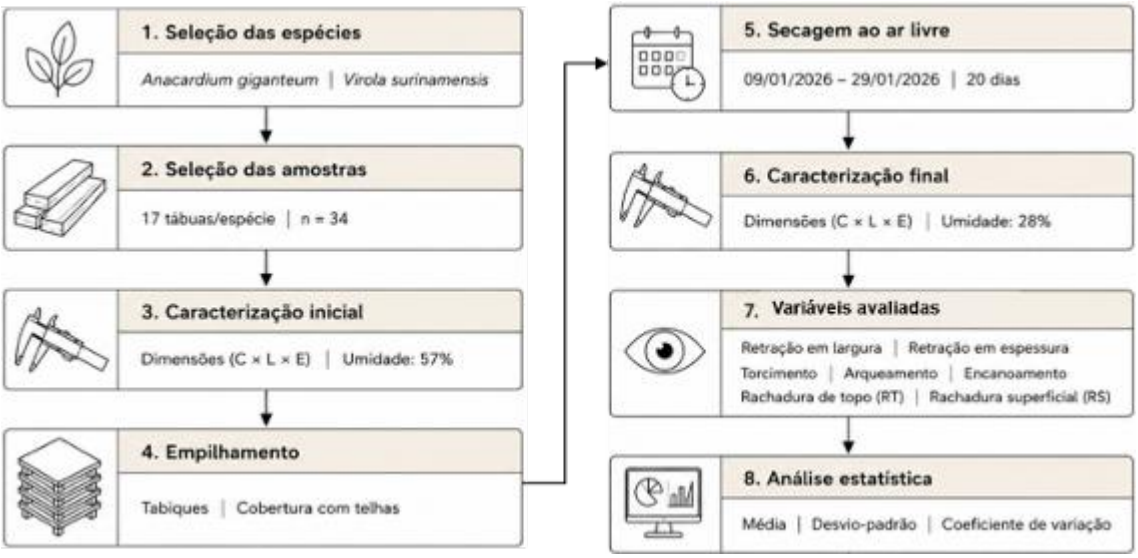


Figura 1. Fluxograma metodológico do processo de secagem ao ar livre e avaliação das madeiras estudadas.

Foram utilizadas tábuas serradas de duas espécies madeireiras, *Anacardium giganteum* e *Virola surinamensis*, provenientes de uma serraria local. Para cada espécie foram selecionadas 17 tábuas, totalizando 34 unidades experimentais. As peças apresentavam comprimento aproximado de 1,50 m, largura variando entre 160 e 195 mm e espessura entre 20 e 25 mm. As tábuas foram empilhadas horizontalmente com o uso de tabiques de madeira, de mesma espessura das peças, distribuídos de forma a permitir a circulação de ar entre as camadas, e a pilha foi protegida por cobertura de telhas para minimizar a incidência direta de chuva e radiação solar.

A avaliação da estabilidade dimensional foi realizada com base na ABNT NBR 7190-3:2022, com adaptações para o material utilizado neste estudo, constituído por tábuas comerciais submetidas à secagem natural ao ar livre. As medições de comprimento, largura e espessura foram realizadas antes e após o período de secagem, permitindo determinar as variações dimensionais das peças.

Considerando que as tábuas utilizadas eram provenientes da produção comercial da serraria e não foram classificadas quanto à orientação anatômica, as análises foram realizadas com base nas variações de largura e espessura das peças, sem distinção entre as direções anatômicas radial e tangencial.

Ao final do período experimental foram avaliados visualmente os defeitos de secagem, considerando a ocorrência de torcimento, arqueamento, encurvamento, encanoamento, rachaduras de topo e rachaduras superficiais. Os percentuais dos defeitos foram calculados a partir das dimensões das peças após a secagem.

Os dados obtidos foram organizados em planilhas eletrônicas do Microsoft Excel® e analisados por estatística descritiva, utilizando-se média, desvio-padrão e coeficiente de variação.

3. Resultados e discussão

Os resultados do processo de secagem das madeiras (Tabela 1) de *A. giganteum* e *V. surinamensis* mostraram diferenças no comportamento dimensional e na ocorrência de defeitos ao longo do período. Em relação às variações dimensionais, observou-se que *V. surinamensis* apresentou maiores valores de retração da largura (2,64%) e da espessura (2,66%) quando comparada a *A. giganteum*, que apresentou retrações de 1,52% e 2,03%, respectivamente. Esses resultados indicam maior variação dimensional das peças de *V. surinamensis* durante a secagem. A retração da madeira é influenciada por sua composição química, ultraestrutura e anatomia, sendo que elementos como a estrutura da parede celular, a orientação das microfibrilas e a presença de raios podem interferir no comportamento dimensional da madeira durante a perda de umidade (Xue *et al.*, 2018).

Tabela 1 – Resultados da retração e ocorrência de defeitos durante a secagem ao ar livre das espécies.

Espécie	Retração da	Retração da	Torcimento (%)	Arqueamento (%)	Encanoamento (%)	*RT	**RS

	largura (%)	**espessura (%)**				**(%)**	**(%)**
A. giganteum	1,52 ± 0,79	2,03 ± 1,95	0,20 ± 0,00	0,00 ± 0,00	1,10 ± 2,65	0,63 ± 0,20	0,14 ± 0,06
V. surinamensis	2,64 ± 1,25	2,66 ± 1,23	3,62 ± 2,49	2,80 ± 0,00	0,17 ± 0,07	2,31 ± 1,25	0,12 ± 0,03

*RT = Rachadura de Topo. **RS = Rachadura de Superfície.

Quanto aos defeitos de secagem, o encanoamento foi mais expressivo em *A. giganteum* (1,10%) do que em *V. surinamensis* (0,17%). Esse comportamento sugere maior suscetibilidade de *A. giganteum* às tensões geradas durante a remoção da umidade, resultando em maior tendência à deformação transversal das peças, mesmo quando adotadas práticas adequadas de empilhamento e separação entre as tábuas. O torcimento ocorreu em ambas as espécies, com maior incidência em *V. surinamensis* (3,62%) em comparação a *A. giganteum* (0,20%), indicando maior suscetibilidade da espécie a esse tipo de defeito. Observou-se ainda a ocorrência de arqueamento apenas em *V. surinamensis*, com valor médio de 2,80%. Esses defeitos podem estar relacionados à orientação das fibras, aos gradientes internos de umidade e ao desenvolvimento de tensões durante a secagem da madeira (Yin & Liu, 2021; Gao *et al*., 2024). Resultados semelhantes são relatados na literatura, evidenciando que o método de empilhamento empregado durante a secagem pode influenciar a qualidade final da madeira e a ocorrência de defeitos de empenamento (Dittmann *et al*., 2017).

As rachaduras de topo (RT) e as rachaduras superficiais (RS) apresentaram baixos valores médios em ambas as espécies. Entretanto, *V. surinamensis* apresentou maior incidência de RT (2,31%) quando comparada a *A. giganteum* (0,63%), enquanto os valores de RS foram semelhantes entre as espécies, variando entre 0,12% e 0,14%.

Além disso, a madeira apresentou teor de umidade inicial médio de 57% e teor de umidade final de 28%, correspondendo a uma redução aproximada de 50,9% durante os 20 dias de secagem. Durante o período experimental (09 a 29 de janeiro de 2026), foram registradas temperaturas entre 24,4 e 26,9 °C, umidade relativa do ar variando de 83 a 97% e precipitação acumulada de aproximadamente 53,2 mm, com os maiores volumes de chuva observados nos dias 23 e 27 de janeiro (Figura 2). Essas condições podem ter contribuído para a redução da taxa de secagem das peças e para a manutenção de elevados teores de umidade ao final do experimento.

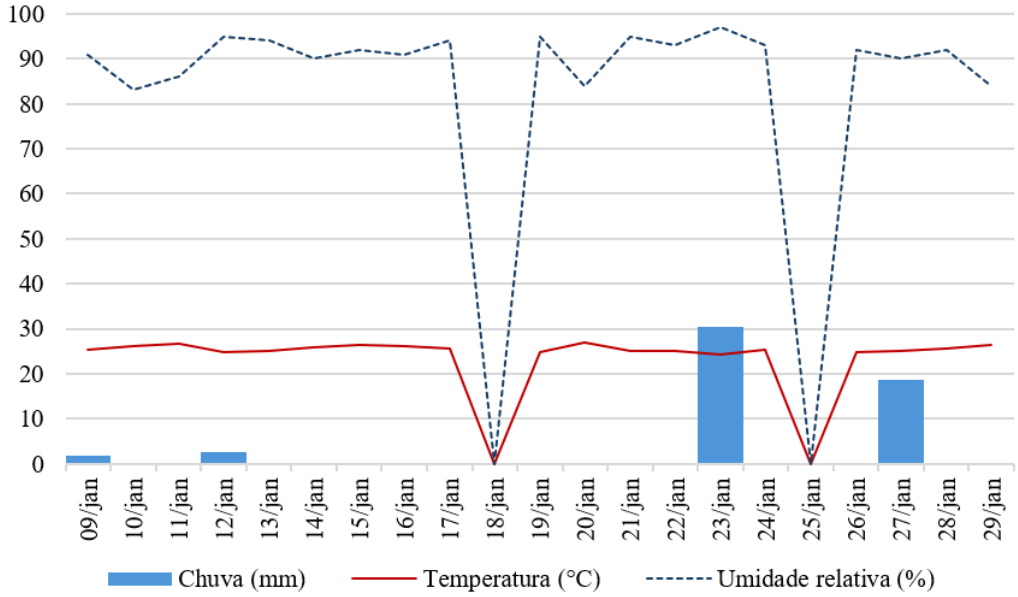


Figura 2. Temperatura do ar, umidade relativa e precipitação registradas durante o período experimental (09 a 29 de janeiro de 2026), utilizando dados da estação meteorológica de Belterra-PA.
Fonte: Dados do INMET (2026).
*Nos dias 18 e 25 de janeiro de 2026 não houve registro de dados meteorológicos na estação.

Essa condição é característica da Amazônia Oriental, que apresenta elevada sazonalidade pluviométrica, influenciando diretamente a umidade atmosférica e, consequentemente, a secagem natural da madeira (Souza *et al.*, 2016). Simpson e Forsman (1997) destacam que o comportamento dimensional da madeira e a ocorrência de defeitos durante a secagem estão diretamente relacionados ao teor de umidade alcançado ao final do processo. Dessa forma, os dados meteorológicos observados durante o período experimental auxiliam na compreensão dos resultados obtidos para as duas espécies avaliadas.

4. Conclusões

A madeira de *Virola surinamensis* apresentou maiores valores de retração e incidência de torcimento, arqueamento e rachaduras de topo, indicando maior variação dimensional durante o período de secagem avaliado. Por outro lado, *Anacardium giganteum* apresentou menores valores de retração, porém maior ocorrência de encanoamento, evidenciando diferenças no comportamento dimensional e na manifestação dos defeitos de secagem entre as espécies.

Conclui-se que a secagem ao ar livre se mostrou uma alternativa viável para a redução do teor de umidade das madeiras de *A. giganteum* e *V. surinamensis* nas condições avaliadas em

Curuá–PA, podendo ser utilizada como etapa inicial do processo de secagem dessas espécies. Entretanto, considerando que o teor de umidade final foi de 28%, recomenda-se a continuidade da secagem ou a realização de estudos adicionais para avaliar o comportamento das madeiras em teores de umidade mais baixos e sob diferentes condições de empilhamento.

5. Agradecimentos

Os autores agradecem ao Programa Forma Pará, do Governo do Estado do Pará, e a Prefeitura Municipal de Curuçá pelo apoio concedido para a realização deste trabalho.

6. Referências bibliográficas

Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2022). *ABNT NBR 7190-3:2022: Projeto de estruturas de madeira — Parte 3: Métodos de ensaio para corpos de prova isentos de defeitos para madeiras de florestas nativas*. ABNT.

Costa, B. C., Suzuki, P. M., Martins, W. B. R., Andrade, V. M. S., & Oliveira, F. A. (2017). Dinâmica da massa seca e propriedades químicas da liteira em Virola surinamensis e floresta sucessional na Amazônia oriental. *Revista Verde De Agroecologia E Desenvolvimento Sustentável*, *12*(1), 23–28. https://doi.org/10.18378/rvads.v12i1.4407.

Dittmann, R. L., de Souza, J. T., Talgatti, M., Baldin, T., & de Menezes, W. M. (2017). Stacking methods and lumber quality of Eucalyptus dunnii and Araucaria angustifolia after air drying. *Scientia Agraria Paranaensis*, *16*(2), 260-264. https://e-revista.unioeste.br/index.php/scientiaagraria/article/view/14024.

Embrapa Amazônia Oriental. (2021). *Anacardium giganteum Hancock. ex Engl.: Madeira*. Agência de Informação Tecnológica.

Fraga, I. F., Arroyo, F. N., Soares, L. S. Z. R., Aquino, V. B. D. M., Ruthes, H. C., Christoforo, A. L., & Lahr, F. A. R. (2022). Influência do teor de umidade em propriedades físicas e mecânicas da madeira de Dipteryx odorata. Matéria (Rio de Janeiro), 27, e20220084. https://doi.org/10.1590/1517-7076-RMAT-2022-0084.

Galvão, A. P. M.; Jankowsky, I. P. (1985). *Secagem racional da madeira*. São Paulo: Nobel.

Gao, Y., Fu, Z., Zhou, Y., Fu, F., Gao, X., Zhou, F., … Huang, S. (2024). Moisture changes and surface checking development during drying of Masson pine wood. *Drying Technology*, *42*(8), 1329–1339. https://doi.org/10.1080/07373937.2024.2346839.

Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis. (s.d). *Madeiras tropicais brasileiras: Brazilian tropical woods*. Laboratório de Produtos Florestais.

Simpson, W. T., & Forsman, J. W. (1997). *Effect of moisture content on warp in hardwood 2 by 6's for structural use* (Research Paper FPL-RP-580). U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory.

Souza, A. P. de, Stangerlin, D. M., Melo, R. R. de, & Uliana, E. M. (2016). Sazonalidade da umidade de equilíbrio da madeira para o Estado de Mato Grosso. *Pesquisa Florestal Brasileira*, *36*(88), 423–433. https://doi.org/10.4336/2016.pfb.36.88.811.

Stangerlin, D. M., Santini, E. J., Susin, F., Melo, R. R. de, Gatto, D. A., & Haselein, C. R. (2009). Uso de estufa solar para secagem de madeira serrada. *Ciência Florestal*, *19*(4), 461–472. https://doi.org/10.5902/19805098900.

Susin, F., Santini, E. J., Stangerlin, D. M., Morais, W. W. C., & Melo, R. R. de. (2014). Taxa de secagem e qualidade da madeira serrada de *Hovenia dulcis* submetida a dois métodos de secagem. Floresta e Ambiente, 21(2), 243–250. https://doi.org/10.4322/floram.2014.016.

Xue, Q., Sun, W., Fagerstedt, K., Guo, X., Dong, M., Wang, W., & Cao, H. (2018). Effects of wood rays on the shrinkage of wood during the drying process. BioResources, 13(3), 7086-7095.

Yin, Q., & Liu, H.-H. (2021). Drying Stress and Strain of Wood: A Review. *Applied Sciences*, *11*(11), 5023. https://doi.org/10.3390/app11115023.

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Produção de polpa celulósica artesanal a partir de resíduo lignocelulósico

Camila Leão Carneiro[1]; Luana Maia Azevedo[1]; Saly Takeshita Yamaguti[1]

[1] Universidade Federal Rural da Amazônia

Resumo: Tendo em vista os resíduos agrícolas como fonte de biomassa lignocelulósica, o presente estudo teve como objetivo avaliar o potencial de resíduos lignocelulósicos para produção artesanal de celulose. O experimento utilizou resíduos lignocelulósicos de palha de milho e bagaço de cana. Foi realizada a caracterização morfológica e física do material e o processo de polpação utilizou soda cáustica. Da polpa obtida foi avaliada a formação do papel e o seu rendimento. O bagaço de cana apresentou maior comprimento de fibra (1,13 mm) e a palha de milho o maior valor de densidade básica (0,16 g.cm^{-3}), consequentemente, maior rendimento da polpa celulósica (32,31%). As folhas de papel proveniente da palha de milho evidenciaram maior grau de aspereza, ocasionando o esfarelamento do material. Em contrapartida, as folhas produzidas do bagaço de cana apresentaram menor propensão ao esfarelamento. Conclui-se que as polpas obtidas de forma artesanal apresentaram características satisfatórias na formação do papel.

Palavras-chave: Bagaço de cana; Palha de milho; Resíduo agroindustrial.

Production of artisanal cellulose pulp from lignocellulosic waste

Abstract: Considering agricultural residues as a source of lignocellulosic biomass, this study aimed to evaluate the potential of lignocellulosic residues for the artisanal production of cellulose pulp. The experiment used lignocellulosic residues from corn straw and sugarcane bagasse. Morphological and physical characterization of the materials was performed, and the pulping process employed sodium hydroxide. The resulting pulp was evaluated regarding paper formation and pulp yield. Sugarcane bagasse exhibited the greatest fiber length (1.13 mm), while corn straw showed the highest basic density (0.16 g cm^{-3}), resulting in a higher pulp yield (32.31%). Paper sheets produced from corn straw exhibited a higher degree of roughness, leading to material crumbling. In contrast, sheets produced from sugarcane bagasse showed a lower tendency to crumble. It was concluded that the artisanal pulps obtained presented satisfactory characteristics for paper formation.

Keywords: Sugarcane bagasse; Corn straw; Agro-industrial waste.

1. Introdução

A fabricação de celulose confere um notável destaque na indústria brasileira, produzindo um total de 25,5 milhões de toneladas de celulose em 2024, que representa um aumento de 5,2% em relação ao ano anterior. O Brasil ocupa a segunda colocação dos maiores produtores de celulose mundial, destinando o maior percentual para o mercado externo (IBÁ, 2025).

A produção de celulose e papel utiliza, em sua maioria, fibras vegetais, e a madeira é a principal matéria-prima para a fabricação, devido as características favoráveis como alta disponibilidade, fonte renovável e exploração econômica (BETINI; GALATTI, 1995). Além da madeira, é importante destacar que toda biomassa lignocelulósica desponta como uma matéria-prima favorável devido à sua natureza renovável e sustentável. Nesse sentido, também são consideradas como alternativas e geram novos caminhos para estudos e pesquisas, inclusive baseado no reprocessamento dos insumos oriundos de resíduos agrícolas (OLIVEIRA et al., 2019).

Materiais lignocelulósicos possuem em sua composição celulose, hemicelulose e lignina, variando de acordo com o tipo de matéria-prima (BONOMI; MAIORANO; RODRIGUES, 2008). Todos os anos, o Brasil produz toneladas de resíduos agrícolas com composição lignocelulósica, tornando a biodegradação do material alvo de estudos promissores para utilização da biomassa em matéria-prima em processos tecnológicos e diversos outros fins (AGUIAR; FERRAZ, 2011; PIRES et al., 2016).

Essa matéria-prima representa a principal fonte de fibras para países em desenvolvimento, com exemplos notáveis que incluem o bambu, amplamente utilizado em países tropicais, o bagaço de cana, linter de algodão (*Gossupium* sp) e palha de cereais como trigo, milho, cevada, centeio, arroz e aveia (FOELKEL; BARRICHELO, 1975).

Oportunidades provenientes através do incentivo a pesquisa e avanços tecnológicos, promovem progressos e inovações mediante ao material lignocelulósico com diferentes potencialidades de uso, em razão da sustentabilidade e desenvolvimento. Com base nas informações, a produção de papel através de materiais lignocelulósicos são importantes na utilização eficiente dos resíduos provenientes das agroindústrias.

Seguindo essa premissa, existe a necessidade de reutilizar a biomassa renovável a fim de reduzir as consequências causadas ao meio ambiente e implementar novas tecnologias para evitar o desperdício dos refugos da agricultura rural. Diante deste cenário, o presente trabalho tem como objetivo avaliar o potencial de resíduos lignocelulósicos de palha de milho e de bagaço de cana para a produção artesanal de celulose.

2. Material e método

O experimento foi executado no município de Paragominas/PA, no laboratório de Ciências Florestais pertencente a Universidade Federal Rural da Amazônia *campus* Paragominas.

Neste estudo foram utilizados resíduos lignocelulósicos provenientes da palha de milho e do bagaço de cana, os quais são insumos excedentes da agricultura local da região de Paragominas. A palha de milho foi coletada na colônia Cachoeira do Potiriá, proveniente da agricultura familiar, enquanto o bagaço de cana foi obtido após a moagem, através do produtor de caldo de cana local.

Após a coleta, os resíduos foram secos no ambiente e em seguida cortados manualmente com auxílio de uma tesoura para conversão em pedaços menores para facilitar o processo de cozimento (Figura 1), no entanto não foi utilizada peneira para classificação e padronização da classe granulométrica.



Figura 34 – Resíduos lignocelulósicos palha de milho (A) e bagaço de cana (B).

Fonte: Autoras (2024)

A análise anatômica das fibras dos materiais lignocelulósicos provenientes da palha de milho e bagaço de cana foram realizados inicialmente com cortes no material em pequenos pedaços para efetuar o processo de maceração. Em seguida, ocorreu a transferência do material selecionado para frascos de vidros sendo misturados com solução ácido acético + peróxido de hidrogênio, na proporção 1:1 e mantidos em estufa a 60°C por 48 horas para a desagregação dos elementos constituintes, seguindo a metodologia descrita por Franklin (1937).

Posteriormente, o material resultante do processo de maceração foi lavado para remoção dos reagentes e produtos não desejados da reação e coradas com Safranina. As

imagens das fibras foram captadas através do microscópio de luz (Motic, série BA310), com as respectivas lentes de aumento de 4x para a obtenção das imagens para medições referentes ao comprimento das fibras, enquanto a lente de 40x foi utilizada para a mensuração da largura da fibra e o diâmetro do lúmen. Foram realizadas para cada biomassa 25 medições para cada um dos parâmetros citados com auxílio do software livre ImageJ. A espessura da parede foi obtida pela relação entre a largura da fibra e o diâmetro do lúmen, dividido por dois. A fração parede corresponde à relação de duas vezes a espessura da parede dividida pela largura da fibra e multiplicada por cem.

A determinação da densidade básica dos resíduos lignocelulósicos seguiu a metodologia adaptada descrita pela NBR11941:2003 para determinação da densidade básica de cavacos de madeira, conforme a Equação 1.

(1)

$$Db = \frac{1}{\left(\frac{m1}{m2}\right) - 0{,}346}$$

Onde: Db: Densidade básica da biomassa lignocelulósica ($g.cm^{-3}$); m1: Massa úmida da amostra (g); m2: Massa seca em estufa (g)

Para o processo de polpação, utilizou-se Hidróxido de sódio de grau comercial, adquirido em supermercado local. Para cada 100g para de resíduo, foi utilizado 10g de hidróxido de sódio (NaOH) diluído em 100 ml de água destilada. Após o processo, a solução foi despejada em um recipiente com o resíduo lignocelulósico e submetida ao cozimento do material por 25 minutos. Por conseguinte, foi realizada a lavagem da massa em água corrente, para retirada das impurezas e resquícios da solução.

Após cozimento e lavagem, o material foi submetido a trituração com auxílio de um utensílio elétrico tipo mixer para tornar a massa mais homogênea e melhorar a textura final. Todos os processos foram igualmente realizados para a palha de milho e o bagaço de cana.

Para calcular o rendimento da polpa celulósica foi determinado o peso inicial de cada biomassa lignocelulósica selecionada. Posteriormente, o peso final foi obtido após o processo secagem em estufa da polpa celulósica. Assim, o rendimento da polpa celulósica (Equação 2) representa a relação entre o peso final, após os procedimentos de polpação, e o peso inicial na condição original da biomassa.

(2)

$$R = \frac{Pf}{Pi} \times 100$$

Onde: R = Rendimento da polpa celulósica (%); Pf = Peso final (g); Pi = Peso inicial (g)

Finalizada a homogeneização das polpas foi realizado a formação da folha de celulose com o auxílio de uma tela formadora. A formação da folha a partir de fibras não-lenhosas, foi realizada com o despejo da polpa em um recipiente com água. Em seguida, a polpa foi cuidadosamente posicionada sobre o molde com tela, permitindo a formação de uma camada fina e homogênea. Após essa etapa, foi realizado o processo de secagem natural do material.

Após o processo de formação da folha sobre tela com malha, as mesmas foram retiradas da tela formadora e postas em folhas de papel e, em seguida, submetidas a prensagem. As folhas produzidas a partir dos resíduos lignocelulósicos passaram por secagem natural por 72 horas. Em seguida, foram desenformadas para realizar a análise físico-visual das folhas de papel.

3. Resultados e discussão

O valor de densidade básica obtido foi de 0,161 g.cm^{-3} para a palha de milho e 0,069 g.cm^{-3} para o bagaço de cana. Nota-se que as espécies madeireiras apresentam densidade básica consideravelmente maior em comparação com a palha de milho e o bagaço de cana.

Em relação aos parâmetros morfológicos das fibras, os valores são apresentados na Tabela 1.

Tabela 24 – Caracterização morfológicas das fibras da palha de milho e bagaço de cana

Material	Parâmetros	Parâmetros morfológicos				
		Fibras				
		C	L	DL	EP	FP
Palha de milho	Média	1,08	10,57	5,22	2,68	52,21
	DP	0,15	2,92	2,74	0,89	14,93
	CV%	14,09	27,63	52,44	33,08	28,60
Bagaço de cana	Média	1,13	10,19	6,07	2,06	41,84
	DP	0,41	2,46	2,48	0,62	12,53
	CV%	36,17	24,11	40,81	30,07	29,96

Legenda: DP: Desvio Padrão; CV%: Coeficiente de Variação**;** C: Comprimento da fibra (mm); L: Largura da fibra (µm); DL: Diâmetro do Lúmen (µm); EP: Espessura da Parede (µm); FP: Fração Parede (%).

Os resultados revelam comprimento médio superior para fibras do bagaço de cana, totalizando 1,13 mm, enquanto a palha de milho apresentou comprimento médio ligeiramente

inferior, atingindo 1,08 mm. Portanto, ambas biomassas apresentam fibras com comprimento semelhantes. No contexto da produção de celulose, as indústrias categorizam as fibras em dois tipos: longas, que possuem comprimento médio entre 3,0 mm a 6 mm, e curtas, que se situam entre 0,5 mm a 1,5 mm (BIAZUS; HORA; LEITE, 2010).

Em comparação com os valores médios de comprimento das fibras da palha de milho e do bagaço de cana obtidos neste estudo, Romão (2015) identificou valor ligeiramente superior para o comprimento da fibra da palha de milho, atingindo 1,790 mm. Em relação ao bagaço de cana, a pesquisa conduzida por Fioritii, Koga e D'Almeida (2015), o comprimento médio das fibras foi registrado em 0,80 mm, sendo um valor inferior ao encontrado neste estudo, mas ainda dentro da faixa de classificação de fibras curtas.

Analisando outros parâmetros morfológicos das fibras, sobressai que a biomassa lignocelulósica da palha de milho registrou os maiores valores para largura da fibra, espessura e fração da parede, atingindo respectivamente 10,57 µm, 2,68 µm e 52,21 %, enquanto o bagaço de cana demonstrou maior diâmetro do lúmen, com 6,07 µm.

De acordo com os autores Foelkel e Barrichelo (1975) informam que a fração parede é um índice que mantem relação com a qualidade de celulose produzida, desse modo, materiais fibrosos com fração parede elevada apresentam fibras mais rígidas e pouco flexíveis, afetando as propriedades de resistência do papel. Nesse mesmo sentindo, materiais que apresentam valores altos para fração parede, produzem papéis de rede solta e frouxa, dificultando a ligação entre as fibras, e acarretando a produção de um papel mais poroso, volumoso, rugoso e absorvente (FOELKEL 2007).

Torna-se importante salientar, que a largura da fibra constitui uma característica morfológica de destaque, uma vez que pode influenciar diversos indicadores de qualidade do papel, bem como, outras propriedades como flexibilidade e rigidez (PEGO; BIANCHI; VEIGA, 2019). Os mesmos autores, enfatizam que o diâmetro do lúmen guarda uma relação inversa com a espessura da parede da fibra e com a densidade da biomassa, o que se verifica ao compararmos os resultados obtidos para o bagaço de cana, cujo maior diâmetro do lúmen se correlaciona com uma menor espessura da parede e menor densidade básica.

Ao final do processo de polpação, o maior rendimento foi para a palha de milho, atingindo 32,31%, já o bagaço de cana apresentou um rendimento final de 28,96%. Esses valores podem estar associados, principalmente ao percentual de celulose, uma vez que se trata do principal componente químico presente nas polpas e papéis, pois durante o processo de

polpação o objetivo é eliminar os demais componentes químicos, mantendo somente a celulose. De acordo com dados de Wastowski (2018) a palha de milho pode ter de 30 a 50% de celulose e o bagaço de cana de 32 a 48%, valores relativamente próximos, indicando que a palha de milho, neste experimento, possui maior percentual de celulose em relação ao bagaço de cana. Entretanto, essa interpretação deve ser considerada como uma hipótese, uma vez que não foi realizada a caracterização da composição química das amostras utilizadas neste estudo, sendo necessária está análise para complementação.

Estudo conduzido por Jesus *et al*. (2022) esclarece que os rendimentos podem variar consideravelmente, dependendo do tipo de processo de polpação, ou seja, processos de alto rendimento, como os semiquímicos, podem atingir valores entre 80% e 97%, enquanto os processos químicos, sejam alcalinos ou ácidos, resultam em rendimentos inferiores, na faixa de 45% a 55%.

Os resultados da polpa celulósica proveniente da palha de milho e do bagaço de cana foram positivos e verificou-se que a polpa artesanal apresentou fibras dissociadas e amolecidas após o cozimento (Figura 2).



Figura 35 – Fibras de palha de milho (A) e bagaço de cana (B) após processo de cozimento
Fonte: Autoras (2024)

Embora as fibras tenham sido amolecidas e dissociadas, foi observada a presença de feixes visíveis. Desta forma, para obter uma polpa mais uniforme, foi realizada a trituração do material para homogeneização, como ilustrado na Figura 3.



Figura 36 – Fibras após processo de trituração para palha de milho (A) e bagaço de cana (B)
Fonte: Autoras (2024)

Finalizada a homogeneização das polpas foi realizado a formação da folha de papel com o auxílio de uma tela formadora. A formação do papel a partir de fibras não-lenhosas, foi realizada com o despejo da polpa em um recipiente com água. Em seguida, a polpa foi cuidadosamente posicionada sobre o molde com tela, permitindo a formação de uma camada fina e homogênea (Figura 4). Após essa etapa, foi realizado o processo de secagem natural do material.



Figura 37 – Polpa celulósica seca da palha de milho (A) e bagaço de cana (B)

Fonte: Autoras (2024)

Observa-se diferença de tonalidade entre os papéis derivados da palha de milho e do bagaço de cana. O papel originário da palha de milho exibe coloração mais amarelada, remanescente da tonalidade natural da própria palha. Por outro lado, o papel proveniente do bagaço de cana apresenta tonalidade mais esbranquiçada. Mediante a análise físico-visual, foi possível observar que as folhas de papel secas em ambas as biomassas lignocelulósicas

exibiram textura áspera, no entanto a palha de milho revelou grau mais elevado de aspereza, resultando em uma propensão maior ao esfarelamento ao ser manuseada. Por outro lado, o papel proveniente do bagaço de cana apresentou textura com grau inferior de aspereza e menor tendência ao esfarelamento.

Em suma, todos as características analisadas anteriormente na produção do papel artesanal, proveniente da palha de milho, foram semelhantes aos resultados obtidos de Romão (2015), onde apresentou atributos como textura áspera, coloração mais amarelada e aspecto homogêneo. Da mesma forma, os resultados do presente estudo para o papel artesanal feito do bagaço de cana, se assemelham aos realizados por Ramos *et al*. (2018), que também observaram produção de papéis com formato regular, sem presença de ranhuras e coloração clara.

O papel resultante da polpação dos resíduos lignocelulósicos exibe características satisfatórias para uma ampla variedade de aplicações, com destaque para polpa celulósica proveniente do bagaço de cana apresentando menor propensão ao esfarelamento, além de melhor consistência para a formação de papéis. Consequentemente, o papel fabricado a partir do bagaço de cana demonstra características mais adequadas usos como embalagens, envelopes e artesanato.

4. Conclusão

A análise dos resíduos lignocelulósicos de palha de milho e bagaço de cana revelaram possuir grande potencial para a produção artesanal de polpa celulósica, empregando biomassas não-lenhosas. A palha de milho apresentou maior densidade básica e maior rendimento de polpa em relação ao bagaço de cana, no entanto a folha formada apresentou maior aspereza e um maior esfarelamento do material. Por outro lado, o bagaço de cana apresentou fibras com menor fração parede e apresentou menor grau de esfarelamento em comparação com a palha de milho.

Referências bibliográficas

Aguiar, A., & Ferraz, A. (2011). Mecanismos envolvidos na biodegradação de materiais lignocelulósicos e aplicações tecnológicas correlatas. Química Nova, 34, 1729-1738.

Betini, M. A., & Galatti, P. E. (1995). Curso de pasta mecânica. Associação Brasileira Técnica de Celulose e Papel.

Biazus, A., Hora, A. B., & Leite, B. G. P. (2010). Panorama de mercado: celulose. BNDES Setorial, 32, 311-370.

Bonomi, A., Maiorano, A. E., & Rodrigues, M. (2008). Técnica aproveita lignocelulose da cana para produzir etanol. Visão Agrícola, 8, 29-33.

Fioritti, R. R., Koga, M. E. T., & D'Almeida, M. L. O. (2015). Efeito da adição de fibras de bagaço de cana de açúcar nas propriedades de folhas formadas em laboratório. In Proceedings of the 48th ABTCP International Pulp and Paper Congress & 1st Ibero-American Conference on the Bio-Economy – *BEM* (pp. 1-9). ABTCP & RIADICYP.

Foelkel, C. (2007). As fibras dos eucaliptos e as qualidades requeridas na celulose kraft para a fabricação de papel. Eucalyptus Online Book & Newsletter.

Foelkel, C. E., & Barrichelo, L. E. G. (1975). Tecnologia de celulose e papel. USP/ESALQ-CALQ.

Franklin, G. L. (1937). Permanent preparations of macerated wood fibers. Tropical Woods, 49, 21-22.

Indústria Brasileira de Árvores (IBÁ). (2025). Relatório anual 2025. https://iba.org/wp-content/uploads/2025/10/relatorioAnual2025.pdf

Jesus, A. F. S., et al. (2022). Aspectos gerais sobre a indústria brasileira de polpa celulósica e papel. Brazilian Journal of Development, *8*(6), 45984-45999. https://doi.org/10.34117/bjdv8n6-220

Oliveira, G. K. C., et al. (2019). Resíduos agrícolas do nordeste brasileiro e seu potencial lignocelulósico. In G. F. Silva et al. (Eds.), Energias alternativas: Tecnologias sustentáveis para o nordeste brasileiro. API.

Pego, M. F., Bianchi, M. L., & Veiga, T. R. L. A. (2019). Avaliação das propriedades do bagaço de cana e bambu para produção de celulose e papel. Revista de Ciências Agrárias*:* Amazonian Journal of Agricultural and Environmental Sciences, 62.

Pires, O. A. B., et al. (2016). Pré-tratamento enzimático de resíduos lignocelulósicos para sacarificação. In Anais do XII Seminário Brasileiro de Tecnologia Enzimática. Universidade de Caxias do Sul.

Ramos, J. C., et al. (2018). Fabricação de papel utilizando celulose extraída do bagaço de cana-de-açúcar com adição de amido extraído da casca de batata como aditivo. *Revista* Técnico-Científica do IFSC, 2(7), 40-51.

Romão, D. R. (2015). Potencial de fibras de resíduo agrícola: Palha de milho (Zea mays L.) para produção de celulose (Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade de Brasília).

Wastowski, A. D. (2018). *Química da madeira* (1ª ed.). Interciência.

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Produção e caracterização de biocarvões da biomassa residual de seringueira para incorporação de fertilizantes

Kleryton L. A. de Oliveira[1] , Braulio da S. de Oliveira[2], Antonio M. Netto[1] , Antônio de Pádua Alvarenga[3], Angélica de C. O. Carneiro[2] , Daniel A. S. Rodrigues[1], Renata P. L. Moreira[1]

[1]Departamento de Química, UFV.

[2]Departamento de Engenharia Florestal, UFV.

[3]Empresa de Pesquisa Agropecuária de Minas Gerais, EPAMIG.

Resumo: O aproveitamento de resíduos lignocelulósicos para produção de biocarvões é uma estratégia promissora para melhoria da qualidade do solo e desenvolvimento de sistemas de liberação controlada de fertilizantes. Neste trabalho, avaliou-se a influência da temperatura e do tempo de pirólise nas propriedades de biocarvões obtidos da biomassa residual da seringueira (*Hevea brasiliensis*), visando sua aplicação como matriz para incorporação de fertilizantes. A biomassa foi submetida à pirólise a 450, 550 e 650 °C, por 30, 45 e 60 minutos. Os materiais foram caracterizados por FTIR, análise elementar, diagrama de Van Krevelen e adsorção/desorção de N_2 (BET). Observou-se redução de grupos hidroxila e aumento da aromaticidade. As razões H/C e O/C diminuíram com a intensidade do processo, indicando maior carbonização e estabilidade química. A área superficial específica aumentou de 0,86 para 25,13 $m^2\ g^{-1}$, evidenciando o desenvolvimento da porosidade.

Palavras-chave: Economia Circular; Liberação Controlada; Condicionador de Solo.

Production and characterization of biochars from residual rubber tree biomass for fertilizer incorporation

Abstract: The use of lignocellulosic residues for biochar production is a promising strategy for improving soil quality and developing controlled-release fertilizer systems. In this study, the influence of pyrolysis temperature and residence time on the properties of biochars produced from rubber tree (*Hevea brasiliensis*) biomass was evaluated, aiming at their application as a matrix for fertilizer incorporation. The biomass was subjected to pyrolysis at 450, 550, and 650 °C for 30, 45, and 60 minutes. The materials were characterized by FTIR, elemental analysis, Van Krevelen diagram, and N_2 adsorption (BET). A reduction in hydroxyl groups and an increase in aromaticity were observed. The H/C and O/C ratios decreased with increasing process intensity, indicating a higher degree of carbonization and chemical stability. The

specific surface area increased from 0.86 to 25.13 $m^2 g^{-1}$, demonstrating the development of porosity.

Keywords: Circular Economy; Controlled Release; Soil Conditioner.

1. Introdução

O crescimento da demanda mundial por alimentos tem intensificado o uso de fertilizantes minerais na agricultura, tornando-os essenciais para manter a produtividade dos cultivos. Entretanto, a baixa eficiência de aproveitamento desses insumos, associada às perdas por lixiviação, volatilização e escoamento superficial, contribui para impactos ambientais, aumento dos custos de produção e redução da disponibilidade de nutrientes às plantas (Wang et al., 2022). Nesse contexto, estratégias que promovam maior eficiência no uso de fertilizantes têm despertado crescente interesse, destacando-se o emprego de materiais carbonáceos capazes de atuar como matrizes para retenção e liberação controlada de nutrientes.

Entre esses materiais, o biocarvão destaca-se por apresentar elevada estabilidade química, estrutura porosa e grupos funcionais superficiais capazes de favorecer a retenção de água e nutrientes, reduzir perdas por lixiviação, aumentar a capacidade de troca catiônica e melhorar as propriedades físicas, químicas e biológicas do solo (Joseph et al., 2021; Tomczyk et al., 2020). Essas características tornam o biocarvão um material promissor tanto como condicionador de solo quanto como suporte para incorporação de fertilizantes de liberação lenta, contribuindo para o aumento da eficiência agronômica e para uma agricultura mais sustentável (Schmidt et al., 2021).

Entre os resíduos de biomassas lignocelulósicas, destacam-se os provenientes da seringueira (*Hevea brasiliensis*), espécie amplamente cultivada para produção de látex. Após, aproximadamente, 25 a 30 anos de exploração, as árvores são substituídas, gerando grandes volumes de resíduos lenhosos, estimados em cerca de 2,1 m^3 por árvore, que frequentemente apresentam baixo aproveitamento econômico (Amorim et al., 2023). Esses resíduos apresentam elevado teor de lignina (25-30%), característica que favorece a produção de biocarvões com maior rendimento, estabilidade térmica e elevado grau de aromaticidade durante a pirólise (Amorim et al., 2023; Haryanto et al., 2021).

O desenvolvimento de estruturas porosas, associado ao aumento da estabilidade química decorrente da carbonização da biomassa, pode favorecer a retenção de nutrientes e sua liberação

gradual após aplicação no solo, reduzindo perdas e aumentando a eficiência de utilização pelos cultivos (Wang et al., 2022).

Dessa forma, o presente trabalho teve como objetivo produzir biocarvões a partir da biomassa residual da seringueira em diferentes temperaturas e tempos de pirólise, avaliando seu potencial como matriz para incorporação de fertilizantes visando à aplicação em solo.

2. Material e métodos

A biomassa utilizada foi proveniente de uma plantação de seringueira pertencente a um polo de pesquisa da Empresa de Pesquisa Agropecuária de Minas Gerais (EPAMIG), localizada no município de Oratórios, Zona da Mata de Minas Gerais, Brasil (20°24'10,2"S, 42°48'57,1"W). Inicialmente, o tronco da seringueira foi seccionado em toras de aproximadamente 1 m de comprimento e mantido em secagem ao ar livre por cinco dias (Figura 1). Em seguida, as toras foram cortadas em toretes e processadas para a obtenção de cavacos com dimensões adequadas, de modo a favorecer a transferência de calor e uniformidade térmica durante o processo de pirólise.

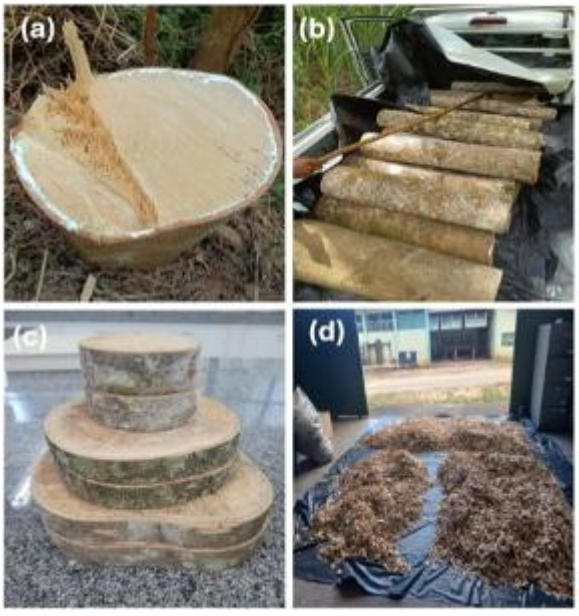


Figura 1. Imagens das etapas de preparo da biomassa lignocelulósica da seringueira (*Hevea brasiliensis*): (a) corte do tronco da árvore; (b) coleta e transporte das toras; (c) preparo dos toretes; e (d) processamento da biomassa em cavacos utilizados na etapa de pirólise.

Posteriormente, o material obtido foi submetido à secagem em estufa a 100 °C por 24 horas até a massa absolutamente seca. Após essa etapa, a biomassa seca foi adicionada ao reator de bancada, tipo mufla, para a realização da pirólise, em atmosfera com ausência ou baixa

concentração de O_2, de acordo com as temperaturas estabelecidas de 450, 550 e 650 °C e os tempos de 30, 45 e 60 minutos.

. A análise elementar CHNS foi realizada utilizando um analisador elementar LECO TruSpec Micro, seguindo a norma ASTM D5373-21, enquanto o teor de oxigênio foi calculado por diferença, utilizando a Eq. 1.

$$\%O = 100\% - (\%C + \%H + \%N + \%S + \%cinzas) \quad \text{(Eq. 1)}$$

As propriedades texturais do BC e da BM foram avaliadas por isotermas de adsorção-dessorção de nitrogênio, utilizando um analisador Nova 600 Series (Anton Paar). As amostras, com tamanho de partícula de 35 mesh, foram submetidas a pré-tratamento térmico para remoção da umidade e dos gases adsorvidos. A biomassa foi desgaseificada a 120 °C por 4 h, enquanto o BC foi desgaseificado a 220 °C pelo mesmo período. A área superficial específica foi determinada pelo método BET (Brunauer-Emmett-Teller), e a distribuição do tamanho dos poros foi analisada com base no modelo BJH (Barrett-Joyner-Halenda).

A espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier (FTIR) na região média foi realizada por meio do espectrômetro Bruker FT-IR Alpha II, provido de acessório ATR Platinum, com 54 varreduras.

3. Resultados e discussão

Os espectros de infravermelho com transformada de Fourier (FTIR) da biomassa e dos biocarvões produzidos são apresentados na Figura 2.

Figura 2. Espectros de infravermelho com transformada de Fourier (FTIR) da biomassa e dos biocarvões produzidos em **(a)** BC1 (450 °C / 30 min), BC2 (450 °C / 45 min), BC3 (450 °C / 60 min) **(b)** BC4 (550 °C / 30 min), BC5 (550 °C / 45 min), BC6 (550 °C / 60 min) **(c)** BC7 (650 °C / 30 min), BC8 (650 °C / 45 min), BC9 (650 °C / 60 min).

Pode-se observar uma banda larga em torno de 3300 cm^{-1}, atribuída às vibrações de estiramento O-H, provenientes de grupos hidroxila e da água adsorvida. Essa banda apresentou redução progressiva com o aumento da temperatura de pirólise, indicando a ocorrência de processos de desidratação, desidroxilação e descarboxilação da matriz lignocelulósica (Tu et al., 2022). A banda em 1016 cm^{-1}, associada ao estiramento C-O de polissacarídeos (celulose e hemiceluloses), praticamente desapareceu após a pirólise, confirmando a degradação térmica

dessas estruturas (Traoré et al., 2016). Em contrapartida, surgiu uma banda em aproximadamente 1575 cm^{-1}, atribuída às vibrações de estiramento C=C do esqueleto aromático, evidenciando a formação de estruturas carbonáceas aromáticas. A diminuição de sua intensidade a 650 °C pode estar relacionada ao aumento da condensação aromática e do ordenamento estrutural do carbono (Chen et al., 2022). O aparecimento da banda próxima a 875 cm^{-1} pode ser atribuído às vibrações de deformação fora do plano das ligações C-H de anéis aromáticos substituídos, corroborando o aumento da aromaticidade e da condensação estrutural do biocarvão durante a pirólise (Domingues et al., 2017).

Os resultados da área superficial e volume de poros da biomassa e dos biocarvões são mostrados na Tabela 1. Pode-se observar que o aumento da temperatura e do tempo de pirólise promoveu o desenvolvimento progressivo da estrutura porosa dos biocarvões. De forma semelhante, observou-se um aumento do volume de poros em relação à biomassa precursora, indicando que a eliminação progressiva dos compostos voláteis favoreceu a formação de novos poros e a abertura da estrutura carbonácea.

Tabela 1 - Área superficial e volume de poros da biomassa e dos biocarvões produzidos em diferentes tempos e temperaturas

Amostra	**Área superficial (m^2 g^{-1})**	**Volume de poros (cm^3 g^{-1})**
Biomassa	0,86	0,000195
BC1 (450 °C / 30 min)	2,02	0,008228
BC2 (450 °C / 45 min)	2,50	0,000471
BC3 (450 °C / 60 min)	3,91	0,001243
BC4 (550 °C / 30 min)	7,85	0,006118
BC5 (550 °C / 45 min)	10,56	0,005741
BC6 (550 °C / 60 min)	11,12	0,007114
BC7 (650 °C / 30 min)	18,82	0,006789
BC8 (650 °C / 45 min)	20,43	0,007245
BC9 (650 °C / 60 min)	25,13	0,007412

A pirólise de materiais lignocelulósicos promove a degradação sucessiva da hemiceluloses, celulose e, posteriormente, da lignina, promovendo a liberação de compostos voláteis e o rearranjo estrutural do carbono (Ullah et al., 2025). Como consequência, ocorre aumento da porosidade e da área superficial específica, propriedades diretamente relacionadas

ao potencial de adsorção e retenção de espécies químicas (de Oliveira et al., 2026; Tomczyk et al., 2020). Em geral, maior área superficial apresenta maior quantidade de sítios ativos e poros disponíveis para incorporação de nutrientes, tornando-os candidatos promissores para sistemas de liberação controlada, o que possibilita a melhoria das propriedades físicas e químicas do solo (Marcińczyk & Oleszczuk, 2022; Ullah et al., 2025).

A composição elementar dos biocarvões apresentou modificações significativas com o aumento da temperatura e do tempo de pirólise (Tabela 2). Observou-se aumento do teor de carbono, que passou de, aproximadamente,70% nos BC produzidos a 450 °C para, aproximadamente,80% nos BC produzidos a 650 °C. Entretanto, os teores de hidrogênio e oxigênio apresentaram redução contínua. Essas alterações estão associadas às reações de desidratação, descarboxilação e descarbonilação, responsáveis pela remoção de água, CO e CO_2 e pelo enriquecimento relativo em carbono da matriz carbonácea (de Oliveira et al., 2026).

Tabela 2 - Composição elementar (CHNS) e razões atômicas H/C e O/C da biomassa e dos biocarvões de seringueira produzidos em diferentes tempos (30, 45 e 60 min) e temperaturas (450, 550 e 650 °C)

Prop.	**BM**	**450° C/30**	**550° C/30**	**650° C /30**	**450° C/45**	**550° C/45**	**650° C/45**	**450° C/60**	**550° C /60**	**650° C/60**
C (%)	44,20	68,68	74,48	78,65	68,34	76,84	79,94	69,74	75,57	79,67
N (%)	0,12	0,27	0,34	0,29	0,28	0,32	0,26	0,30	0,29	0,26
H (%)	6,10	3,25	2,71	2,26	3,04	2,69	1,96	3,02	2,54	1,90
S (%)	ND*	0,08	0,09	0,12	0,08	0,12	0,11	0,10	0,11	0,11
O (%)	49,68	20,78	15,40	10,78	21,15	13,32	10,68	19,33	15,41	11,28
H/C	1,66	0,56	0,43	0,34	0,53	0,42	0,29	0,52	0,40	0,28
O/C	0,84	0,23	0,15	0,10	0,23	0,13	0,10	0,21	0,15	0,11

Prop.: Propriedade; ND: Não detectado.

Pode-se observar a diminuição da razão H/C em relação à biomassa, indicando aumento do grau de aromaticidade e da condensação das estruturas carbonáceas, formando estruturas policondensadas. A diminuição da razão O/C reflete a remoção de grupos oxigenados e, portanto, a diminuição da polaridade superficial do material. Esse comportamento confirma a

evolução estrutural observada por FTIR, caracterizada pela redução das bandas atribuídas aos grupos hidroxila, assim como surgimento das bandas associadas às estruturas aromáticas.

Essas transformações são mostradas no diagrama de Van Krevelen (Figura 3).

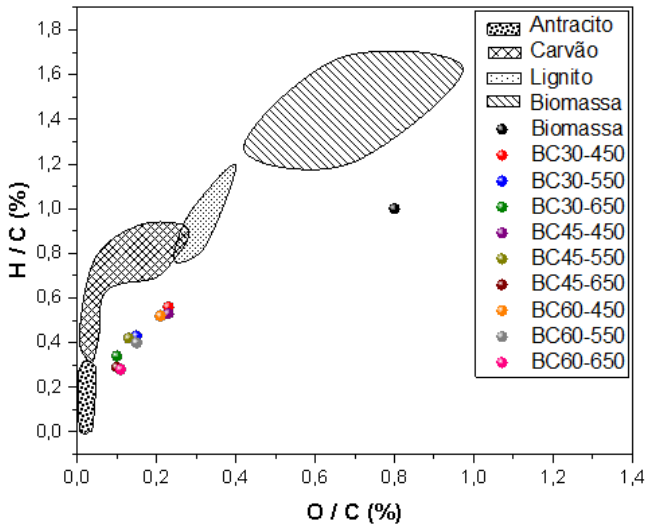


Figura 3. Diagrama de Van Krevelen (razões atômicas H/C versus O/C) da biomassa e dos biocarvões de seringueira produzidos em diferentes temperaturas e tempos de pirólise.

Os resultados apresentados no diagrama de Van Krevelen também apresentam estreita relação com os resultados da análise imediata. Durante a pirólise, a decomposição térmica da biomassa promove intensa liberação de compostos voláteis, resultando no aumento do carbono fixo. Como consequência, ocorre enriquecimento relativo em carbono e redução das razões H/C e O/C, indicando a formação de um material progressivamente mais aromático, mais condensado e termicamente mais estável (Wang et al., 2023).

Todos os BC produzidos apresentaram razões H/C inferiores a 0,7. Segundo o *European Biochar Certificate* (EBC, 2025), biocarvões com $H/C_{org} < 0,7$ apresentam elevada estabilidade no solo e maior resistência à degradação microbiana. Essas características são particularmente desejáveis para aplicações agrícolas, promovendo maior retenção de nutrientes e reduzindo perdas por lixiviação. Além disso, contribuem para o sequestro de carbono no solo.

4. Conclusões

Os resultados demonstraram que o aumento da temperatura e do tempo de pirólise da biomassa residual de seringueira (*Hevea brasiliensis*) promoveu modificações estruturais significativas nos biocarvões produzidos. As análises de FTIR sugerem a progressiva eliminação de grupos oxigenados e o aumento da aromaticidade da matriz carbonácea. A análise elementar confirmou a redução das razões H/C e O/C, indicando maior grau de carbonização e estabilidade química dos materiais, especialmente naqueles obtidos a 650 °C. O desenvolvimento da estrutura porosa, evidenciado pelo aumento da área superficial específica, reforça o potencial desses biocarvões como matrizes para incorporação e liberação controlada de fertilizantes.

5. Agradecimentos

CAPES, CNPq: 305608/2025-8, 405828/2022-5, 407799/2022-2 e 444395/2024-5;
FAPEMIG: RED-00144-22, APQ- 02111-22 , APQ-03572-23, APQ-05311-24 e APQ-04599-25; EPAMIG.

6. Referências bibliográficas

Amorim, E. P., Longui, E. L., Freitas, M. L. M., Yamaji, F. M., da Silva, F. G., de Moraes, M. A., Cambuim, J., de Moraes, M. L. T., & de Souza Gonçalves, P. (2023). WOOD QUALITY OF TEN CLONAL PROGENIES OF RUBBER TREE AS RAW MATERIAL FOR BIOENERGY. *Maderas: Ciencia y Tecnologia*, *25*. https://doi.org/10.4067/s0718-221x2023000100428

ASTM INTERNATIONAL. *Standard Test Methods for Determination of Carbon, Hydrogen and Nitrogen in Analysis Samples of Coal and Carbon in Analysis Samples of Coal and Coke*. ASTM D5373-21. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2021. DOI: 10.1520/D5373-21. Chen, D., Cen, K., Zhuang, X., Gan, Z., Zhou, J., Zhang, Y., & Zhang, H. (2022). Insight into biomass pyrolysis mechanism based on cellulose, hemicellulose, and lignin: Evolution of volatiles and kinetics, elucidation of reaction pathways, and characterization of gas, biochar and bio-oil. *Combustion and flame*, *242*.
https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2022.112142

de Oliveira, K. L. A., Ferreira de Matos, A. L., de Oliveira Brahim Cortez, M., Netto, A. M., Silva de Souza, N. C., Oliveira Carneiro, A. de C., & Moreira, R. P. L. (2026). Upcycling Orange-Derived Peel and Bagasse into $ZnCl_2$ -Activated Biochar for Sustainable Enrofloxacin Removal. *ACS Omega*.
https://doi.org/10.1021/acsomega.6c00992

Domingues, R. R., Trugilho, P. F., Silva, C. A., De Melo, I. C. N. A., Melo, L. C. A., Magriotis, Z. M., & Sánchez-Monedero, M. A. (2017). Properties of biochar derived from wood and high-nutrient biomasses with the aim of agronomic and environmental benefits. *PLoS ONE*, *12*(5). https://doi.org/10.1371/journal.pone.0176884

E European Biochar Certificate (EBC). (2025). *European Biochar Certificate: Guidelines for a sustainable production of biochar* (Version 10.5E). Carbon Standards International. http://carbon-standards.com/ebc

Haryanto, A., Hidayat, W., Hasanudin, U., Iryani, D. A., Kim, S., Lee, S., & Yoo, J. (2021). Valorization of indonesian wood wastes through pyrolysis: A review. *Energies*, *14*(5). https://doi.org/10.3390/en14051407

Joseph, S., Cowie, A. L., Van Zwieten, L., Bolan, N., Budai, A., Buss, W., Cayuela, M. L., Graber, E. R., Ippolito, J. A., Kuzyakov, Y., Luo, Y., Ok, Y. S., Palansooriya, K. N., Shepherd, J., Stephens, S., Weng, Z., & Lehmann, J. (2021). How biochar works, and when it doesn't: A review of mechanisms controlling soil and plant responses to biochar. Em *GCB Bioenergy* (Vol. 13, Número 11, p. 1731–1764). John Wiley and Sons Inc. https://doi.org/10.1111/gcbb.12885

Marcińczyk, M., & Oleszczuk, P. (2022). Biochar and engineered biochar as slow- and controlled-release fertilizers. Em *Journal of Cleaner Production* (Vol. 339). Elsevier Ltd. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.130685

Tomczyk, A., Sokołowska, Z., & Boguta, P. (2020). Biochar physicochemical properties: pyrolysis temperature and feedstock kind effects. Em *Reviews in Environmental Science and Biotechnology* (Vol. 19, Número 1, p. 191–215). Springer. https://doi.org/10.1007/s11157-020-09523-3

Traoré, M., Kaal, J., & Martínez Cortizas, A. (2016). Application of FTIR spectroscopy to the characterization of archeological wood. *Spectrochimica Acta - Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, *153*, 63–70. https://doi.org/10.1016/j.saa.2015.07.108

Tu, P., Zhang, G., Wei, G., Li, J., Li, Y., Deng, L., & Yuan, H. (2022). Influence of pyrolysis temperature on the physicochemical properties of biochars obtained from herbaceous and woody plants. *Bioresources and Bioprocessing*, *9*(1).

https://doi.org/10.1186/s40643-022-00618-z

Ullah, Z., Joseph, C. G., Tian, Z.-Y., Yasin, M., Khan, M. N., Alshehri, A. S., Ali, S., Khan, A., Suazo-Hernández, J., Poblete-Grant, P., & Nabeel, M. I. (2025). *The Production of Biochar and Its Impact on the Removal of Various Pollutants of Emerging Concerns from Wastewater: A Comprehensive Review*.

https://doi.org/10.20944/preprints202510.2273.v1

Wang, C., Luo, D., Zhang, X., Huang, R., Cao, Y., Liu, G., Zhang, Y., & Wang, H. (2022). Biochar-based slow-release of fertilizers for sustainable agriculture: A mini review. Em *Environmental Science and Ecotechnology* (Vol. 10). Editorial Board, Research of Environmental Sciences. https://doi.org/10.1016/j.ese.2022.100167

Wang, S., Wang, Y., Shi, Z., Sun, K., Wen, Y., Niedzwiecki, L., Pan, R., Xu, Y., Zaini, I. N., Jagodzińska, K., Aragon-Briceno, C., Tang, C., Onsree, T., Tippayawong, N., Pawlak-Kruczek, H., Jönsson, P. G., Yang, W., Jiang, J., Kawi, S., & Wang, C. H. (2023). Van Krevelen diagrams based on machine learning visualize feedstock-product relationships in thermal conversion processes. *Communications Chemistry*, *6*(1). https://doi.org/10.1038/s42004-023-01077-z

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Propriedades da madeira de *Cenostigma tocantinum* Ducke. na FLONATA associadas ao uso tradicional indígena

Mayla Carvalho Costa[1]; Rafael Sostene Lopes de Sousa[1]; Letícia Alves Lima [2]; Marla Mayra Matias Ribeiro [2]; Fernando Wallase Carvalho Andrade [2]; Luiz Eduardo de Lima Melo [1].

[1] UEPA – Universidade do Estado do Pará;
[2] UFOPA – Universidade Federal do Oeste do Pará;

Resumo: A madeira de *Cenostigma tocantinum* Ducke possui importância ecológica, tecnológica e cultural na Amazônia, sendo utilizada por povos indígenas na produção de artefatos. Este estudo objetivou analisar suas propriedades anatômicas e tecnológicas na Floresta Nacional do Tapirapé-Aquiri (FLONATA), relacionando-as ao uso tradicional indígena. Foram analisadas amostras de 15 árvores quanto à anatomia, densidade básica e propriedades mecânicas. A madeira apresentou vasos predominantemente solitários (88%), anéis de crescimento distintos e fibras de paredes espessas, com densidade básica de 0,75 g·cm^{-3}. Na flexão, apresentou módulo de ruptura de 119,0 MPa e módulo de elasticidade de 15.530 MPa. Na compressão, a resistência máxima foi de 62,3 MPa e o módulo de elasticidade de 5.945 MPa. Os resultados demonstram elevado desempenho físico e mecânico, compatível com usos que exigem resistência e durabilidade.

Palavras-chave: Amazônia; Propriedades tecnológicas; Povos indígenas.

Wood properties of *Cenostigma tocantinum* Ducke in FLONATA associated with traditional Indigenous use

Abstract: The wood of *Cenostigma tocantinum* Ducke holds ecological, technological, and cultural significance in the Amazon, being used by indigenous peoples to craft various artifacts. This study aimed to analyze the wood's anatomical and technological properties within the Tapirapé-Aquiri National Forest (FLONATA) and relate them to traditional indigenous usage. Samples from 15 trees were analyzed for anatomy, basic density, and mechanical properties. The wood exhibited predominantly solitary vessels (88%), distinct growth rings, and thick-walled fibers, with a basic density of 0.75 g·cm^{-3}. In bending tests, it showed a modulus of rupture of 119.0 MPa and a modulus of elasticity of 15,530 MPa. Under compression, the maximum strength was 62.3 MPa, and the modulus of elasticity was 5,945 MPa. The results demonstrate high physical and mechanical performance, suitable for applications requiring strength and durability.

Keywords: Amazon; Technological properties; Indigenous peoples.

1262. Introdução

A Floresta Amazônica é reconhecida como uma das regiões de maior diversidade biológica do mundo e possui relevância estratégica tanto no âmbito ambiental quanto sociocultural (Santos et al, 2022). Entre os povos que habitam esse território estão as comunidades indígenas, caracterizadas por modos de organização social e cultural próprios. No Brasil, os povos indígenas estão presentes em diferentes Terras Indígenas (TIs), somando cerca de 900 mil indivíduos distribuídos em aproximadamente 305 etnias. No estado do Pará, que integra a Amazônia brasileira, vivem 36 etnias, ocupando cerca de 24% de sua extensão territorial.

Para essas comunidades, a floresta vai além de um espaço físico: constitui um território essencial para sua continuidade cultural, espiritual e material. O vasto conhecimento tradicional acumulado sobre o manejo e o uso da madeira tem papel central na preservação de práticas e saberes ancestrais, fundamentais à identidade indígena. Esse conhecimento ancestral evidencia a compreensão das características e propriedades tecnológicas das madeiras, transmitida entre gerações. Entretanto, parte significativa desses saberes ainda permanece pouco documentada, enquanto muitas das espécies utilizadas apresentam potencial tecnológico desconhecido ou ainda subaproveitado.

A Amazônia abriga cerca de 16 mil espécies arbóreas, das quais aproximadamente 170 a 300 apresentam potencial para exploração madeireira. Contudo, apenas um grupo restrito, estimado entre 30 e 70 espécies, concentra a maior parcela do mercado madeireiro, evidenciando a necessidade de ampliar os estudos científicos sobre espécies com potencial de utilização ainda pouco explorado. (Andrade et al, 2022). Em relatórios de pesquisas anteriores (14º Edital PIBIC/ICMBio 2020/2021 – Souza, 2021), foram registradas espécies com potencial de uso tecnológico como madeira sólida, entre as quais se destaca *Cenostigma tocantinum* Ducke (Fabaceae). Dados não publicados de romaneio referente ao ano de 2016 revelaram que essa espécie apresentou alta frequência de ocorrência (superior a 60%) em áreas suprimidas pela Companhia VALE S.A. na Floresta Nacional do Tapirapé-Aquiri (FLONATA).

Conhecida popularmente como pau-preto, *C. tocantinum* é uma espécie nativa de grande importância cultural e utilitária, especialmente na produção de artefatos que requerem alta resistência mecânica. Trata-se de um arbusto ou árvore endêmica do Brasil, restrita aos estados do Pará e Tocantins, na região amazônica (Gaem, 2020). Nos últimos anos, diferentes estudos vêm buscando aproximar o saber indígena das análises tecnológicas da madeira, promovendo

um diálogo entre ciência e tradição (Oliveira et al, 2021). No sudeste do Pará, pesquisas recentes registram o uso de espécies florestais nativas pelos povos indígenas Suruí Aikewara e Mẽbêngôkre Xikrin, com destaque para *C. tocantinum*, cuja madeira é empregada na confecção de bordunas e outros artefatos tradicionais (Santos et al, 2022; Ferreira, 2024). Apesar da relevância da madeira para a cultura material indígena, ainda são escassas as informações sobre suas propriedades tecnológicas e potenciais aplicações, bem como sobre os fatores que podem explicar sua seleção e uso preferencial por essas etnias.

Essa convergência entre a ocorrência de *C. tocantinum* na FLONATA, a escassez de estudos sobre suas propriedades tecnológicas e seu uso tradicional indígena reforça a relevância de investigar as características dessa espécie. Esse conhecimento pode contribuir para sua valorização cultural e para a identificação de novas possibilidades de utilização da madeira. O estudo de espécies pouco exploradas, como *C. tocantinum*, pode ampliar as alternativas para o uso sustentável dos recursos florestais, fortalecer a integração entre ciência, manejo florestal e valorização cultural e, potencialmente, contribuir para reduzir a pressão sobre espécies tradicionalmente comercializadas, favorecendo a resiliência socioambiental da região amazônica (Moreira et al, 2022).

Nesse cenário, a presente pesquisa tem como propósito investigar as propriedades anatômicas e tecnológicas da madeira de *C. tocantinum* na FLONATA, relacionando os resultados com os usos tradicionais atribuídos pelos povos indígenas.

1263. Material e métodos

O presente estudo foi realizado na Floresta Nacional do Tapirapé-Aquiri (FLONATA), Unidade de Conservação de Uso Sustentável criada em 1989 e administrada pelo Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade (ICMBio, 2023). A FLONATA está localizada no sudeste do estado do Pará, entre os municípios de Marabá, São Félix do Xingu e Itupiranga, com área aproximada de 196.500 hectares.

A espécie analisada foi *Cenostigma tocantinum* Ducke (Fabaceae), conhecida popularmente como pau-preto. Sua escolha se deve à relevância ecológica e cultural, uma vez que comunidades indígenas da região utilizam sua madeira para a confecção de utensílios e artefatos tradicionais. Amostras de madeira utilizadas na análise serão obtidas de 15 árvores, já abatidas, que se encontram armazenadas no pátio de estocagem das madeiras suprimidas do ‘Projeto SALOBO’, que é uma área de remoção legalizada de vegetação nativa (Instrução Normativa Brasil 2009 número 6 de 7 de abril de 2009), Das toras foram retiradas pranchas

radiais e tangenciais, destinadas à confecção dos corpos de prova para análises anatômicas, físicas e mecânicas.

Corpos de prova foram extraídos nas direções transversal, radial e tangencial e seccionados em micrótomo de deslize. As lâminas histológicas foram coradas com safranina e montadas em resina sintética. A caracterização anatômica foi conduzida segundo os critérios da International Association of Wood Anatomists (Wheeler, Baas, & Gasson, 1989).

Os ensaios foram realizados no Laboratório de Tecnologia da Madeira da Universidade Federal do Oeste do Pará (UFOPA). Foram determinados parâmetros físicos, como a densidade básica da madeira, e propriedades mecânicas, incluindo os ensaios de flexão estática e compressão paralela às fibras, seguindo as normas técnicas da ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas).

Nos ensaios de flexão estática, foram obtidos os valores de módulo de ruptura (MPa) e módulo de elasticidade (MPa). Nos ensaios de compressão paralela, registraram-se resistência máxima (MPa) e módulo de elasticidade (MPa).

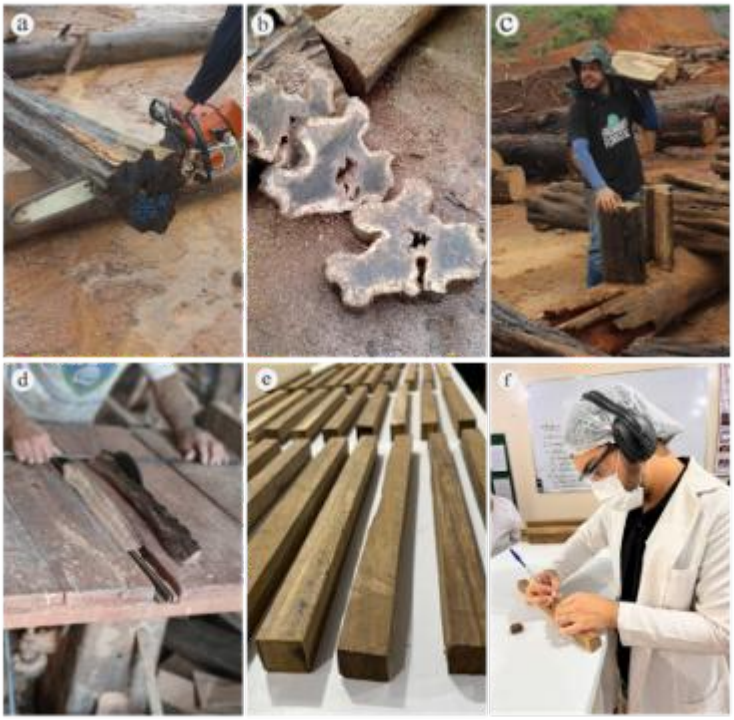


Figura 1. Esquema de coleta, desdobro e processamento da madeira analisada. (Figura 1. a - c) Corte para obtenção de discos e toretes, (Figura 1. d – f) Desdobro e identificação de corpos de prova para as devidas análises.

1264. Resultados e discussão

A análise anatômica da madeira de *C. tocantinum* Ducke (Fabaceae) revelou características diagnósticas relevantes, associadas à elevada resistência e durabilidade da espécie. O cerne apresenta coloração marrom a marrom-escuro, com anéis de crescimento bem delimitados por fibras de paredes espessas e achatadas radialmente, além da presença de parênquima marginal. Os vasos são difusos, predominando solitários (88%), seguidos por múltiplos de dois (8%) e três (3%), frequentemente obstruídos por tilos e depósitos de coloração amarelada a escura. As placas de perfuração são simples, enquanto as pontuações intervasculares são alternadas e poligonais. O parênquima axial ocorre de forma paratraqueal aliforme a losango-aliforme, com ocorrência de cristais prismáticos em células do parênquima axial, distribuídos em câmaras.

Os raios apresentam-se unisseriados e bisseriados, compostos principalmente por células procumbentes, frequentemente estratificados, característica também observada em elementos de vaso e no parênquima axial. As fibras são não septadas, de paredes finas espessas, com pontuações simples a minuciosas, contribuindo para a elevada densidade da madeira. A combinação desses elementos anatômicos reforça a adaptação da espécie a usos que demandam elevada resistência estrutural, confirmando seu valor na confecção tradicional indígena de artefatos.

A Figura 2 apresenta os planos anatômicos macroscópicos e microscópicos da madeira de *C. tocantinum*, evidenciando a disposição dos vasos, raios e parênquima, fundamentais para a caracterização e identificação da espécie.

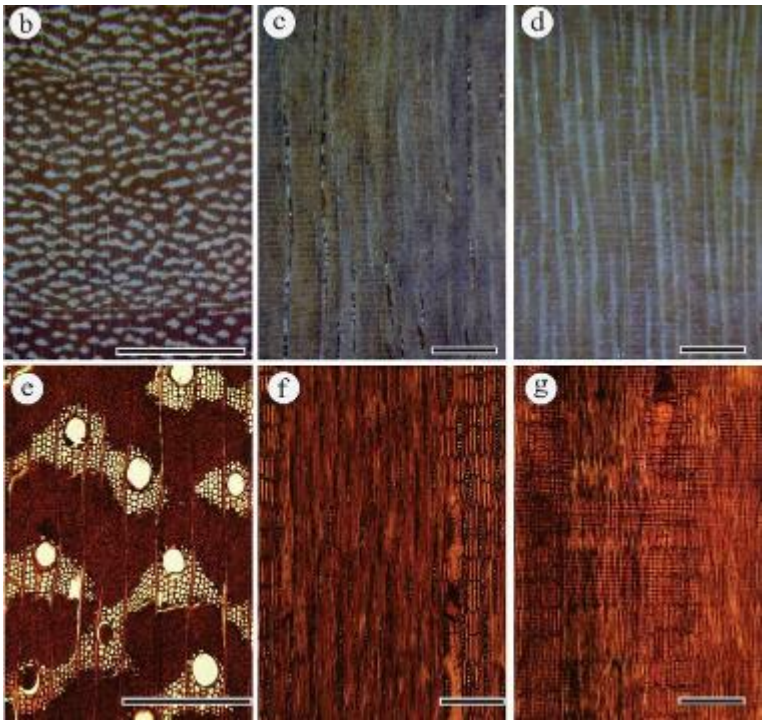


Figura 2. Planos anatômicos da madeira de *Cenostigma tocantinum* Ducke (Fabaceae). Macroscopia: (B) Transversal; (C) Tangencial; (D) Radial. Microscopia: (E) Transversal; (F) Tangencial; (G) Radial.

Densidade básica média de 0,75 g·cm^{-3}, classificada como alta densidade segundo Loureiro et al. (2020), o que corrobora com a classificação de uma espécie do mesmo gênero, *Cenostigma macrophyllum* apresentou densidade básica de 1,200 g.cm^{-3} (Araújo et al, 2018). Esse atributo confere à madeira resistência natural, estabilidade dimensional e durabilidade, características essenciais para usos estruturais e confecção de artefatos que exigem longa vida útil. Os ensaios mecânicos demonstraram desempenho robusto: na flexão estática, o módulo de ruptura 119,0 MPa e o módulo de elasticidade 15.530 MPa; na compressão paralela às fibras, a resistência máxima 62,3 MPa e o módulo de elasticidade 5.945 MPa. Esses valores são comparáveis aos de espécies comerciais reconhecidas por sua qualidade estrutural, como *Hymenolobium petraeum* e *Manilkara huberi* (Carvalho et al., 2018), evidenciando o potencial tecnológico da madeira de *C. tocantinum* para aplicações diversas. A madeira de *Cenostigma tocantinum* Ducke apresentou dados físico-mecanicos que podemos observar na tabela 1:

Tabela 1. Tabela evidenciando os resultados de acordo com as propriedades analisadas e seus respectivos parâmetros

Tipo de propriedade	Ensaio	Parâmetro	Média	Desvio Padrão	Mínimo	Máximo
Física	–	Densidade básica (g·cm^{-3})	0,75	0,015	0,75	0,78
Mecânica	Flexão	Módulo de ruptura (MPa)	119,0	22,15	60,19	169,3
	Flexão	Módulo de elasticidade (MPa)	15.530	2.281	9.599	23.680
	Compressão	Resistência máxima (MPa)	62,30	10,61	1,192	82,34
	Compressão	Módulo de elasticidade (MPa)	5.945	1.278	2.435	8.756

1265. Conclusões

A madeira de *Cenostigma tocantinum* Ducke apresenta propriedades físicas e mecânicas de elevado desempenho e resistência significativa nos ensaios de flexão e compressão. Essas características justificam o uso tradicional da espécie em utensílios por comunidades indígenas, confirmando a relevância cultural, tecnológica de seu manejo, como estratégia de valorização das espécies nativas e de incentivo ao manejo sustentável na Amazônia.

1266. Agradecimentos

Agradeço ao ICMBio, pela parceria e pelo apoio que possibilitaram o acesso à área de estudo e a realização da coleta do material utilizado nesta pesquisa. Ao Laboratório de Tecnologia da Madeira (LTM) da UFOPA e a toda a equipe envolvida, pela colaboração, disponibilidade e contribuição durante o desenvolvimento das análises.

À Universidade do Estado do Pará (UEPA) e, especialmente, ao Laboratório de Ciência e Tecnologia da Madeira (LCTM), minha casa acadêmica, que proporcionou as condições, o espaço e o suporte necessários para que este projeto pudesse ser desenvolvido. Ao meu orientador, Prof. Dr. Luiz Eduardo de Lima Melo, pelo acompanhamento, orientação e ensinamentos ao longo de todas as etapas desta pesquisa. Por fim, a todos que contribuíram direta ou indiretamente para a realização deste trabalho.

No contexto amazônico, somente quem vive diariamente a realidade da pesquisa na região conhece os desafios, as dificuldades e o esforço envolvidos em cada etapa; mas também sabe o quanto é árduo e, ao mesmo tempo, gratificante produzir ciência na Amazônia.

1267. Referências bibliográficas

Andrade, F. W. C., Pinto, T. I., Moreira, L. da S., da Ponte, M. J. M., Lobato, T. da C., de Sousa, J. T. R., & Moutinho, V. H. P. (2022). The legal roundwood market in the Amazon and its impact on deforestation in the region between 2009–2015. *Forests*, 13(4), 558. https://doi.org/10.3390/f13040558.

Carvalho, A. C. de. (2018). *Potencial energético da madeira de espécies florestais em área sob manejo sustentável, após corte raso, no Rio Grande do Norte* (Dissertação de mestrado). Universidade Federal do Rio Grande do Norte.

Araújo, A. C. C. de, Costa, L. J., Braga, P. P. de C., Guimarães Neto, R. M., Rocha, M. F. V., & Trugilho, P. F. (2018). Propriedades energéticas da madeira e do carvão vegetal de *Cenostigma macrophyllum*: subsídios ao uso sustentável. *Pesquisa Florestal Brasileira*, 38, e201701546. https://doi.org/10.4336/2018.pfb.38e201701546.

De Jesus dos Santos, L., Souza, L. V., de Andrade, G. M., Matos, T. S., Braga Júnior, M. M., Manaças, M. E. A., Gontijo, A. B., de Melo Júnior, J. C. F., Motta, J. P., & de Lima Melo, L. E. (2022). Use of wood by indigenous peoples of the Eastern Amazon, Brazil. *IAWA Journal*, 43(4), 448–468. https://doi.org/10.1163/22941932-bja10091.

Ferreira, L. P., Sousa, R. S. L., Sousa, M. B., Manaças, M. E. A., & Melo, L. E. L. (2024). Identificação anatômica da madeira de bordunas fabricadas pelos povos indígenas do Sudeste do Pará, Brasil. In *2º Simpósio Nacional de Madeiras Históricas (SINAMADHI)*. Joinville.

Gaem, P. H. (2020). *Cenostigma tocantinum* Ducke. In *Flora do Brasil 2020*. Jardim Botânico do Rio de Janeiro. http://floradobrasil.jbrj.gov.br/reflora/floradobrasil/FB78636.

Gonçalves, T. A. P., Navarro, A. G., Nisgoski, S., & Sonsin-Oliveira, J. (2021). The trees of the Water People: archeological waterlogged wood identification and near-infrared analysis in Eastern Amazonia. *Wood Science and Technology*, 55, 991–1011. https://doi.org/10.1007/s00226-021-01288-4.

Loureiro, A. A., Silva, M. F., & Alencar, J. C. (2000). *Essências madeireiras da Amazônia* (Vol. 4). MCT/INPA-CPPF.

Moreira, L. S., et al. (2022). Wood from forest residues: Technological properties and potential uses of branches of three species from Brazilian Amazon. *Sustainability*, 14(18), 11176. https://doi.org/10.3390/su141811176.

Oliveira, C. G., Punhagui, K. R. G., Oliveira, L. S., & Silva, F. B. (2024). Pegada de CO_2 da madeira nativa destinada à construção civil proveniente de diferentes tipos de exploração florestal. *Ambiente Construído*, 24, e131844. https://doi.org/10.1590/S1678-86212024000100716.

Souza, L. V., Vieira, A. L. M., & Melo, L. E. L. (2021). *Propriedades tecnológicas da madeira de espécies arbóreas da Floresta Nacional do Tapirapé-Aquiri, Pará, Brasil*. Relatório final do Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica do ICMBio – PIBIC/ICMBio.

Wheeler, E. A., Baas, P., & Gasson, P. E. (Eds.). (1989). IAWA list of microscopic features for hardwood identification. *IAWA Bulletin*, 10(3), 219–332. https://www.iawa-website.org/uploads/soft/Abstracts/IAWA%20list%20of%20microscopic%20features%20for%20hardwood%20identification.pdf.

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Propriedades física e descrição anatômica macroscópica da madeira de *Protium heptaphyllum* (Aubl.) Marchand

Wallace Placido Santos[1]; Murilo Pereira da Silva[1]; Calline Chaves de Jesus[1]; João Vitor Morais da Silva[1]; Mara Lúcia Agostini Valle[1]; Ricardo Gabriel de Almeida Mesquita[1]

[1] Universidade Federal do Sul da Bahia

Resumo: *Protium heptaphyllum* (Aubl.) Marchand é uma espécie nativa do Brasil, com ocorrência na região sul da Bahia, de importância ecológica, medicinal e madeireira. Este trabalho teve como objetivo avaliar as propriedades físicas e realizar descrição anatômica macroscópica da madeira de *P. heptaphyllum* (Aubl.) Marchand. Foram determinados a densidade básica, as contrações lineares e volumétrica, o fator de anisotropia e as características macroanatômicas. Os dados foram submetidos à análise estatística descritiva e à correlação de *Spearman*. A densidade básica média foi de 0,62 g/cm³, sendo classificada como de média densidade. As contrações médias foram de 0,61% (axial), 5,15% (radial), 9,64% (tangencial) e 14,81% (volumétrica), com fator de anisotropia de 1,93, indicando média a boa estabilidade dimensional. A descrição anatômica macroscópica evidenciou madeira de coloração castanho-clara, brilho moderado, textura fina a média, grã predominantemente direita, parênquima axial ausente ou indistinto, porosidade difusa e uniforme, vasos predominantemente solitários, canais radiais e raios não estratificados. Os resultados ampliam o conhecimento sobre as características tecnológicas da madeira da espécie e indicam seu potencial de utilização em produtos madeireiros.

Palavras-chave: Madeira Nativa; Estabilidade Dimensional; Tecnologia da Madeira.

Physical properties and macroscopic anatomical description of *Protium heptaphyllum* (Aubl.) Marchand wood

Abstract: *Protium heptaphyllum* (Aubl.) Marchand is a native Brazilian species occurring in the southern region of Bahia, with ecological, medicinal, and timber importance. This study aimed to evaluate the physical properties and provide a macroscopic anatomical description of *P. heptaphyllum* wood. Basic density, linear and volumetric shrinkage, the anisotropy factor, and macro-anatomical characteristics were determined. The data were subjected to descriptive statistical analysis and Spearman`s correlation analysis. The mean basic density was 0.62 g/cm³, classifying the wood as medium-density wood. Mean shrinkage values ware 0.61% (axial), 5.15% (radial), 9.64% (tangential), and 14.81% (volumetric), with an anisotropy factor of 1.93, indicating medium to good dimensional stability. The macroscopic anatomical description revealed light brown wood, moderate luster, fine to medium texture, predominantly straight grain, absence or indistinct axial parenchyma, diffuse and uniform porosity, predominantly solitary vessels, radial canals, and non-stratified rays. The results expand knowledge of the technological characteristics of this species and indicate its potential for use in wood products.

Keywords: Native Wood; Dimensional Stability; Wood Technology.

1. Introdução

O *Protium heptaphyllum* (Aubl.) Marchand é uma espécie da família Burseraceae conhecida popularmente como amescla, breu ou breu-branco. Nativa do Brasil, ocorre principalmente nos biomas Mata Atlântica e Amazônia, onde apresenta importância ecológica e medicinal, especialmente pela produção de resina (Camargo et al., 2025). Sua madeira também é apreciada pela fácil trabalhabilidade e bom acabamento (IBDF, 1981).

A madeira, enquanto material de origem biológica, apresenta comportamento heterogêneo e higroscópico (Silva & Valle, 2025). Sua natureza higroscópica confere a capacidade de absorver ou perder água em função da umidade do ambiente, exercendo influência direta sobre o comportamento do material e propriedades como trabalhabilidade, estabilidade dimensional, resistência mecânica e durabilidade natural (Silva & Oliveira, 2003).

O uso racional e tecnicamente adequado da madeira depende do conhecimento de suas propriedades tecnológicas, entre as quais se destacam as propriedades físicas, importantes para definir sua melhor utilização industrial (Moreschi, 2012; Araújo et al., 2016). Nesse contexto, a densidade básica é uma das características mais importantes da madeira, por representar a quantidade de material lenhoso por unidade de volume e se relacionar com as características químicas e anatômicas, além de influenciar propriedades como resistência e dureza da madeira (Silva et al., 2025).

A contração da madeira corresponde às variações dimensionais decorrentes da perda de água abaixo do ponto de saturação das fibras, podendo resultar em empenamentos e fissuras quando ocorrem variações de umidade (Gallio et al., 2018). A intensidade dessas variações está relacionada à estrutura anatômica da madeira, sendo geralmente maior no sentido tangencial, intermediária no radial e menor no axial (Silva et al., 2025). Além disso, a descrição anatômica macroscópica constitui uma ferramenta importante para a caracterização e identificação de espécies florestais, por meio da observação de características como cor, porosidade, cheiro, textura, grã, brilho e padrões nas anatômicos (Ferreira et al., 2025).

Apesar da importância da caracterização físico-anatômica da madeira para subsidiar seu uso tecnológico, informações sobre essas propriedades ainda são escassas para diversas espécies nativas (Mangini et al., 2020). Portanto, este trabalho teve como objetivo avaliar as propriedades físicas e realizar a descrição anatômica macroscópica da madeira de *Protium heptaphyllum* (Aubl.) Marchand, espécie nativa da Mata Atlântica utilizada por comunidades rurais do sul da Bahia.

2. Material e métodos

Foram utilizadas madeira de três indivíduos da espécie de *Protium heptaphyllum* (Aubl.) Marchand, coletadas na zona rural do município de Itacaré-BA, nas proximidades da comunidade de João Rodrigues, com idade estimada de 30 anos e altura aproximada de 15 metros.

Foi retirado um disco com 5 cm de espessura na altura do DAP e um torete de 20 cm de comprimento de cada árvore. As amostras foram encaminhadas à serraria da Comissão Executiva do Plano de Lavoura Cacaueira (CEPLAC) para confecção dos corpos de prova e, posteriormente, ao Laboratório Central de Tecnologia de Produtos Florestais (LCTPF), localizado no Centro de Formação em Ciências Agroflorestais (CFCAF) da Universidade Federal do Sul da Bahia (UFSB), onde foram realizados os experimentos.

Para determinação da densidade básica, seguiu-se a norma ABNT NBR 11941 (ABNT, 2003), utilizando-se duas cunhas de lados opostos de cada árvore. As cunhas foram imersas em água até atingirem massa constante, sendo posteriormente determinado o volume saturado pelo método de imersão em água (Vital, 1984). Em seguida, as amostras foram secas em estufa a 103 °C ± 2 °C massa constante, obtendo-se a massa seca. A densidade básica foi calculada pela Equação 1.

$$Db\left(g/cm^3\right)=\frac{Ms}{V} \quad (1)$$

Onde:

Db = Densidade básica (g/cm^3);

Ms = Massa seca (g);

V = Volume verde (cm^3).

Para o ensaio de retratibilidade, foram confeccionados 30 corpos de prova, sendo 10 por árvore, com dimensões de 2,0 cm × 3,0 cm e 5,0 cm, nos sentidos tangencial, radial e axial, respectivamente, conforme a norma NBR 7190 (ABNT, 2022). As amostras foram imersas em água até atingirem a condição de saturação. Em seguida, foram determinadas as dimensões lineares (tangencial, radial e axial) com paquímetro digital. Posteriormente, os corpos de prova foram secos em estufa a 103 °C ± 2 °C até massa constante e novamente mensurados. A partir das dimensões obtidas foram calculadas a contração linear (CL); a contração volumétrica máxima (CV máx.); e o fator de anisotropia (A), conforme as equações de 2 a 4 respectivamente.

$$Cl\left(\%\right)=\left(\frac{l1-l2}{l1}\right)*100 \quad (2)$$

Onde:

Cl = contração linear (%);

L1 = dimensão linear saturada (mm);

L2 = dimensão linear seca (mm)

$$CVmax(\%) = \left(\frac{vu - vs}{vs}\right) * 100 \quad (3)$$

Onde:

CV máx. = contração volumétrica (%);

vu = volume saturado, (cm³);

vs = volume seco (cm³)

$$A = \frac{ct}{cr} \quad (4)$$

Onde:

A = fator de anisotropia;

ct = contração tangencial (%);

cr = Contração radial (%)

A descrição macroscópica foi realizada em amostras de madeira provenientes de cada indivíduo, considerando as principais características anatômicas observáveis macroscopicamente, incluindo cor, brilho, textura, grã, porosidade, vasos, parênquima axial, raios, canais. Os dados das propriedades físicas foram submetidos à análise estatística descritiva e à correlação de Spearman, utilizando o Microsoft Excel.

3. Resultados e discussão

Os dados referentes as avaliações realizadas na madeira de *Protium heptaphyllum* (Aubl.) Marchand estão apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 – Valores médios da Contração axial, radial, tangencial e volumétrica, fator de anisotropia e densidade básica da madeira dos três indivíduos de *P. heptaphyllum*, seguida do desvio padrão e coeficiente de variação.

Parâmetros	Árvore1	Árvore 2	Árvore 3	Média Geral
Contração axial (%)	0,63	0,65	0,54	(±0,06) 0,61 (9,84%)
Contação radial (%)	5,66	5,26	4,52	(±0,57) 5,15 (11,21%)
Contação tangencial (%)	8,94	10,24	9,74	(±0,65) 9,64 (6,80%)

Contração vol. máx. (%)	14,63	15,51	14,28	(±0,63) 14,81 (4,28%)
Fator de anisotropia	1,62	1,94	2,22	(±0,30) 1,93 (15,63%)
Densidade básica (g/cm³)	0,61	0,65	0,62	(±0,02) 0,62 (3,26%)

Desvio padrão (±). Coeficiente de variação (%). Fonte: Elaborado pelos autores.

Os resultados das propriedades físicas da madeira de *P. heptaphyllum* indicam comportamento relativamente homogêneo entre os indivíduos estudados, conforme evidenciado pelos coeficientes de variação, sendo o fator de anisotropia a variável que apresentou maior variação de 15,63% (Tabela 1). A densidade básica foi de 0,62 g/cm³, caracterizando a espécie como madeira de média densidade (Melo *et al.*, 1990).

A contração linear corresponde à variação das dimensões da madeira em uma direção anatômica (Oliveira., Tomazello & Fiedler, 2010). Para a madeira avaliada, foram observados valores médios de 5,15 % no sentido radial, 9,64 % no sentindo tangencial e 0,61% no axial, enquanto a contração volumétrica máxima foi de 14,81 %. Esses resultados evidenciam o comportamento anisotrópico característico da madeira, com maior variação dimensional no sentido tangencial, seguida pelos sentidos radial e axial (Oliveira., Tomazello & Fiedler, 2010).

A maior variação dimensional da madeira ocorre normalmente no sentido tangencial, seguida pelo radial e, por fim, pelo axial. Este último apresenta alterações muito pequenas e, por isso, é geralmente menos considerado nas aplicações práticas (Xavier et al., 2023; Moreschi, 2012).

Os valores de densidade básica observados neste estudo estão próximos aos encontrados na literatura. Carvalho (2006) relatou densidade de 0,65 g/cm³ para madeira de *P. heptaphyllum*. Para as contrações, radial, tangencial e volumétrica foram encontrados na literatura valore em torno de 3,88 %, 7,93 % e 11,95 % respectivamente, (Logsdon, Finger & Estevão, 2005). As diferenças observadas entre os resultados deste estudo e valores relatados na literatura podem estar relacionadas às condições de crescimento, idade das árvores e tratos silviculturais, uma vez que esses fatores podem influenciar as propriedades da madeira (Silva & Valle, 2025).

Para o fator de anisotropia, a madeira de *P. heptaphyllum* apresentou valor de 1,93. Conforme IBAMA/IPT (1997), esse valor indica média a boa estabilidade dimensional. Os valores de retratibilidade, associados ao fator de anisotropia, indicam que a madeira apresenta comportamento dimensional relativamente estável, o que pode favorecer sua utilização em produtos que demandem controle dimensional, como móveis, esquadrias, revestimentos internos e painéis desde que sejam adotadas condições adequadas de secagem (Amorim, Paes & Nicácio, 2021).

As propriedades da madeira estão relacionadas podendo uma variável apresentar associação outra (Almeida et al., 2017). Na Tabela 2 é apresentada a correlação de *Spearman* entre a densidade básica (DB), as contrações axiais (CA), radial (CR), tangencial (CT) e volumétrica máxima (CVM), além do fator de anisotropia (FA). Essa análise permite avaliar a intensidade e a direção das associações entre as variáveis, contribuir para a compreensão do comportamento dimensional da madeira.

Tabela 2 – Correlação de *Spearman* para Contração axial (CA), radial (CR), tangencial (CT) e volumétrica (CVM), fator de anisotropia (FA) e densidade básica (DB) da madeira dos três indivíduos de *P. heptaphyllum*.

	DB	CL	CR	CT	CVM	FA
DB	1,00					
CA	0,14	1,00				
CR	0,15	0,25	1,00			
CT	0,46	0,44	0,40	1,00		
CVM	0,39	0,50	0,77	0,89	1,00	
FA	0,09	-0,01	-0,68	0,35	-0,10	1,00

Fonte: Elaborado pelos autores.

Com base na matriz de correlação de *Spearman*, as associações entre as propriedades físicas da madeira de *P. heptaphyllum* foram, em sua maioria, de baixa a moderada magnitude. A densidade básica (DB) apresentou correlações positivas com a contração axial (CA; r = 0,14), radial (CR; r = 0,15), tangencial (CT; r = 0,46), volumétrica (CVM; r = 0,39) e com o fator de anisotropia (FA; r = 0,09), indicando que madeiras com maior densidade apresentam tendência a uma maior retratibilidade, especialmente nas contrações tangencial e volumétrica.

Entre as variáveis de contração, observou-se forte correlação positiva entre a contração tangencial e a volumétrica (r = 0,89) e entre a contração radial e a volumétrica (r = 0,77), indicando associação entre essas variáveis no comportamento de retratibilidade da madeira. A contração axial apresentou correlação moderada com a contração volumétrica (r = 0,50) e tangencial (r = 0,44), enquanto a correlação com a radial foi baixa (r = 0,25).

O fator de anisotropia apresentou correlação negativa moderada com a contração radial (r = −0,68), enquanto as correlações com a densidade básica, contração axial, tangencial e volumétrica foram de baixa magnitude. Entretanto, essas associações devem ser interpretadas com cautela, considerando o reduzido número de indivíduos avaliados (n = 3).

Vale ressaltar que a matriz foi calculada com apenas três indivíduos (n = 3), portanto, os coeficientes devem ser interpretados como tendências observadas no conjunto avaliado, uma

vez que o tamanho amostral reduzido limita a robustez estatística das correlações e não permite inferências generalizadas.

3.1. Descrição macro anatômica

A madeira de *Protium heptaphyllum* apresenta coloração castanho-clara, brilho moderado, textura fina a média e grã predominantemente direita. O parênquima axial é ausente ou indistinto sob lupa de 10×. A porosidade é difusa e uniforme, com vasos predominantemente solitários, de diâmetro pequeno a médio e formato oval quando observados isoladamente (Figura 1A). Na seção transversal, os vasos apresentam distribuição relativamente uniforme ao longo do lenho.

Os raios são finos, não estratificados e visíveis principalmente na seção tangencial, onde se destacam em conjunto com o padrão longitudinal da madeira. Observa-se também a presença de canais radiais (Figura 1B). Na seção tangencial, os raios e o arranjo longitudinal dos elementos anatômicos são mais evidentes, enquanto, na seção transversal, destaca-se a distribuição uniforme dos vasos.

De modo geral, a madeira de *P. heptaphyllum* apresenta, em escala macroscópica, coloração castanho-clara, brilho moderado, textura fina a média, grã predominantemente direita, porosidade difusa e uniforme, vasos predominantemente solitários, raios finos e não estratificados e presença de canais radiais.

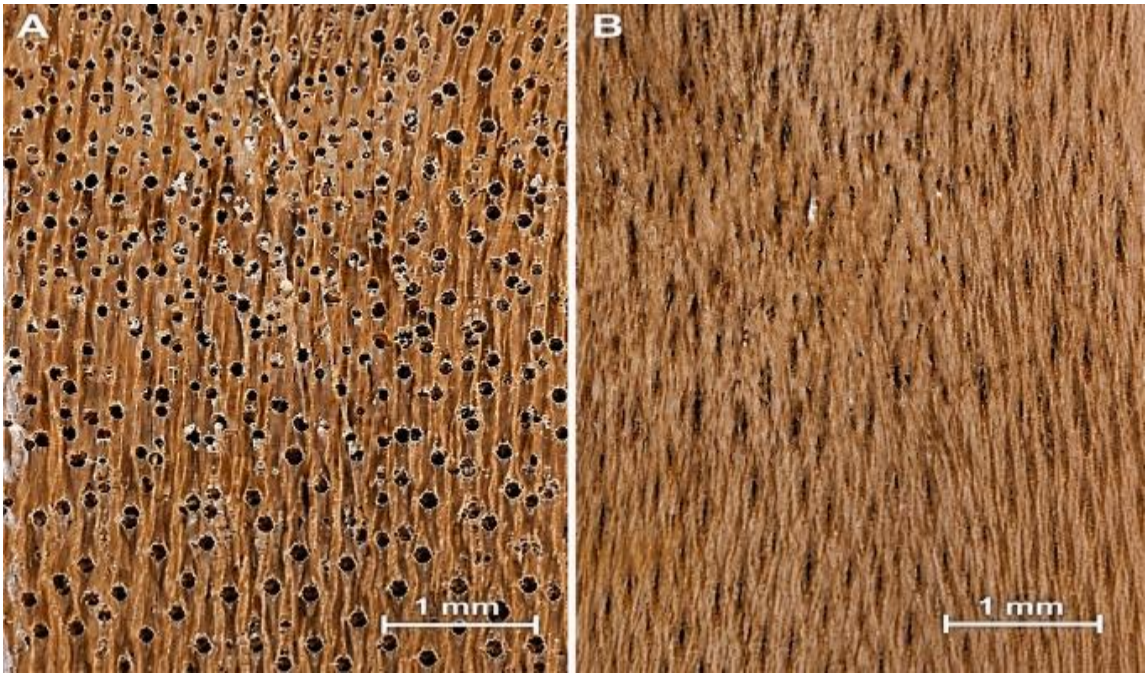


Figura 1 – Macrografia das seções transversal (A) e tangencial (B) da madeira de *P. heptaphyllum*. Elaborado pelos autores.

4. Conclusões

Os resultados obtidos demonstram que a madeira de *P. heptaphyllum* apresenta média densidade, e média a boa estabilidade dimensional, além de características macroanatômicas, como porosidade difusa e uniforme, predominância de vasos solitários, raios finos e não estratificados, presença de canais radiais, textura fina a média, grã predominantemente direita e parênquima axial ausente ou indistinto sob lupa de 10×,

As correlações observadas indicaram forte associação entre a contração volumétrica e as contrações tangencial e radial, enquanto a densidade básica apresentou baixa correlação com as demais propriedades analisadas. Considerando o número de indivíduos avaliados (n = 3), esses resultados devem ser interpretados como indicativos de associações entre as propriedades, não sendo possível estabelecer relações de causa e efeito.

A madeira de *P. heptaphyllum* apresenta potencial para utilização na fabricação de móveis, esquadrias, painéis, revestimentos internos e elementos estruturais de pequeno a médio porte, desde que submetida a processos adequados de secagem.

5. Referências bibliográficas

Almeida, T. H. de., Almeida, D. H. de., De Araujo, V. A., Silva, S. A. M., Christoforo, A. L., & Lahr, F. A. R. (2017). Density as estimator of dimensional stability quantities of Brazilian tropical woods, *BioRes*. 12(3), 6579-6590. https://doi.org/10.15376/biores.12.3.6579-6590

Araújo, B. H. P. de., Sousa, M. A. R de., Nascimento, H. E. M., Zanuncio, A. J. V., Rodrigues, D. M. de S., & Guedes, M. C. (2016). Propriedades físicas da madeira de *Calycophyllum spruceanum* Benth. em função do diâmetro e da posição (base e topo) no fuste. Scientia Forestalis, 44(111). https://dx.doi.org/10.18671/scifor.v44n111.22

Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2003). *NBR 11941: Madeira—Determinação da densidade básica*. ABNT.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2022). *NBR 7190: Projeto de estruturas de madeira*. ABNT.

Amorim, E. P., Paes, J. B., & Nicácio, M. A. (2021). Anisotropia da contração e inchamento da madeira: Uma abordagem tecnológica. Em: *Madeiras nativas e plantadas do Brasil: Qualidade, pesquisas e atualidades* (Vol. 2, pp. 81–100). Editora Científica Digital.

Camargo, I. T. S., Oliveira, G. L. de, Roner, M. N. B., & Muller, T. S. (2025). Uso etnobotânico do óleo essencial e resina de *Protium heptaphyllum* (Aubl.) Marchand: Uma revisão. *Flovet – Boletim do Grupo de Pesquisa da Flora, Vegetação e Etnobotânica*, *3*(14), e2025025. **Erro! A referência de hiperlink não é válida.**

Carvalho, P. E. R. (2006). *Espécies arbóreas brasileiras* (Vol. 2). Embrapa Florestas.

Ferreira, M. de L., Sousa, K. C. de, Marrocos, A. C., Assis, J. A. de, Lima, B. do C. C., Silva, W. D. S. da, Junior, J. B. G., Reis, L. P., & Reis, P. C. M. dos. (2025). Caracterização macroscópica de espécies madeireiras comercializadas nas movelarias do nordeste paraense. *Revista Delos*, *18*(71), e6572. https://doi.org/10.55905/rdelosv18.n71-059

Gallio, E., Zanatta, P., Ribes, D. D., Beltrame, R., & Gatto, D. A. (2018). Higroscopicidade da madeira de três espécies florestais deterioradas por térmitas Nasutitermes. Pesquisa Florestal Brasileira, 38. https://doi.org/10.4336/2018.pfb.38e201701528

Instituto Brasileiro de Desenvolvimento Florestal (IBDF). Madeiras da Amazônia: características e utilização. v. 1. Floresta Nacional do Tapajós 1981.

IBAMA-Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis, & Instituto de Pesquisas Tecnológicas. (1997). *Madeiras da Amazônia: Características e utilização*.

Logsdon, N. B., Finger, Z., & Estevão, J. G. (2005). Descrição dendrológica e caracterização físico-mecânica da madeira de Amescla-aroeira, *Protium heptaphyllum* (Aubl.) March. (Burseraceae). *Revista Madeira: Arquitetura e Engenharia*, *6*(17).

Mangini, T. de S., Candaten, L., Bandera, E., Zanchetta, L. da S., Felippi, V., Trevisan, R., & Trautenmüller, J. W. (2020). Densidade e teor de umidade da madeira de *Ocotea pulchella (NEES) MEZ*. BIOFIX Scientific Journal. 5. 259. https://doi.org/10.5380/biofix.v5i2.73072.

Melo, J. E., Coradin, V. T. R., & Mendes, J. C. (1990). Classes de densidade de madeira para a Amazônia brasileira. In *Anais do 6º Congresso Florestal Brasileiro* (pp. 695–699).

Moreschi, J. C. (2012). *Propriedades da madeira* (4ª ed.). Universidade Federal do Paraná.

Oliveira, J. T. da S., Tomazello Filho, M., & Fiedler, N. C. (2010). Avaliação da retratibilidade da madeira de sete espécies de *Eucalyptus*. *Revista Árvore*, *34*(5), 929–936. https://doi.org/10.1590/S0100-67622010000500018

Silva, J. de C., & Oliveira, J. T. da S. (2003). Avaliação das propriedades higroscópicas da madeira de Eucalyptus saligna Sm., em diferentes condições de umidade relativa do ar. Revista Árvore, 27(2). https://doi.org/10.1590/S0100-67622003000200012

Silva, M. P. da, & Valle, M. L. A. (2025). Caracterização anatômica das madeiras de *Artocarpus heterophyllus* Lam. (Moraceae) e *Erythrina poeppigiana* (Walp.) O.F. Cook (Fabaceae). *Agrotrópica*, *36*(3), 149–156. **Erro! A referência de hiperlink não é válida.**

Silva, V. V., Wolff, I. da S., & Mafra, D. A. (2025). Caracterização das propriedades físicas de quatro espécies arbóreas para aplicações na indústria madeireira. *Biodivers. Bras*, 15(2): 79-92. https://doi.org/10.37002/biodiversidadebrasileira.v15i2.2616

Vital, B. R. (1984). Métodos de determinação da densidade da madeira. Sociedade de Investigações Florestais.

Xavier, C. N., Ferreira, R. de O., Silva, P. H. de P., Santos, W. D. de M., Niza, E. M. S., Moura, A. C. de, Silva, J. R. M. da, Trugilho, P. F., Vanini, A., & Carvalho, A. M. de. (2023). Potencial madeireiro de espécies exóticas invasoras. In R. Moratelli, M. Carvalho Furtado, & A. Vanini (Orgs.), *Biodiversidade e saúde na Estação Biológica Fiocruz Mata Atlântica: Pesquisa, conservação e educação* (pp. 246–264). Atena Editora. https://doi.org/10.22533/at.ed.21623050611

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Propriedades Físicas da Madeira de *Hevea Brasiliensis* de Diferentes Clones em Sistema Consorciado com Cacau

Wattson Quinelato Barreto de Araujo[1]; Bruno Maia Barroso Burns[1]; Jessica Tavares Chaves Faria[1]; Carlos Fernando Ferreira da Silva[1]; Thuane Sofia Gomes dos Santos[1]; Larissa Brandão Pereira[1]; Alexandre Monteiro de Carvalho[1]

1 Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Instituto de Florestas, Seropédica-RJ, Brasil.

Resumo: A seringueira (*Hevea brasiliensis*), nativa da Amazônia, tem seu potencial madeireiro subexplorado no Brasil, especialmente em sistemas consorciados. Este trabalho teve como objetivo avaliar e comparar as propriedades físicas (densidade aparente, densidade básica, variação volumétrica na contração e coeficiente de anisotropia) da madeira de dois clones de Hevea brasiliensis (1 e 2) provenientes de consórcios com cacau no estado da Bahia, visando subsidiar seu aproveitamento comercial e incentivar práticas de manejo integrado que conciliem produção agrícola e uso racional de recursos florestais. Os ensaios seguiram a norma ABNT NBR 7190, determinando-se densidade aparente, densidade básica, variação volumétrica e coeficiente de anisotropia. Os resultados revelaram densidade básica média de 0,529 g/cm³ para o Clone 1 e 0,573 g/cm³ para o Clone 2, classificando a madeira como de densidade média. A variação volumétrica na contração foi baixa (6,55% e 5,83%, respectivamente), indicando boa estabilidade dimensional. Os coeficientes de anisotropia foram 1,62 (Clone 1) e 1,79 (Clone 2), valores considerados bons e inferiores a 2,0, sugerindo baixa propensão a empenamentos e rachaduras durante a secagem. Conclui-se que a madeira de seringueira dos dois clones apresenta propriedades físicas adequadas para aplicações industriais, com destaque para a estabilidade dimensional, sendo o Clone 2 ligeiramente superior em densidade. Os resultados contribuem para a valorização da seringueira como recurso madeireiro sustentável em sistemas agroflorestais.

Palavras-chave: *Hevea brasiliensis*; Densidade Básica; Anisotropia; Estabilidade Dimensional; Clone.

Physical Properties of *Hevea Brasiliensis* Wood from Different Clones in an Agroforestry System with Cocoa

Abstract: Rubber tree (*Hevea brasiliensis*), native to the Amazon, has its timber potential underexplored in Brazil, especially in agroforestry systems. This study evaluated the physical properties of wood from two clones (1 and 2) from cocoa intercropping systems in southern Bahia, over 50 years old. The tests followed the ABNT NBR 7190 standard, determining apparent density, basic density, volumetric shrinkage, and anisotropy coefficient. The results revealed average basic density of 0.529 g/cm³ for Clone 1 and 0.573 g/cm³ for Clone 2, classifying the wood as medium density. Volumetric shrinkage was low (6.55% and 5.83%, respectively), indicating good dimensional stability. The anisotropy coefficients were 1.62 (Clone 1) and 1.79 (Clone 2), values considered good and below 2.0, suggesting low propensity for warping and cracking during drying. It is concluded that rubberwood from both clones presents adequate physical properties for industrial applications, especially dimensional stability, with Clone 2 being slightly superior in density. The results contribute to the valorization of rubberwood as a sustainable timber resource in agroforestry systems.

Keywords: Hevea brasiliensis; Basic Density; Anisotropy; Dimensional Stability; Clone.

1. Introdução

A seringueira (*Hevea brasiliensis*), espécie nativa da bacia amazônica, protagonizou um dos ciclos econômicos mais marcantes da história brasileira. Durante o auge do Ciclo da Borracha (1879-1912), a exploração do látex representou 40% das exportações nacionais (Santos, 2020). No entanto, após o declínio do mercado do látex no Brasil e a ascensão do cultivo do cacau, muitas áreas que antes eram destinadas ao extrativismo da borracha hoje abrigam sistemas de consórcio agroflorestal, onde as seringueiras permanecem como componentes estruturais, oferecendo sombreamento para o cacau (Killmann & Hong, 2000).

Nesse contexto, com o envelhecimento dessas árvores e a redução da produtividade em látex, surge uma oportunidade para o aproveitamento sustentável de sua madeira – prática já consolidada em países asiáticos, onde a rubberwood é amplamente utilizada na fabricação de móveis, pisos e compensados (ITTO, 2023). No Brasil, embora o potencial madeireiro da seringueira seja reconhecido, seu uso ainda é incipiente, especialmente em sistemas consorciados, como os implantados no estado da Bahia (Carvalho, 2021).

A avaliação das propriedades físicas da madeira é fundamental para determinar sua qualidade tecnológica e aptidão para diferentes aplicações. Entre os parâmetros mais relevantes destacam-se a densidade, que reflete diretamente a resistência mecânica e a trabalhabilidade do material, e o coeficiente de anisotropia, que revela a estabilidade dimensional da madeira (Moreschi, 2012). Madeiras com coeficiente de anisotropia próximo a 1,5 são consideradas estáveis, enquanto valores acima de 2,0 demandam processos avançados de secagem para evitar defeitos (Cruz & Nunes, 2005).

Estudos anteriores em monocultivos de seringueira já demonstraram que sua madeira possui características adequadas para uso industrial, mas ainda há lacunas sobre como o consórcio com cacau – e as condições edafoclimáticas específicas da Bahia – influenciam suas propriedades tecnológicas. Além disso, a variação entre diferentes clones da espécie merece investigação, uma vez que a seleção de materiais genéticos pode favorecer potenciais de melhoria na qualidade da madeira.

Diante desse contexto, este trabalho teve como objetivo avaliar e comparar as propriedades físicas (densidade aparente, densidade básica, variação volumétrica na contração e coeficiente de anisotropia) da madeira de dois clones de Hevea brasiliensis (1 e 2) provenientes

de consórcios com cacau no estado da Bahia, visando subsidiar seu aproveitamento comercial e incentivar práticas de manejo integrado que conciliem produção agrícola e uso racional de recursos florestais.

2. Material e métodos

Material

A pesquisa foi conduzida com madeira de Hevea brasiliensis proveniente da Fazenda Ondulada, pertencente à Agrícola Cantagalo, localizada em Ituberá, sul da Bahia. Foram avaliados dois clones: Clone 1 e Clone 2. As árvores, com mais de 50 anos de idade, estavam implantadas em sistema de "cabruca" (consórcio com cacau), em áreas próximas ao período de reforma dos plantios.

Foram selecionadas 24 árvores (12 de cada clone), classificadas em três classes diamétricas (superior, média e inferior) com base em medições prévias. De cada árvore, foram extraídas duas toras da base (descartando-se a porção de 20cm a partir do solo), igualmente para todos os individuos, com de 2,5 metros de comprimento cada, que receberam tratamento fungicida (Osmotox) e selante nos topos (Humacer) para prevenção de ataques de fungos manchadores.

Preparação das Amostras

Após o transporte das toras para a serraria do Departamento de Produtos Florestais da UFRRJ, realizou-se o desdobro primário em serra de fita vertical. Para os ensaios de propriedades físicas, foram confeccionados 10 corpos de prova por clone, com dimensões de 5 x 3 x 2 cm (largura x espessura x comprimento), seguindo as orientações da norma ABNT NBR 7190 (ABNT, 2022), orientando os corpos de prova conforme os planos de corte radial e tangencial descritos no protocolo do documento normativo.

Determinação das Propriedades Físicas

As propriedades físicas foram determinadas conforme o Anexo B da norma NBR ABNT 7190:1997 - Projetos de Estruturas de Madeira. Os corpos de prova foram avaliados em três condições: verde (logo após o desdobro), saturada em água (após imersão até massa constante) e seca em estufa (103 ± 2°C até massa constante).

Foram determinados os seguintes parâmetros:

- **Densidade aparente a 12% de umidade (g/cm³):** calculada pela razão entre a massa da madeira a 12% de umidade e seu volume na mesma condição, após climatização em ambiente controlado a 20°C e 65% de umidade relativa do ar.

- **Densidade básica (g/cm³):** calculada pela razão entre a massa seca em estufa (103 ± 2°C) e o volume saturado da amostra, após imersão em agua e deslocamento do CPs para o fundo do recipiente e verificação de peso constante.
- **Variação volumétrica na contração (%):** calculada pela diferença entre o volume saturado e o volume seco, expressa em porcentagem em relação ao volume saturado.

Coeficiente de anisotropia em contração: calculado pela razão entre a contração tangencial e a contração radial da madeira, indicando a estabilidade dimensional.

3. Resultados e discussão

Propriedades Físicas

Os resultados das propriedades físicas para os dois clones estão apresentados na tabela a seguir.

Tabela 1 – Propriedades físicas médias da madeira de Hevea brasiliensis para os dois clones

Propriedade	Clone 1	Clone 2
Densidade aparente a 12% U (g/cm³)	0,625	0,634
Densidade básica (g/cm³)	0,529	0,573
Variação volumétrica - contração (%)	6,55	5,83
Coeficiente de anisotropia	1,62	1,79

Fonte: Dados deste trabalho de pesquisa (2025).

Densidade Básica e Aparente

Os valores de densidade básica encontrados foram 0,529 g/cm³ para o Clone 1 e 0,573 g/cm³ para o Clone 2. Ambos os valores se enquadram na categoria de madeiras de densidade média, conforme classificação proposta por Lima et al. (2022), que estabelece que espécies com densidade básica entre 0,40 e 0,75 g/cm³ são consideradas de média densidade.

A densidade aparente a 12% de umidade, por sua vez, apresentou valores de 0,625 g/cm³ (Clone 1) e 0,634 g/cm³ (Clone 2), reforçando a classificação da madeira como de densidade média. Estes valores são superiores aos encontrados por Silva e Valle (2024), que obtiveram média de 0,491 g/cm³ para amostras de árvores com 10 a 12 anos de idade da mesma espécie,

evidenciando que a idade avançada das árvores estudadas (acima de 50 anos) contribuiu para o incremento da densidade da madeira.

A densidade é uma das propriedades mais importantes da madeira, pois está diretamente correlacionada com suas características de resistência mecânica, trabalhabilidade e durabilidade natural (Gonçalves & Piotto, 2018). Os valores encontrados posicionam a madeira de seringueira em um patamar intermediário, inferior a espécies pesadas como o ipê (densidade básica > 0,90 g/cm³), mas superior a madeiras leves como o pinus (densidade básica ~ 0,40 g/cm³).

A diferença de densidade entre os clones, embora modesta, sugere que o Clone 2 apresenta maior potencial para aplicações que demandam maior resistência mecânica, uma vez que a densidade é um bom preditor do desempenho estrutural da madeira (Pereira, 2021).

Variação Volumétrica na Contração

A variação volumétrica na contração, que mede a alteração dimensional total da madeira da condição saturada até a condição seca, foi de 6,55% para o Clone 1 e 5,83% para o Clone 2. Estes valores são considerados baixos pela literatura e indicativos de madeira com boa estabilidade dimensional durante a secagem.

A baixa contração volumétrica observada é uma característica vantajosa para aplicações industriais, pois reduz a ocorrência de defeitos como rachaduras, empenamentos e fendas durante o processo de secagem e uso final do produto (Oliveira, 1988). Madeiras com contração inferior a 10% são preferidas para pisos e móveis, enquanto valores acima de 15% exigem tratamentos específicos e cuidados redobrados (Cruz & Nunes, 2005).

Os resultados obtidos são consistentes com os valores de contração na secagem convencional, que variaram de 5 a 6%, conforme verificado durante o programa de secagem aplicado às tábuas no âmbito do projeto mais amplo (NPQM, 2025). Esta concordância entre as metodologias laboratorial e prática confirma a boa estabilidade dimensional da madeira de seringueira.

Coeficiente de Anisotropia

O coeficiente de anisotropia, calculado pela razão entre a contração tangencial e a contração radial, foi de 1,62 para o Clone 1 e 1,79 para o Clone 2. Estes valores indicam um comportamento relativamente homogêneo nas diferentes direções anatômicas da madeira.

A interpretação dos valores de anisotropia segue uma relação direta: coeficientes próximos a 1,0 indicam comportamento uniforme e estável nas diferentes direções de contração, enquanto valores superiores a 2,0 revelam maior instabilidade dimensional e variabilidade nas

propriedades (Moreschi, 2012). Segundo este autor, valores próximos a 1,5 indicam madeiras estáveis (ex.: teca), enquanto coeficientes acima de 2,0, comuns em eucaliptos, demandam processos avançados de secagem para evitar defeitos.

Os valores obtidos neste estudo (1,62 e 1,79) enquadram a madeira de seringueira na categoria de "boa" estabilidade dimensional, com baixa propensão a empenamentos e rachaduras durante a secagem. Este comportamento pode ser explicado pela microestrutura particular da espécie, que apresenta menor diferenciação entre as contrações nas direções radial e tangencial do que a maioria das madeiras tropicais (Rao et al., 1990; Gibson, 2012).

A característica de baixa anisotropia confere vantagens significativas para o processamento industrial, pois facilita a secagem, reduz a geração de defeitos e aumenta o rendimento em produtos finais de qualidade. Esta propriedade é particularmente relevante para aplicações em móveis, painéis e esquadrias, onde a estabilidade dimensional é fundamental para o desempenho do produto acabado.

Comparação entre Clones

Embora ambos os clones apresentem propriedades físicas adequadas para uso industrial, observam-se algumas diferenças que merecem destaque. O Clone 2 demonstrou maior densidade (básica e aparente) e menor variação volumétrica, indicando madeira ligeiramente mais densa e estável. Por outro lado, o Clone 1 apresentou menor coeficiente de anisotropia (1,62 contra 1,79), sugerindo um comportamento dimensional mais uniforme.

Estas diferenças no presente trabalho, são condizentes com a variabilidade esperada entre clones de uma mesma espécie, especialmente considerando as condições específicas de cultivo em sistemas consorciados. A seleção do clone mais adequado deve levar em consideração a aplicação final desejada: para aplicações que exigem maior resistência e estabilidade, o Clone 2 pode ser mais indicado; para aplicações onde a uniformidade dimensional é prioritária, o Clone 1 pode apresentar vantagens.

Implicações para o Aproveitamento Industrial

Os resultados obtidos neste estudo têm implicações importantes para o aproveitamento industrial da madeira de seringueira de sistemas consorciados. A densidade média e a boa estabilidade dimensional da madeira dos dois clones a qualificam para diversas aplicações, incluindo:

- **Indústria moveleira:** a madeira de seringueira é amplamente utilizada na Ásia para fabricação de móveis, devido à sua textura fina, estabilidade e facilidade de usinagem

(Killmann & Hong, 2000). Os resultados deste estudo confirmam que a madeira brasileira apresenta características equivalentes.

- **Painéis de madeira:** a estabilidade dimensional e a baixa anisotropia tornam a seringueira adequada para a produção de painéis colados lateralmente (EGP - Edge Glued Panels), compensados e outros produtos derivados (NPQM, 2025).
- **Estruturas leves:** embora não atinja os valores de resistência de madeiras pesadas como o ipê, a densidade média da seringueira permite seu uso em estruturas leves, como forros, lambris e divisórias.

Além disso, o aproveitamento da madeira de seringueira proveniente de sistemas agroflorestais contribui para a sustentabilidade ambiental, ao otimizar o uso da terra e gerar renda adicional para os produtores, sem a necessidade de novos desmatamentos (Carvalho, 2021).

Considerações sobre o Sistema de Cultivo

As árvores estudadas foram plantadas há mais de 50 anos em sistema de "cabruca", caracterizado pelo consórcio com cacau em áreas de relevo acidentado. Este sistema de cultivo difere significativamente dos monocultivos tradicionais, nos quais a madeira de seringueira tem sido mais estudada.

As condições de cultivo em consórcio podem influenciar as propriedades da madeira de diversas formas. O sombreamento proporcionado pelo dossel do cacau pode afetar o crescimento e a densidade da madeira, enquanto a competição por nutrientes e água pode modificar a estrutura anatômica e as propriedades tecnológicas (Gonçalves et al., 2006). No entanto, os resultados obtidos neste estudo demonstram que, mesmo em condições de consórcio, a madeira de seringueira atinge propriedades físicas adequadas para uso industrial, comparáveis ou superiores àquelas relatadas na literatura para monocultivos.

4. Conclusões

A madeira de Hevea brasiliensis proveniente de sistemas consorciados com cacau no sul da Bahia apresenta densidade média e boa estabilidade dimensional, com coeficientes de anisotropia inferiores a 2,0 e baixa variação volumétrica, características que a qualificam para aplicações na indústria moveleira e de painéis. O Clone 2 destacou-se pela maior densidade básica (0,573 g/cm³) e menor contração volumétrica (5,83%), sendo mais indicado para aplicações que exigem maior resistência mecânica. O Clone 1, por sua vez, apresentou coeficiente de anisotropia mais próximo de 1 (1,62), sugerindo comportamento dimensional

mais uniforme, sendo preferível para usos que demandam maior estabilidade. Ambos os clones atendem aos requisitos para aproveitamento industrial, e a escolha entre eles deve considerar a aplicação final pretendida. O aproveitamento da madeira de seringueira de sistemas consorciados com cacau representa uma oportunidade para a diversificação do setor florestal e para a valorização de subprodutos da cacauicultura.

5. Agradecimentos

Os autores agradecem à Agrícola Cantagalo Ltda. e à Symbiosis Investimentos e Participações S.A. pelo fornecimento do material, financiamento e apoio logístico. Ao Núcleo de Pesquisa em Qualidade da Madeira (NPQM) do Departamento de Produtos Florestais da UFRRJ pelo suporte técnico e infraestrutura. A todos os membros da equipe de pesquisa que contribuíram com as atividades de campo e laboratoriais. Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro (FAPERJ) pelo apoio institucional.

6. Referências bibliográficas

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7190: Projetode estruturas de madeira. Rio de Janeiro, 1997.

ARAUJO, Wattson Quinelato Barreto de. Propriedades físicas e mecânicas de Hevea brasiliensis (Willd. ex A. Juss.) Müll. Arg implantadas em consórcios com cacau no estado da Bahia. 2025. 29 f. Monografia (Bacharelado em Engenharia Florestal) - Instituto de Florestas, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, 2025. http://rima.ufrrj.br/jspui/handle/20.500.14407/23021.

CARVALHO, J. E. Políticas públicas para a seringueira no Brasil. São Paulo: EdUFSCar, 2021.

CRUZ, C.; NUNES, J. Anisotropia em madeiras tropicais. Revista Árvore, v. 29, n. 4, p. 589-598, 2005.

GIBSON, L. J. The hierarchical structure and mechanics of plant materials. Journal of the Royal Society Interface, v. 9, n. 76, p. 2749-2766, 2012. https://doi.org/10.1098/rsif.2012.0341.

GONÇALVES, D.; PIOTTO, F. Variação dimensional em madeiras tropicais. Ciência Florestal, v. 28, n. 2, p. 845-856, 2018.

GONÇALVES, P. de S. et al. Anatomical characteristics of rubber tree clones. Scientia Agricola, v. 63, n. 1, p. 52-58, 2006.

INTERNATIONAL TROPICAL TIMBER ORGANIZATION (ITTO). Annual Review of Rubberwood Markets. Yokohama, 2023.

KILLMANN, W.; HONG, L. T. Rubberwood – The success of an agricultural by-product. Unasylva, v. 51, n. 200, p. 66-72, 2000.

LIMA, J. T. et al. Propriedades mecânicas da madeira de seringueira em monocultivos. Floresta, v. 52, n. 2, p. 345-356, 2022.

MORESCHI, J. C. Tecnologia da madeira. Curitiba: UFPR, 2012.

OLIVEIRA, J. T. Secagem e preservação de madeiras. São Paulo: Nobel, 1988.

PEREIRA, B. L. C. Resistência à flexão em madeiras tropicais. Cerne, v. 27, n. 3, p. 412-420, 2021.

SANTOS, M. A. Ciclo da borracha na Amazônia: história e impactos. Manaus: EDUA, 2020.

SILVA, M. P.; VALLE, M. L. A. Sustentabilidade agroflorestal: Avaliação das propriedades físicas da madeira de Hevea brasiliensis clone SIAL 1005. In: VI CBCTEM – Congresso Brasileiro de Ciência e Tecnologia da Madeira. Anais. Pelotas, 2024.

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Propriedades físicas e mecânicas da madeira de *Liquidambar styraciflua* L. aos 24 anos

Camila Alves Corrêa[1]; Karina Soares Modes[2]; Magnos Alan Vivian[2]; Tarcisio Francisco de Camargo[1]; Nicolas Costa Pucci[1]; Marine Alves Antonello[1]; Alexsandro Bayestorff da Cunha[1]; Maickele Aparecida Muniz[1].

[1] Universidade do Estado de Santa Catarina
[2] Universidade Federal de Santa Catarina

Resumo: A diversificação dos plantios florestais é uma estratégia para ampliar a oferta de madeira de qualidade, atender às diferentes demandas industriais e reduzir a dependência de um número limitado de espécies. O *Liquidambar styraciflua* L. se destaca como potencial para o reflorestamento no Sul do Brasil, sendo uma espécie reconhecida por sua ampla tolerância às geadas. O objetivo deste estudo foi caracterizar as propriedades físicas e mecânicas da madeira de *Liquidambar styraciflua* aos 24 anos de idade. A densidade básica, a densidade aparente, a retratibilidade, a rigidez e a resistência à flexão estática e a resistência ao cisalhamento paralelo às fibras foram determinadas. A madeira apresentou densidade básica média de 0,52 g/cm³, sem variação longitudinal significativa. As contrações indicaram boa estabilidade dimensional, embora o coeficiente de anisotropia aponte a necessidade de cuidados durante a secagem. Os resultados das propriedades mecânicas da madeira indicaram desempenho satisfatório, destacando-se a resistência ao cisalhamento, semelhante ou superior à observada em algumas espécies de *Eucalyptus*.

Palavras-chave: Qualidade tecnológica; Estabilidade dimensional; Produtos sólidos.

Physical and mechanical properties of *Liquidambar styraciflua* L. wood at 24 years old

Abstract: The diversification of forest plantations is a strategy to expand the supply of quality wood, meet different industrial demands, and reduce dependence on a limited number of species. *Liquidambar styraciflua* L. stands out as a potential for reforestation in southern Brazil, being a species recognized for its wide tolerance to frost. The objective of this study was to characterize the physical and mechanical properties of *Liquidambar styraciflua* wood at 24 years of age. The basic density, bulk density, shrinkability, stiffness, and static flexural strength and shear strength parallel to the fibers were determined. The wood had an average basic density of 0.52 g/cm³, with no significant longitudinal variation. The contractions indicated good dimensional stability, although the anisotropy coefficient indicates the need for care during drying. The results of the mechanical properties of the wood indicated satisfactory performance, highlighting the shear strength, similar to or higher than that observed in some species of *Eucalyptus*.

Keywords: Technological quality; Dimensional stability; Solid products.

1. Introdução

As áreas de florestas plantadas no Brasil são predominantemente baseadas nos gêneros *Eucalyptus* e *Pinus* (IBÁ, 2025), o que restringe a diversidade de espécies utilizadas

comercialmente. Entretanto, as condições edafoclimáticas do país favorecem o cultivo de diversas espécies florestais com elevado potencial produtivo, tornando a diversificação dos plantios uma estratégia para ampliar a oferta de madeira de qualidade, atender às diferentes demandas industriais e reduzir a dependência de um número limitado de espécies.

Dentre as espécies com potencial para o reflorestamento no Brasil, destaca-se *Liquidambar styraciflua* L., espécie nativa das Américas do Norte e Central, reconhecida por sua capacidade de adaptação a diferentes condições edafoclimáticas, incluindo ampla tolerância a geadas (Shimizu & Spir, 2004; Shimizu, 2005).

Em condições edafoclimáticas brasileiras, foi observada produtividade aproximada de 40 m^3 ha^{-1} ano^{-1} aos 11 anos de idade, em plantio experimental conduzido no sudoeste do Paraná. Nesse estudo, a espécie foi considerada uma alternativa promissora para reflorestamentos comerciais, apresentando desempenho comparável ao de espécies de rápido crescimento do gênero *Eucalyptus* (Shimizu & Spir, 2004). Além disso, pesquisas conduzidas no Brasil indicam que a madeira de *L. styraciflua* apresenta reduzida variação da densidade ao longo do fuste, característica desejável para o processamento industrial (Mattos *et al*., 2001; Freitas *et al*., 2015).

A caracterização das propriedades físicas e mecânicas da madeira de *L. styraciflua* é essencial para avaliar seu potencial de utilização na produção de produtos sólidos. Dentre as propriedades físicas, destacam-se a densidade básica, amplamente utilizada como indicadora da qualidade tecnológica da madeira (Oliveira *et al*., 2005; Batista *et al*., 2010), e a retratibilidade, relacionada à estabilidade dimensional da madeira (Sargent, 2019). As propriedades mecânicas, por sua vez, determinam a resistência da madeira aos esforços aplicados e subsidiam sua adequada utilização em diferentes aplicações estruturais.

Embora *L. styraciflua* apresente elevado potencial produtivo e madeira de reconhecida qualidade, ainda são escassas as informações sobre suas propriedades físicas e mecânicas em plantios comerciais brasileiros, especialmente em povoamentos adultos. Dessa forma, o presente estudo teve como objetivo caracterizar as propriedades físicas e mecânicas da madeira de *L. styraciflua* aos 24 anos de idade, visando ampliar o conhecimento sobre a qualidade tecnológica da espécie e subsidiar sua utilização como matéria-prima para a produção de produtos sólidos de madeira.

2. Material e métodos

O estudo foi conduzido com madeira de *L. styraciflua* aos 24 anos de idade, proveniente de um plantio experimental pertencente à empresa Florestal Gateados Ltda., localizado no município de Campo Belo do Sul, Santa Catarina (27º57'06" S, 50º49'08" O; 920 m de altitude). Segundo a classificação climática de Köppen, a região apresenta clima Cfb, caracterizado como subtropical úmido mesotérmico, sem estação seca definida e com ocorrência de geadas severas (Dobner Jr. *et al*., 2017).

Três árvores representativas do povoamento foram selecionadas aleatoriamente. De cada árvore, discos com 7 cm de espessura nas posições correspondentes a 0% (base), 25%, 50%, 75% e 100% da altura comercial foram retirados, conforme a metodologia proposta por Vital (1984), para determinação da variação longitudinal da densidade básica. Adicionalmente, um disco na altura do DAP (1,30 m do solo) foi retirado, destinado à determinação da densidade aparente e da retratibilidade. A primeira tora de cada árvore, compreendida entre a base e a posição do DAP, foi utilizada na determinação das propriedades mecânicas de resistência e módulo de elasticidade à flexão estática, bem como da resistência ao cisalhamento paralelo às fibras. Todo o material coletado foi devidamente identificado e encaminhado ao Laboratório de Recursos Florestais da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Campus Curitibanos.

Dos discos retirados ao longo do tronco, duas cunhas diametralmente opostas foram seccionadas para determinação da densidade básica. As amostras foram saturadas em água para obtenção do volume saturado e, posteriormente, secas em estufa a 103 ± 2 °C até massa constante para determinação da massa anidra, de acordo com a NBR 11941 (ABNT, 2003). A densidade básica dos discos foi obtida pela média das cunhas e a dos toretes pela média dos discos localizados em suas extremidades. A densidade básica ponderada de cada árvore foi calculada com base na densidade dos toretes e em seus respectivos volumes, determinados pelo método de Smalian.

Para determinação da densidade aparente, bem como da retratibilidade da madeira, corpos de prova (3,0 × 2,0 × 5,0 cm; tangencial × radial × longitudinal), confeccionados a partir de baguetas radiais obtidas dos discos retirados na região do DAP (7 cm de espessura), foram utilizados, conforme a NBR 7190 (ABNT, 1997). Os corpos de prova foram avaliados em três condições: saturada, climatizada (20 °C e 65% de umidade relativa) e anidra (103 ± 2 °C), por meio da determinação da massa e das dimensões anatômicas. Com base nessas medições, a densidade aparente (verde, a 12% de umidade e anidra), as contrações lineares e a contração volumétrica total e o coeficiente de anisotropia foram determinados.

Para a determinação das propriedades mecânicas, a primeira tora de cada árvore (1,30 m de comprimento) foi utilizada, da qual foi obtida uma prancha diametral para confecção dos corpos de prova. Os ensaios foram realizados em máquina universal de ensaios mecânicos. Previamente aos ensaios, os corpos de prova foram acondicionados em câmara climática (20 °C e 65% UR) até massa constante e, em seguida, tiveram a massa e o volume determinados para o cálculo da densidade aparente na umidade de equilíbrio.

Os ensaios de flexão estática foram realizados em corpos de prova com dimensões de 2,0 × 2,0 × 30,0 cm, conforme a norma COPANT 30:1-006 (1972), utilizando vão de 280 mm, obtendo-se o módulo de elasticidade (MOE) e o módulo de ruptura (MOR). Para o ensaio de cisalhamento paralelo à grã, em que se obteve a resistência máxima, corpos de prova com dimensões de 5,0 × 5,0 × 6,3 cm foram utilizados, conforme a norma COPANT 30:1-007 (1971).

A variação longitudinal da densidade básica foi analisada em delineamento inteiramente casualizado, considerando seis posições longitudinais ao longo da altura comercial das árvores (0%, DAP, 25%, 50%, 75% e 100%) e três repetições. Os dados foram submetidos à análise de variância (ANOVA) e, quando verificado efeito significativo, as médias foram comparadas pelo teste de Tukey a 5% de significância . As propriedades físicas e mecânicas foram avaliadas por meio de estatística descritiva. Todas as análises e figuras foram realizadas no software R, por meio da interface RStudio.

3. Resultados e discussão

Os valores de densidade básica da madeira de *L. styraciflua* analisados ao longo do comprimento comercial do fuste ($p = 0,625$) não tiveram diferença significativa. A variação longitudinal (base-topo) da densidade básica em cada posição de amostragem pode ser observada na Figura 1.

A uniformidade da densidade básica ao longo do fuste (Figura 1) também foi observada por Mattos *et al*. (2001), Freitas *et al*. (2015) e Freitas *et al*. (2017) para a mesma espécie. Esse comportamento indica que diferentes porções do tronco apresentam madeira com características semelhantes, possibilitando sua utilização para uma mesma finalidade. Além disso, a elevada homogeneidade da densidade básica está associada a um

desempenho mais estável durante o processamento industrial (Oliveira *et al*., 2005), à maior uniformidade das propriedades mecânicas da madeira (Lima *et al*., 2015) e à perda uniforme de umidade durante a secagem, reduzindo a ocorrência de deformações nas peças (Valério *et al*., 2008). Dessa forma, madeiras com menor variação de densidade são mais indicadas para aplicações que exigem elevada uniformidade físico-mecânica, como a fabricação de móveis e o uso na construção civil (Oliveira *et al*., 2005; Rezende *et al*., 2007).

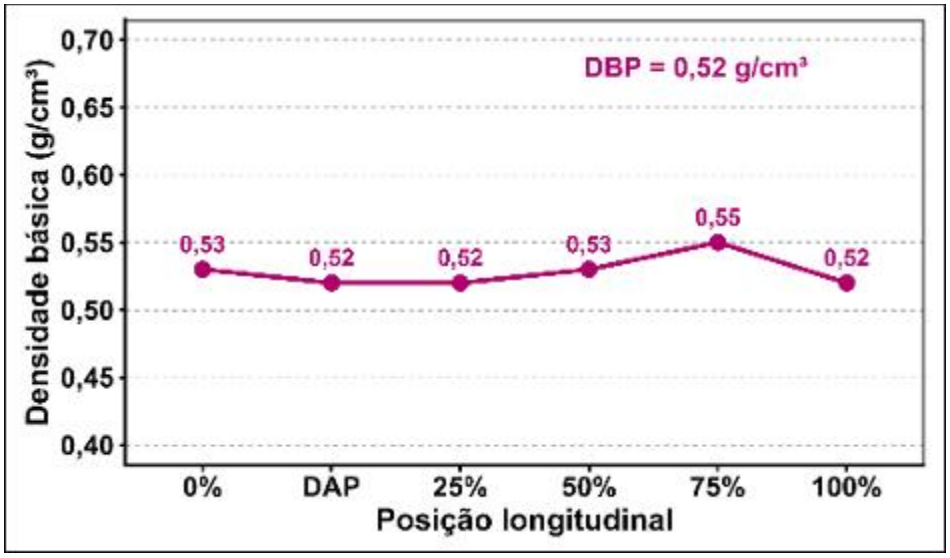


Figura 1 – Variação longitudinal da densidade básica da madeira de *Liquidambar styraciflua* L. aos 24 anos de idade.

A densidade básica ponderada obtida para a madeira da espécie *L. styraciflua* L. aos 24 anos de idade foi de 0,52 g/cm³ (Figura 1), valor equivalente ao registrado por Mattos *et al*. (2001) para esta mesma espécie aos 16 anos e pouco superior aos 0,49 g/cm³ encontrado por Freitas *et al*. (2015) em madeira com idade de 8 anos. De acordo com a classificação proposta por Durlo (1991), essa madeira enquadra-se na classe de densidade média (0,51–0,70 g/cm³). Em geral, madeiras de menor densidade apresentam secagem mais rápida, enquanto madeiras mais densas tendem a apresentar maior instabilidade dimensional e menor facilidade de penetração dos adesivos (Silveira, 2013; Forest Products Laboratory, 1999). Dessa forma, a classificação da madeira de *L. styraciflua* como de densidade média indica um comportamento tecnológico favorável em processos de industrialização.

Os valores de densidade aparente observados para a madeira de *L. styraciflua* (Figura 2A) foram inferiores aos relatados por Freitas *et al*. (2015), que registraram densidades

aparentes a 12% de umidade e anidra de 0,55 e 0,59 g/cm³, respectivamente. Por outro lado, a densidade aparente a 12% de umidade foi semelhante ao valor de referência apresentado pelo Forest Products Laboratory (2010) para a espécie. O boxplot evidencia reduzida variabilidade entre as amostras, corroborando a homogeneidade da densidade da madeira observada ao longo do fuste.

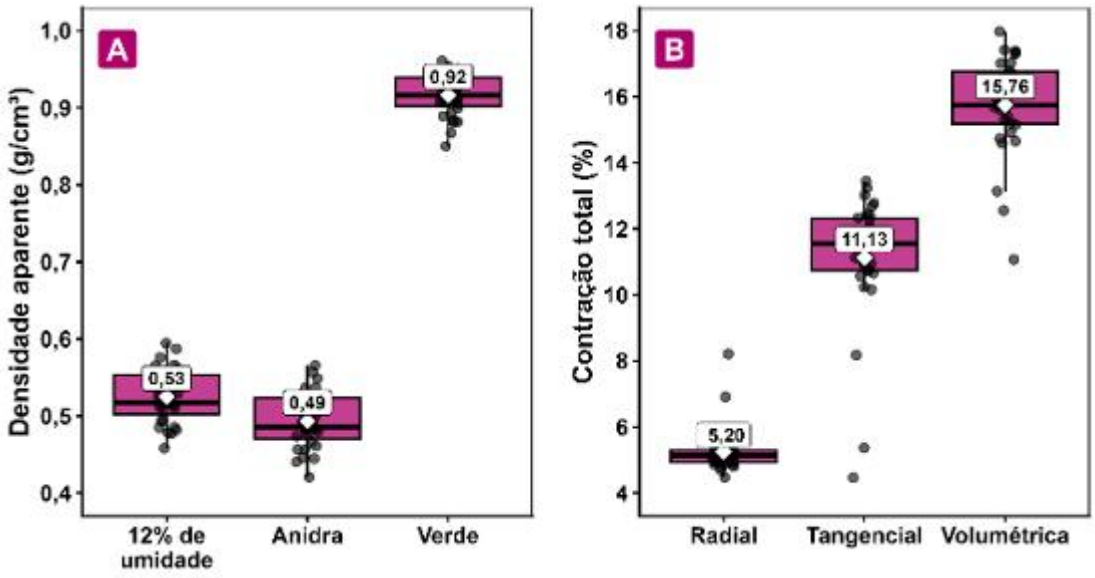


Figura 2 – Boxplots da densidade aparente e contração total da madeira de *Liquidambar styraciflua* L. aos 24 anos de idade.

As contrações lineares radial, tangencial e volumétrica observadas (Figura 2B) foram inferiores às registradas por Mattos *et al*. (2001) para *L. styraciflua* aos 16 anos (5,4%, 12,7% e 18,5%, respectivamente), embora ambos os estudos tenham apresentado densidade básica semelhante (0,52 g/cm³). A contração volumétrica foi semelhante à relatada por Lima *et al*. (2015) para árvores da mesma idade, porém com densidade básica ligeiramente inferior (0,48 g/cm³). Em comparação aos resultados de Freitas *et al*. (2015), para árvores de 8 anos, que apresentaram contrações radial, tangencial e volumétrica de 5,53%, 15,24% e 21,79%, respectivamente, a madeira avaliada aos 24 anos apresentou menor retratibilidade, indicando maior estabilidade dimensional.

A madeira avaliada apresentou menores valores de contração radial, tangencial e volumétrica em relação aos descritos para as madeiras de *Eucalyptus benthamii* e *Eucalyptus saligna*, com densidades de 0,51-0,52 g/cm³ e 0,47 g/cm³, respectivamente, que foram iguais a 6,59%, 16,20% e 24,75% (Benin *et al*., 2017), 5,91%, 13,87% e 18,52% (Müller *et al*., 2014) e 7,67%, 14,83% e 26,0% (Oliveira & Silva, 2003), respectivamente. Esses resultados evidenciam que a madeira de *L. styraciflua* apresenta maior estabilidade dimensional em comparação a espécies de *Eucalyptus* com densidade básica semelhante.

O coeficiente de anisotropia da madeira de *L. styraciflua* aos 24 anos foi de 2,2. De acordo com a classificação de Klitzke (2007), esse valor caracteriza a madeira como de estabilidade dimensional média a baixa, com maior suscetibilidade à ocorrência de defeitos, quando submetida a processos inadequados de secagem. O coeficiente de anisotropia obtido foi semelhante ao relatado por Mattos *et al*. (2001) (2,3) e inferior ao observado por Freitas *et al*. (2015) (2,7) para a mesma espécie.

O módulo de ruptura (MOR) da madeira de *L. styraciflua* (Tabela 1) foi inferior ao valor de 101,60 MPa observado por Freitas *et al*. (2015) para o *Liquidambar* sp., cuja madeira apresentou densidade aparente a 12% de umidade de 0,55 g/cm³. Essa diferença pode estar associada à espécie, não descrita pelos autores, bem como às condições de sítio. Por outro lado, o módulo de elasticidade (MOE) foi semelhante ao registrado pelos autores (7.652,7 MPa).

Tabela 1 – Estatística descritiva das propriedades mecânicas da madeira de *Liquidambar styraciflua* L. aos 24 anos de idade.

Ensaio	Parâmetro	Média ± DP	Máximo	Mínimo
Flexão estática	$D_{12\%}$ (g/cm³)	0,65 ± 0,03	0,71	0,60
	MOE (MPa)	7964,42 ± 1799,19	11760,95	4846,56
	MOR (MPa)	59,24 ± 7,30	75,13	42,02
Cisalhamento paralelo à grã	$D_{12\%}$ (g/cm³)	0,67 ± 0,05	0,76	0,58
	Rmáx (MPa)	11,77 ± 1,68	14,98	7,52

Legenda: $D_{12\%}$ = densidade aparente a 12% de umidade; MOE = módulo de elasticidade; MOR = módulo de ruptura; Rmáx = resistência máxima; DP = desvio padrão.

Comparando os resultados obtidos para a madeira de *L. styraciflua* com espécies do gênero *Eucalyptus*, verificou-se que os valores de MOE e MOR foram inferiores aos relatados por Rodrigues (2002) para madeira de *E. grandis*, com densidade aparente a 12% de umidade de 0,67 g/cm³; e por Müller *et al*. (2014) para *E. benthamii*, cuja densidade aparente foi de

0,61 g/cm³. Em contrapartida, quando comparados aos clones de *E. grandis* × *E. urophylla* avaliados por Talgatti *et al*. (2018), com densidade aparente semelhante à observada neste estudo (0,64 g/cm³), os valores de MOE e MOR da madeira de *L. styraciflua* foram superiores em 41% e 11%, respectivamente.

O valor médio de resistência ao cisalhamento da madeira de *L. styraciflua* foi semelhante ao registrado pelo Forest Products Laboratory (2010) para a espécie (11,00 MPa), cuja madeira apresentou densidade aparente a 12% de umidade de 0,52 g/cm³, e superior ao observado por Lima *et al*. (2015), que relataram resistência de 7,5 MPa para a mesma espécie, sem menção da densidade.

Em comparação com espécies do gênero *Eucalyptus*, a madeira de *L. styraciflua* apresentou resistência ao cisalhamento semelhante ao valor de 10,22 MPa descrito por Rodrigues (2002) para madeira de *Eucalyptus grandis* com densidade aparente a 12% de umidade equivalente à observada neste estudo; e ao valor de 11,41 MPa observado por Müller *et al*. (2014) para a madeira de *Eucalyptus benthamii* com densidade aparente de 0,61 g/cm³.

4. Conclusões

A madeira de *Liquidambar styraciflua* aos 24 anos apresentou densidade básica média de 0,52 g/cm³**,** sem variação significativa ao longo do fuste comercial, evidenciando uniformidade dessa propriedade. As contrações radial, tangencial e volumétrica indicaram boa estabilidade dimensional quando comparadas a resultados disponíveis para a mesma espécie e para algumas espécies do gênero *Eucalyptus*. Entretanto, o coeficiente de anisotropia (2,2) classifica a madeira como instável, recomendando-se a condução cuidadosa da secagem para minimizar a ocorrência de defeitos.

As propriedades mecânicas obtidas indicam que a madeira apresenta desempenho satisfatório, porém inferior ao de algumas espécies de *Eucalyptus* tradicionalmente utilizadas em aplicações estruturais sujeitas à flexão. Por outro lado, a resistência ao cisalhamento foi semelhante ou superior à observada para algumas dessas espécies, indicando potencial para aplicações em que essa propriedade seja determinante.

5. Referências bibliográficas

Associação Brasileira de Normas Técnicas. (1997). NBR 7190: Projeto de estruturas de madeira. ABNT.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2003). NBR 11941: Madeira: determinação da densidade básica. ABNT.

Batista, D. C., Klitzke, R. J., & Santos, C. V. T. (2010). Densidade básica e retratibilidade da madeira de clones de três espécies de Eucalyptus. Ciência Florestal, 20(4), 665–674. https://doi.org/10.5902/198050982425

Benin, C. C., Waltzlawick, L. F., & Hillig, E. (2017). Propriedades físicas e mecânicas da madeira de *Eucalyptus benthamii* sob efeito do espaçamento de plantio. Ciência Florestal, 27(4), 1375–1384. https://doi.org/10.5902/1980509830219

Comisión Panamericana de Normas Técnicas. (1971). COPANT 30:1-007: Maderas: método de determinación de cisalhamento. COPANT.

Comisión Panamericana de Normas Técnicas. (1972). COPANT 30:1-006: Maderas: método de determinación de flexión estática. COPANT.

Dobner Júnior, M., Trazzi, P. A., Machado, A. A., & Higa, A. R. (2017). Aspectos dendrométricos e silviculturais de um povoamento de *Cunninghamia lanceolata* no sul do Brasil. Floresta, 47(1), 1–9. https://doi.org/10.5380/rf.v47i1.43562

Durlo, M. A. (1991). Tecnologia da madeira: Peso específico. UFSM.

Forest Products Laboratory. (1999). Wood handbook: Wood as an engineering material. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory.

Forest Products Laboratory. (2010). Wood handbook: Wood as an engineering material. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory.

Freitas, T. P., Feuchard, L. D., Oliveira, J. T. S., Paes, J. B., & Arantes, M. D. C. (2015). Caracterização anatômica e físico-mecânica da madeira de Liquidambar sp. Floresta, 45(4), 723–734. https://doi.org/10.5380/rf.v45i4.36878

Freitas, T. P., Oliveira, J. T. S., Silva, J. G. M., Pereira, M. P. C. F., Ferreira, J. C. (2017). Potencial de uso da madeira de Liquidambar sp. para produção de polpa celulósica e papel. Revista Ciências Agrárias, 60(4), 328–334. http://dx.doi.org/10.4322/rca.2510

Instituto Brasileiro de Árvores. (2025). IBÁ Relatório anual 2025. https://iba.org/publicacoes/relatorios-anuais/

Klitzke, R. J. (2007). Secagem da madeira. Em J. T. S. Oliveira, N. C. Fiedler, & M. Nogueira (Eds.), Tecnologias aplicadas ao setor florestal brasileiro (pp. 271–366). Suprema Gráfica e Editora.

Lima, I. L., Longui, E. L., Zanon, B., Florsheim, S. M. B., Garcia, J. N., & Júnior, G. B. (2015). Anatomia e propriedades da madeira de *Liquidambar styraciflua* aos 24 anos de idade em três classes de diâmetro. Scientia Forestalis, 43(107), 733–744.

Mattos, P. P., Pereira, J. C. D., Schaitza, E. G., Carvalho, P. E. R. (2001). Características da madeira de *Liquidambar styraciflua*. Embrapa Florestas.

Müller, B. V., Rocha, M. P. D., Cunha, A. B., Klitzke, R. J., & Nicoletti, M. F. (2014). Avaliação das principais propriedades físicas e mecânicas da madeira de *Eucalyptus benthamii* Maiden et Cambage. Floresta e Ambiente, 21(4), 535–542. https://doi.org/10.1590/2179-8087.050413

Oliveira, J. T. S., Hellmeister, J. C., & Tomazello Filho, M. (2005). Variação do teor de umidade e da densidade básica na madeira de sete espécies de eucalipto. Revista Árvore, 29(1), 115–127. https://doi.org/10.1590/S0100-67622005000100013

Oliveira, J. T. S., & Silva, J. C. (2003). Variação radial da retratibilidade e densidade básica da madeira de *Eucalyptus saligna*. Revista Árvore, 27(3), 381–385. https://doi.org/10.1590/S0100-67622003000300015

Rezende, M. A., Costa, V. E., Aroni, A. S., & Severo, E. T. D. (2007). Estudo das variações da densidade da madeira de *Liquidambar styraciflua* e do *Pinus tecunumannii* como parâmetro de qualidade para a produção de móveis. Holos Environment, 7(1), 60. https://doi.org/10.14295/holos.v7i1.973

Rodrigues, R. A. D. (2002). Variabilidade de propriedades físico-mecânicas em lotes de madeira serrada de eucalipto para construção civil (Dissertação de mestrado). Universidade de São Paulo.

Sargent, R. (2019). Evaluating dimensional stability in solid wood: A review of current practice. Journal of Wood Science, 65(36), 1–11. https://doi.org/10.1186/s10086-019-1817-1

Silveira, L. H. C., Rezende, A. V., & Vale, A. T. (2013). Teor de umidade e densidade básica da madeira de nove espécies comerciais amazônicas. Acta Amazonica, 43(2), 179–184. https://doi.org/10.1590/S0044-59672013000200007

Shimizu, J. Y., & Spir, I. H. Z. (2004). Produtividade de madeira de Liquidambar styraciflua L. de diferentes procedências em Quedas do Iguaçu, PR. Revista Árvore, 28(4), 487–491. https://doi.org/10.1590/S0100-67622004000400003

Shimizu, J. Y. (2005). Liquidambar para produção de madeira no sul e sudeste do Brasil. Boletim de Pesquisa Florestal, (50), 127–138.

Talgatti, M., Silveira, A. G., Santini, E. J., Gorski, L., Baldin, T., Valcorte, G. (2018). Propriedades físicas e mecânicas da madeira de clones de eucalipto. Scientia Agraria Paranaensis, 17(4), 434–442. https://doi.org/10.18188/sap.v17i4.20294

Valério, Á. F., Watzlawick, L. F., Silvestre, R., & Koehler, H. S. (2008). Determinação da densidade básica da madeira de cedro (*Cedrela fissilis* Vell.) ao longo do fuste. Pesquisa Aplicada & Agrotecnologia, 1(1), 23–28. https://doi.org/10.5777/paet.v1i1.5

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Propriedades físico-químicas e comportamento termogravimétrico de resíduos madeireiros provenientes de área de manejo florestal na Amazônia

Gabriela Aguiar Amorim[1]; Álison Moreira da Silva[1]; Fabíola Martins Delatorre[2]; Iara Nobre Carmona[2]; Kamilla Crysllayne Alves da Silva[1]; Fernanda Aparecida Nazário de Carvalho[1]; Thiago de Paula Protásio[3]; Ananias Francisco Dias Júnior[2]

[1] Universidade de São Paulo, "Luiz de Queiroz" College of Agriculture (USP/ESALQ), Av. Pádua Dias, 11, Piracicaba, SP 13418-900, Brazil
[2] Universidade Federal do Espírito Santo, Agricultural Sciences and Engineering Center. Av. Governador Lindemberg, 316, Jerônimo Monteiro, ES, 29550-000, Brazil
[3]Federal University of Lavras, Department of Forest Science, Lavras, MG 37200-900, Brazil

Resumo: O manejo florestal na Amazônia explora diversas espécies comerciais, gerando volumes consideráveis de resíduos lenhosos cujas propriedades tecnológicas, em muitos casos, permanecem pouco conhecidas. Este estudo comparou a densidade básica, a composição química estrutural e o comportamento termogravimétrico da madeira de resíduos de *Licania canescens* (LC) e *Tapirira guianensis* (TG), provenientes de uma Área de Manejo Florestal em Paragominas, PA. LC apresentou maior densidade básica, maior teor de lignina e menor teor de holocelulose, enquanto TG apresentou maior teor de extrativos. Esse padrão físico-químico refletiu-se no comportamento térmico, no qual LC manteve maior massa residual ao final do aquecimento, compatível com sua maior proporção de lignina. As curvas de DTG também evidenciaram menor intensidade de degradação para LC durante a etapa principal de decomposição. Os resultados demonstram a relação entre densidade, composição química e estabilidade térmica, contribuindo para a caracterização tecnológica de resíduos madeireiros provenientes do manejo florestal na Amazônia.

Palavras-chave: Biomassa lignocelulósica, Qualidade da madeira, Espécies florestais nativas.

Physicochemical properties and thermogravimetric behavior of wood residues from a forest management area in the Amazon

Abstract: Forest management in the Amazon exploits a range of commercial species, generating considerable volumes of woody residues whose technological properties are, in many cases, poorly understood. This study, therefore, compared the basic density, structural chemical composition, and thermogravimetric behavior of residue wood from Licania canescens (LC) and Tapirira guianensis (TG), sourced from a Forest Management Area in Paragominas (PA). LC showed higher basic density, higher lignin content, and lower holocellulose content, while TG showed higher extractive content. This physicochemical pattern was reflected in thermal behavior, in which LC retained a higher residual mass at the end of heating, consistent with its higher proportion of lignin. The results indicate that these properties are interrelated in both evaluated species, contributing technological data on forest management residues in the Amazon.
Keywords: Lignocellulosic biomass, Wood quality, Native forest species.

1. Introdução

O manejo florestal sustentável na Amazônia opera sob planos que autorizam a extração de um número limitado de árvores por hectare, geralmente priorizando espécies de valor comercial já consolidado no mercado. Esse modelo, no entanto, gera volumes consideráveis de madeira que não atende às especificações comerciais adotadas pela indústria, material e espécies que permanecem na floresta após a colheita ou são descartados por falta de caracterização tecnológica que oriente seu aproveitamento, seja como matéria-prima para produtos sólidos ou como biomassa para fins energéticos (DeArmond et al., 2023). A concentração histórica do setor madeireiro em um número reduzido de espécies conhecidas, em detrimento da vasta diversidade florística explorada sob manejo, reforça a lacuna entre o que é extraído e o que é efetivamente caracterizado do ponto de vista tecnológico (Lima et al., 2024). Ampliar essa base de dados, espécie por espécie, é o que permite que resíduos hoje descartados sejam eventualmente classificados como matéria-prima.

A densidade básica figura entre as propriedades mais empregadas nessa caracterização inicial por resultar da combinação de diversos fatores anatômicos e servir como indicador consistente da qualidade geral do material (Longui et al., 2024; Movahedi-Rad et al., 2026). Essa propriedade física, contudo, também é relacionada à composição química estrutural da madeira; o teor de extrativos, por exemplo, influencia a densidade e a durabilidade natural da madeira, enquanto a proporção entre lignina e holocelulose afeta a contração volumétrica e o comportamento do material em processos de degradação térmica (Villanova et al., 2023; Baselly-Villanueva et al., 2025). Ou seja, essa mesma composição química estrutural também é um indicativo de como a madeira se decompõe quando submetida a temperaturas crescentes, as hemiceluloses se degradam entre 200 e 300°C, a celulose entre 240 e 350°C, e a lignina, entre 350 e 500°C (Barros et al., 2023; Villanova et al., 2023).

Na prática, a integração entre densidade, composição química e perfil de degradação térmica fornece um diagnóstico necessário para definição de rotas de valorização da biomassa residual. Materiais com maior densidade e teores elevados de lignina tendem a apresentar maior estabilidade térmica e rendimento em carbono, sendo prioritários para a geração de bioenergia, combustão e produção de carvão vegetal (Ferreira et al., 2024; Da Silva et al., 2025). Por outro lado, materiais com maior proporção de holocelulose e extrativos apresentam maior reatividade e degradação em temperaturas mais baixas, direcionando-se a outros processos de conversão termoquímica ou produtos reconstituídos (Leite et al., 2024). Nesse contexto de destinação tecnológica, resíduos das espécies como *Licania canescens* Benoist e *Tapirira guianensis* Aubl. atendem como representantes de perfis contrastantes gerados nas áreas de manejo da Amazônia,

tornando sua caracterização importante para transformar um passivo da colheita florestal em matéria-prima com aplicação definida.

Portanto, nesse encontro entre propriedade física, composição química e comportamento térmico, se situa a comparação entre as duas espécies amazônicas de manejo florestal aqui analisadas. Ainda que essa relação já esteja documentada para espécies plantadas e amplamente estudadas, como eucalipto e pínus, cada espécie nativa da Amazônia constitui um dado ainda pouco explorado nesse mapeamento, dada a extensão da diversidade florística presente na região (Ferreira et al., 2024; Nascimento, et al., 2024). A comparação conduzida neste trabalho, ao integrar densidade básica, composição química estrutural e comportamento termogravimétrico das duas espécies selecionadas, soma-se a esse esforço de ampliação da base de dados tecnológicos sobre madeiras amazônicas de manejo florestal.

2. Material e métodos

O material analisado consiste em resíduos madeireiros oriundos de uma Área de Manejo Florestal (FMA) localizada no município de Paragominas, Pará (3°30'-3°45'S; 48°30'-48°45'W). Entre as espécies disponíveis, foram selecionados resíduos de *Licania canescens Benoist* e *Tapirira guianensis* Aubl., coletados em anos anteriores a 2024.

A densidade básica foi determinada pelo método de imersão, conforme a norma ASTM D2395-17, a partir da relação entre a massa seca (103 ± 2 °C, massa constante) e o volume saturado dos corpos de prova, obtido por deslocamento de água. O teor de extrativos totais foi obtido segundo a norma ASTM D1107, por extração sucessiva em Soxhlet com etanol/tolueno (2:1, 6 h), etanol (4 h) e água quente (1 h), após moagem e classificação granulométrica do material (40-60 mesh). O teor de lignina insolúvel (Klason) foi determinado pelo método de hidrólise com ácido sulfúrico, conforme Abreu et al. (2006). O teor de holocelulose foi obtido por diferença, subtraindo os teores de extrativos totais e de lignina insolúvel do valor total da massa seca da amostra. O comportamento térmico da madeira foi avaliado em analisador termogravimétrico Labsys Evo (Setaram), com aproximadamente 4 mg de amostra (60 mesh), taxa de aquecimento de 5 °C min^{-1}, da temperatura ambiente (~30 °C) até 800 °C. Os dados de densidade básica, teores de extrativos, lignina e holocelulose foram submetidos à análise de variância (ANOVA), em delineamento inteiramente casualizado, considerando as duas espécies avaliadas (*Licania canescen*s e *Tapirira guianensis*) como tratamentos. Nos casos em que se verificou diferença estatisticamente significativa, as médias foram comparadas pelo teste de Tukey, ao nível de 5% de significância ($p < 0,05$). As análises foram realizadas no software R.

3. Resultados e discussão

Os resultados obtidos de densidade básica para as espécies *Licania canescens* (LC) e *Tapirira guianensis* (TG) estão dispostos na Figura 1.

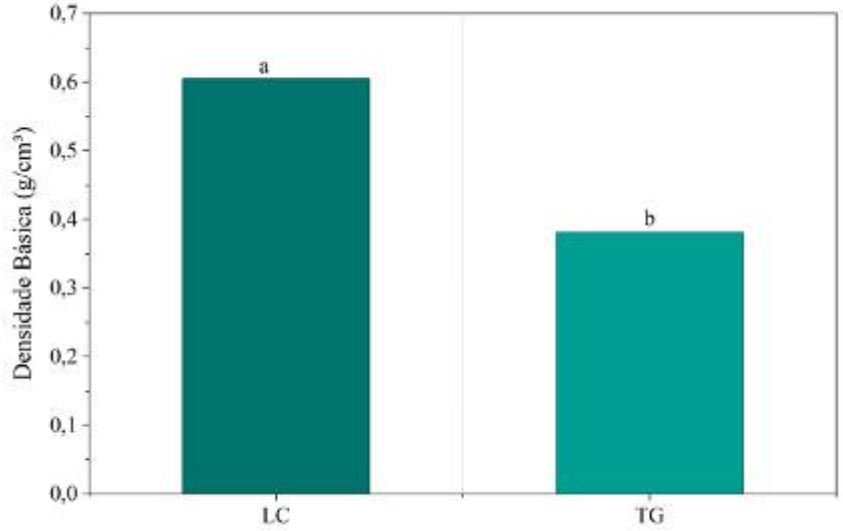


Figura 1 – Densidade básica das espécies *Licania canescens* (LC) e *Tapirira guianensis* (TG). Médias seguidas de letras minúsculas diferentes, diferem estatisticamente entre si a 5% de significância ($p < 0,05$) pelo teste de Tukey.

Os resultados mostram diferença estatisticamente significativa entre as espécies, com LC apresentando valor médio de aproximadamente 0,60 g cm^{-3} e TG, de aproximadamente 0,38 g cm^{-3}, uma diferença superior a 35% entre as duas madeiras. De acordo com a classificação de Watai (1991), adotada pelo IPT e citada nas fontes, esses valores posicionam a LC na faixa de média densidade (0,550 a 0,750 g cm^{-3}) e a TG na faixa de densidade muito baixa (< 0,400 g cm^{-3}). Essa disparidade confirma que, embora colhidas sob o mesmo plano de manejo florestal na Amazônia, as espécies produzem resíduos com potenciais tecnológicos distintos para conversão energética. É fundamental salientar que esses valores referem-se a resíduos de manejo e não necessariamente à madeira do fuste. A literatura reporta que a densidade básica da madeira pode variar significativamente conforme a parte da árvore analisada, apresentando valores em torno de 0,881 g cm^{-3} para *L. canescens* e 0,397 g cm^{-3} para *T. guianensis* quando avaliados como resíduos em outras amostragens (Lima et al., 2022). Os valores inferiores observados neste estudo em comparação com dados de fuste da literatura são condizentes com a natureza do material residual; madeiras de galhos e da copa tendem a apresentar densidade reduzida em relação ao tronco principal devido a diferenças anatômicas, como o diâmetro do

lúmen e a espessura da parede das fibras (Lima et al., 2022; Lima et al., 2024; Melo et al., 2024).

Para a composição química estrutural, também foram identificadas diferenças estatísticas significativas entre as espécies comparadas (Figura 2).

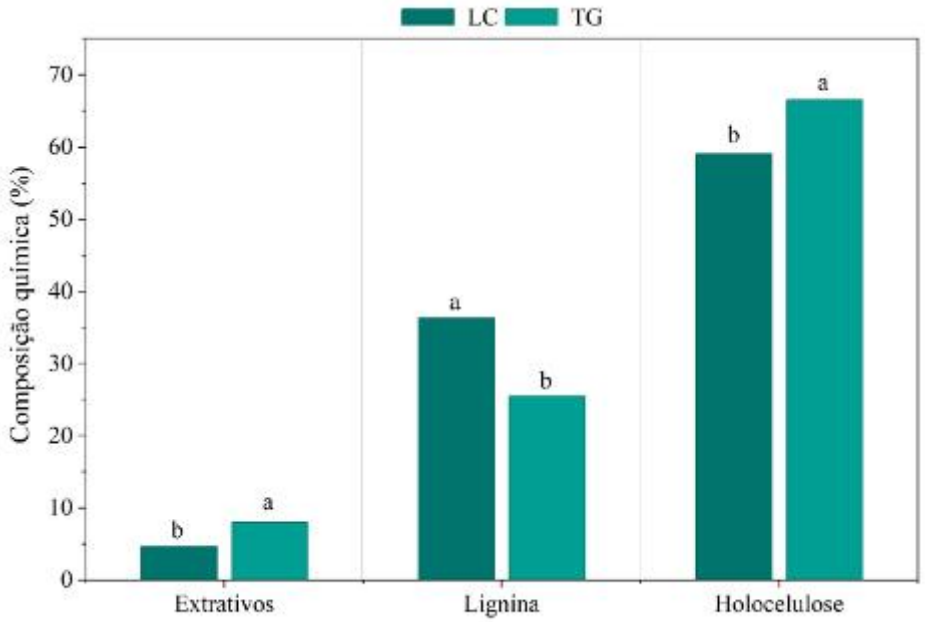


Figura 2 – Teor de extrativos, lignina e holocelulose das espécies *Licania canescens* (LC) e *Tapirira guianensis* (TG). Médias seguidas de letras minúsculas diferentes, diferem estatisticamente entre si a 5% de significância ($p < 0,05$) pelo teste de Tukey.

TG apresentou teor de extrativos significativamente superior ao de LC (~8,0% contra ~4,5%), teor de lignina significativamente inferior (~25% contra ~36%) e teor de holocelulose significativamente superior (~66% contra ~59%). Esse padrão, espécie mais densa com maior teor de lignina e menor teor de holocelulose, e espécie menos densa com o inverso, reproduz a relação já reportada na literatura (Villanova et al., 2023; Baselly-Villanueva et al., 2025). Essa coerência reforça a leitura de que a densidade mais elevada de LC está relacionada à maior proporção de lignina em sua parede celular, componente responsável pela impermeabilização e rigidez da parede celular. Por outro lado, a densidade mais baixa de TG acompanha sua maior fração de holocelulose. Embora a celulose seja o componente majoritário e influencie a densidade da parede celular, o teor de extrativos mais elevado em TG sugere uma maior concentração de compostos químicos que, dependendo de sua natureza e localização, podem explicar o comportamento tecnológico da espécie mesmo em faixas de densidade básica muito baixa (Barros et al., 2023; Leite et al., 2024).. Além disso, a variação na densidade básica e na

composição química entre esses resíduos de manejo reforça a necessidade de classificação do material por grupos de espécies para otimizar seu uso tecnológico

Considerando que a composição química da madeira determina, em grande medida, seu comportamento frente ao aquecimento, avaliou-se o comportamento térmico das duas espécies por meio da análise termogravimétrica (TGA), cujas curvas são apresentadas na Figura 3.

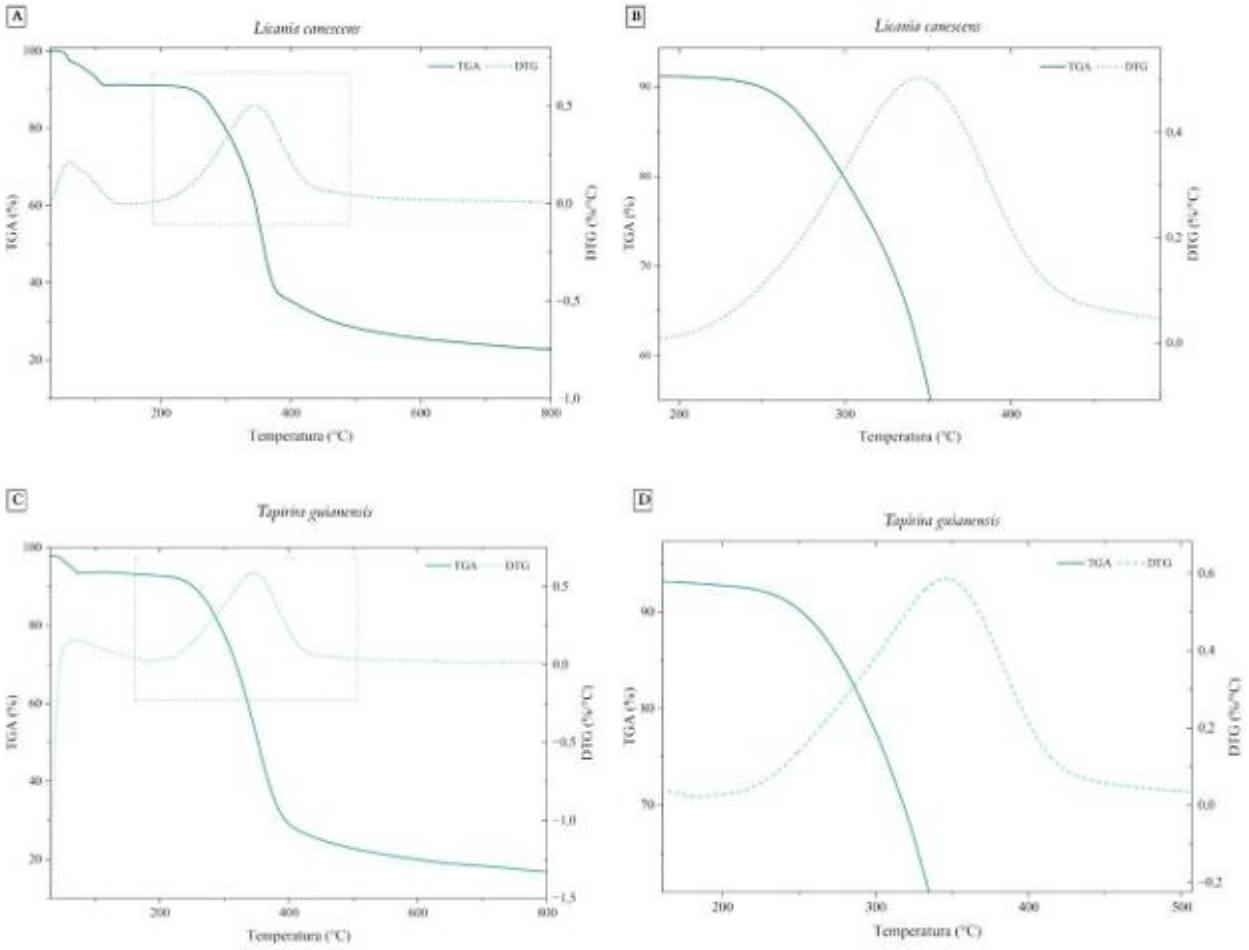


Figura 3 – Curvas de análise termogravimétrica (TGA) e de sua derivada (DTG) para as madeiras de *Licania canescens* (A-B) e *Tapirira guianensis* (C-D). Os painéis A e C apresentam o perfil completo de degradação térmica (30–800 °C), enquanto os painéis B e D destacam, em maior escala, a etapa principal de degradação, evidenciando o pico máximo da DTG.

As curvas de TGA (Figuras 3A e 3C) apresentam comportamento semelhante, sendo possível distinguir três regiões principais de degradação térmica. A primeira, até aproximadamente 150 °C, corresponde a uma discreta perda de massa, atribuída principalmente à evaporação da umidade e de compostos voláteis de baixa massa molecular. A segunda, entre

aproximadamente 250 e 450 °C, concentra a maior perda de massa, refletindo a decomposição dos principais constituintes estruturais da parede celular. Por fim, acima de aproximadamente 450 °C, observa-se uma redução gradual da massa remanescente, associada à degradação dos componentes mais termicamente estáveis e à carbonização progressiva do material (Barros et al., 2023; Villanova et al., 2023).

Embora apresentem comportamento térmico semelhante, as espécies diferem na magnitude da perda de massa. Ao final do ensaio (800 °C), *Licania canescens* apresentou massa residual de aproximadamente 23%, enquanto *Tapirira guianensis* reteve cerca de 16-17%, diferença que se estabelece durante a etapa principal de degradação e permanece até o término da análise. Esse comportamento é consistente com a composição química das espécies, uma vez que *L. canescens* apresentou maior teor de lignina (~36%) e menor teor de holocelulose do que *T. guianensis*. Como a lignina apresenta maior estabilidade térmica e se decompõe de forma mais lenta e distribuída em uma ampla faixa de temperaturas, sua maior participação favorece a formação de material carbonáceo residual, resultando em maior rendimento sólido ao final da análise (Longui et al., 2024; Leite et al., 2024; Movahedi-Rad et al., 2026).

As curvas de DTG (Figuras 3B e 3D) evidenciam a faixa de temperatura em que ocorre a máxima velocidade de degradação térmica. Em ambas as espécies, o pico principal situa-se aproximadamente entre 300 e 380 °C, intervalo associado predominantemente à decomposição das hemiceluloses e, principalmente, da celulose (Villanova et al., 2023). Embora os picos ocorram em temperaturas semelhantes, *L. canescens* apresenta intensidade inferior à observada para *T. guianensis*, indicando uma taxa máxima de perda de massa menor, compatível com seu menor teor de holocelulose e maior proporção de lignina. Acima de aproximadamente 450 °C, a DTG tende gradualmente a valores próximos de zero, indicando que a perda de massa ocorre de forma lenta e contínua. Esse comportamento é característico da degradação da lignina, cuja estrutura aromática altamente condensada promove decomposição distribuída ao longo de uma ampla faixa de temperaturas, em vez de um único evento bem definido (Villanova et al., 2023). Consequentemente, *L. canescens* mantém maior fração de massa residual ao final do ensaio, em concordância com seu maior teor de lignina.

4. Conclusões

A comparação entre as duas espécies respondeu que maior densidade básica de LC acompanhou maior teor de lignina e menor teor de holocelulose, padrão que se refletiu em maior massa residual ao final da degradação térmica em relação a TG. Esse resultado reproduz,

especificamente para resíduos madeireiros, uma relação entre composição química e comportamento térmico documentada majoritariamente para madeira de tronco de espécies plantadas. Densidade, composição química e comportamento termogravimétrico não devem, portanto, ser interpretados isoladamente na caracterização tecnológica desses resíduos, e os valores aqui obtidos constituem um dado técnico específico sobre duas espécies amazônicas de manejo florestal ainda pouco representadas na literatura do setor.

5. Agradecimentos

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), ao Laboratório de Energia da Biomassa (LEB/UFES), pelo suporte fornecido ao desenvolvimento desta pesquisa; à Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" (ESALQ/USP), ao Programa de Pós-Graduação em Recursos Florestais (PPGRF/ESALQ), à Universidade Federal de Lavras e à Sociedade de Amparo ao Desenvolvimento Tecnológico e Cultural (Sadtec, Brasil).

6. Referências bibliográficas

Barros, D., Fernandes, É., Jesus, M., Barros, L., Alonso-Esteban, J. I., Pires, P., & Vaz Velho, M. (2023). The chemical characterisation of the maritime pine bark cultivated in Northern Portugal. *Plants*, *12*(23), Artigo 3940. https://doi.org/10.3390/plants12233940

DeArmond, D., Emmert, F., Pinto, A. C. M., Lima, A. J. N., & Higuchi, N. (2023). A systematic review of logging impacts in the Amazon biome. *Forests*, *14*(1), Artigo 81. https://doi.org/10.3390/f1401008

Baselly-Villanueva, J. R., Fernández-Sandoval, A., Salazar-Hinostroza, E. J., Cárdenas-Rengifo, G. P., Puerta, R., Trigoso, T. S. C., Rufasto-Peralta, Y. L., Vallejos-Torres, G., Casas, G. G., Araújo Junior, C. A., Quiñónez-Barraza, G., Álvarez-Álvarez, P., & Leite, H. G. (2025). MultiProduct optimization of *Cedrelinga cateniformis* (Ducke) Ducke in different plantation systems in the Peruvian Amazon. *Forests*, *16*(1), Artigo 164. https://doi.org/10.3390/f16010164

Leite, A. S., do Nascimento, C. S., de Almeida Cruz, I. ., de Oliveira, M. S., de Araújo, R. D., do Nascimento, C. C., & Higuchi, N. (2024). Impact of thermal treatment on the properties of

assacú (Hura crepitans L.) and murici (Byrsonima crispa A.Juss.) Amazon woods. New Zealand Journal of Forestry Science, 54. https://doi.org/10.33494/nzjfs542024x256x

Ferreira, G., Brito, T. M., Silva, J. G. M. da, Minini, D., Dias Júnior, A. F., Brito, F. M. S., … Batista, D. C. (2024). Insights about the use wood waste from the neotropical Amazonian for the generation of renewable energy. Journal of Wood Chemistry and Technology, 44(6), 341–350. https://doi.org/10.1080/02773813.2024.2404572

Melo, R. R. de, Medeiros, D. T. de, Batista, F. G., Souza, J. B. de, Rusch, F., Mascarenhas, A. R. P., … Paula, E. A. de O. (2026). Characterization and grouping of various tropical kinds of wood species by density and colourimetric parameters. Wood Material Science & Engineering, 21(1), 623–632. https://doi.org/10.1080/17480272.2024.2440550

Movahedi-Rad, A. V., Grabner, M., Subhani, M., Moosavi-Dezfooli, S. M., Burgert, I., & Schubert, M. (2026). Importance-driven bottleneck model: a multi-stage deep learning approach for analyzing swelling-shrinkage behavior of wood species and their mechanical properties. *Journal of Wood Science*, *72*, Artigo 21. https://doi.org/10.1186/s10086-026-02266-9

Nascimento, C. S., Varejão, M. de J. C., de Araújo, R. D., Costa, J. E. E., da Silva, C. E., Abreu, R. L. S. de, … Higuchi, N. (2026). Technological characterization of tropical woods from the genus Eperua (Fabaceae). Wood Material Science & Engineering, 21(1), 204–213. https://doi.org/10.1080/17480272.2024.2413388

L.T. Watai, Personal communication, 1991

Lima, M. D. R., Massuque, J., Bufalino, L., Trugilho, P. F., Ramalho, F. M. G., Protásio, T. P., & Hein, P. R. G. (2022). Clarifying the carbonization temperature effects on the production and apparent density of charcoal derived from Amazonia wood wastes. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, *166*, Article 105636. https://doi.org/10.1016/j.jaap.2022.105636

Lima, F. B. de, Souza, Á. N. de, Matricardi, E. A. T., Gaspar, R. de O., Lima, I. B. de, Souza, H. J. de, Santos, M. L. dos, Miguel, E. P., Borges, L. A. C., Santos, C. R. C. dos, Gouveia, F. N., & Lima, M. de F. de B. (2024). Alternative tree species for sustainable forest management in the Brazilian Amazon. *Forests*, *15*(10), Artigo 1763. https://doi.org/10.3390/f15101763

Longui, E. L., Lima, I. L. de, Ranzini, M., Barbosa, J. de A., Yamaji, F. M., Eufrade Junior, H. de J., Silva Júnior, F. G. da, & Assumpção, P. A. de. (2024). Wood chemical characterization of Acacia mangium and Calophyllum brasiliense grown in plantation. *Research, Society and Development*, *13*(12), Artigo e147131246685. https://doi.org/10.33448/rsd-v13i12.46685

Villanova, P. H., Torres, C. M. M. E., Jacovine, L. A. G., Carneiro, A. C. O., Ballotin, F. C., Schettini, B. L. S., Rocha, S. J. S. S., Rufino, M. P. M. X., Freitas, M. F., & Castro, R. V. O. (2023). Physical and chemical properties of Coarse Woody Debris submitted to the natural process of decomposition in a Secondary Atlantic Forest Fragment in Brazil. *Scientific Reports*, *13*, Article 11843. https://doi.org/10.1038/s41598-023-34526-9

Propriedades Mecânicas da Madeira de *Hevea Brasiliensis* de Diferentes Clones em Sistema Consorciado com Cacau

Wattson Quinelato Barreto de Araujo[1]; Bruno Maia Barroso Burns[1]; Jessica Tavares Chaves Faria[1]; Carlos Fernando Ferreira da Silva[1]; Thuane Sofia Gomes dos Santos[1]; Larissa Brandão Pereira[1]; Alexandre Monteiro de Carvalho[1]

1 Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Instituto de Florestas, Seropédica-RJ, Brasil.

Resumo: A madeira de seringueira (*Hevea brasiliensis*) tem se destacado como alternativa sustentável no mercado internacional, mas seu potencial no Brasil ainda é pouco explorado, especialmente em sistemas consorciados. Este estudo avaliou as propriedades mecânicas da madeira de dois clones (1 e 2) provenientes de consórcios com cacau no sul da Bahia, com mais de 50 anos de idade. Os ensaios seguiram a norma ABNT NBR 7190, determinando-se o Módulo de Ruptura (MOR) em flexão estática, compressão paralela às fibras e cisalhamento. Os resultados revelaram que o Clone 2 apresentou valores superiores em todas as propriedades: flexão (738,2 kgf/cm² contra 598,7 kgf/cm²), compressão paralela (420,1 kgf/cm² contra 341,6 kgf/cm²) e cisalhamento (111,2 kgf/cm² contra 95,3 kgf/cm²). A análise de variância (ANOVA) confirmou diferenças estatisticamente significativas ($p < 0,05$) entre os clones para todas as propriedades. Quando comparada a outras madeiras comerciais (eucalipto, pinus e ipê), a seringueira posiciona-se como madeira de média resistência, adequada para aplicações em móveis, painéis e estruturas leves. Conclui-se que o Clone 2 apresenta melhor desempenho mecânico, e a madeira de seringueira de sistemas consorciados possui potencial para agregar valor à produção agroflorestal.

Palavras-chave: *Hevea brasiliensis*; Resistência Mecânica; Clone; Flexão; Compressão Paralela.

Mechanical Properties Of *Hevea Brasiliensis* Wood From Different Clones In An Agroforestry System With Cocoa

Abstract: Rubberwood (*Hevea brasiliensis*) has stood out as a sustainable alternative in the international market, but its potential in Brazil is still little explored, especially in agroforestry systems. This study evaluated the mechanical properties of wood from two clones (1 and 2) from cocoa intercropping systems in southern Bahia, over 50 years old. The tests followed the ABNT NBR 7190 standard, determining the Modulus of Rupture (MOR)

in static bending, parallel compression to fibers, and shear. The results revealed that Clone 2 presented higher values in all properties: bending (738.2 kgf/cm² vs. 598.7 kgf/cm²), parallel compression (420.1 kgf/cm² vs. 341.6 kgf/cm²), and shear (111.2 kgf/cm² vs. 95.3 kgf/cm²). Analysis of variance (ANOVA) confirmed statistically significant differences ($p < 0.05$) between clones for all properties. When compared to other commercial woods (eucalyptus, pine, and ipê), rubberwood positions itself as a medium-strength wood, suitable for applications in furniture, panels, and light structures. It is concluded that Clone 2 presents better mechanical performance, and rubberwood from agroforestry systems has potential to add value to agroforestry production.

Keywords: *Hevea brasiliensis*; Mechanical Resistance; Clone; Bending; Parallel Compression.

1. INTRODUÇÃO

A seringueira (*Hevea brasiliensis*), espécie nativa da Amazônia, é conhecida mundialmente pela produção de látex para fabricação de borracha. No entanto, após o declínio do mercado do látex no Brasil e a ascensão do cultivo do cacau, muitas áreas que antes eram destinadas ao extrativismo da borracha hoje abrigam sistemas de consórcio agroflorestal, nos quais as seringueiras, com mais de 50 anos, permanecem como componentes estruturais (Killmann & Hong, 2000). Com a redução da produtividade em látex dessas árvores envelhecidas, surge uma oportunidade para o aproveitamento sustentável de sua madeira.

A utilização da madeira de seringueira ("rubberwood") é uma prática consolidada em países asiáticos, especialmente na Malásia, Tailândia e Indonésia, onde a espécie é amplamente utilizada na fabricação de móveis, pisos, compensados e outros produtos de alto valor agregado (ITTO, 2023). A Malásia, por exemplo, processa cerca de 2,5 milhões de m³/ano de rubberwood, enquanto o Brasil, detentor de 300 mil hectares de seringais, aproveita menos de 5% desse potencial (ITTO, 2023).

As propriedades mecânicas da madeira são determinantes para sua aplicação industrial, pois definem a capacidade do material de resistir a esforços externos. O Módulo de Ruptura (MOR) em flexão, compressão paralela e cisalhamento são parâmetros fundamentais para classificar a madeira quanto à sua aptidão para diferentes usos (ABNT, 1997). Madeiras com MOR em compressão paralela inferior a 350 kgf/cm² são limitadas

a estruturas não load-bearing, enquanto valores entre 350 e 500 kgf/cm² são considerados de média resistência, e acima de 500 kgf/cm² indicam alta resistência (Pereira, 2021).

No Brasil, embora o potencial madeireiro da seringueira seja reconhecido, seu uso ainda é incipiente, especialmente em sistemas consorciados, como os implantados no estado da Bahia (Carvalho, 2021). A carência de estudos técnicos sobre as propriedades mecânicas da madeira de *Hevea brasiliensis* em condições de consórcio com cacau limita a exploração comercial desse recurso. Além disso, a variação entre diferentes clones da espécie, que pode influenciar significativamente as propriedades da madeira, ainda é pouco estudada no contexto brasileiro.

Diante desse contexto, este trabalho teve como objetivo avaliar e comparar as propriedades mecânicas (MOR em flexão estática, compressão paralela às fibras e cisalhamento) da madeira de dois clones de *Hevea brasiliensis* 1 e 2) provenientes de consórcios com cacau no estado da Bahia, visando subsidiar seu aproveitamento comercial e incentivar práticas de manejo integrado.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Material

A pesquisa foi conduzida com madeira de *Hevea brasiliensis* proveniente da Fazenda Ondulada, pertencente à Agrícola Cantagalo, localizada em Ituberá, sul da Bahia. Foram avaliados dois clones: Clone 1 e Clone 2. As árvores, com mais de 50 anos de idade, estavam implantadas em sistema de "cabruca" (consórcio com cacau).

Foram selecionadas 24 árvores (12 de cada clone), classificadas em três classes diamétricas (superior, média e inferior) não inferênciadas como covariável por limitações no tempo e recursos do projeto, sendo utilizadas apenas para fins de logistica de supressão e transporte do material. De cada árvore, foram extraídas duas toras (descartando-se a porção de 20 cm a partir do solo), igualmente para todos os individuos, de 2,5 metros de comprimento, que receberam tratamento fungicida (Osmotox) e selante nos topos (Humacer) para prevenção de ataques de fungos manchadores.

2.2. Preparação das Amostras

Após o transporte das toras para a serraria do Departamento de Produtos Florestais da UFRRJ, realizou-se o desdobro primário em serra de fita vertical. Para os ensaios de propriedades mecânicas, foram confeccionados 2 corpos de prova de cada árvore, retirados

da mema porção da prancha central diametral, seco em estufa, aclimatados em ambiente controlado a 20ºC e 65% de umidade conforme as especificações da norma ABNT NBR 7190 (ABNT, 2022), com dimensões adequadas para cada tipo de ensaio. Para contornar a não-idependencia dos corpos de prova provenientes da mesma árvore, os valores dos dois CP's de cada indivíduo foram calculados como uma média aritimética.

2.3. Determinação das Propriedades Mecânicas

As propriedades mecânicas foram determinadas conforme o Anexo B da norma NBR ABNT 7190:1997 - Projetos de Estruturas de Madeira. Os ensaios foram realizados em máquina de ensaios universal (EMIC), com leitura de esforços e deslocamentos registrados em software específico para avaliações em corpos de prova de madeira.

Foram determinados os seguintes parâmetros:

- **Módulo de Ruptura (MOR) em flexão estática perpendicular às fibras (kgf/cm²):** determinado em corpos de prova com dimensões adequadas, submetidos a carregamento até a ruptura.
- **Módulo de Ruptura (MOR) em compressão paralela às fibras (kgf/cm²):** determinado em corpos de prova com dimensões adequadas, submetidos a carregamento axial até a ruptura.
- **Módulo de Ruptura (MOR) em cisalhamento (kgf/cm²):** determinado em corpos de prova com dimensões adequadas, submetidos a esforço de cisalhamento até a ruptura.

2.4. Análise Estatística

Para comparação das médias entre os dois clones, foi realizada análise de variância (ANOVA) com nível de significância de 5% ($p < 0,05$). As hipóteses testadas foram: H0

- não há diferença significativa entre os clones; H1 - há diferença estatisticamente relevante. O valor de p (p-valor) indicou a rejeição ou não da hipótese nula.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Propriedades Mecânicas

Os resultados das propriedades mecânicas para os dois clones estão apresentados nas Tabelas 1, 2 e 3, com as respectivas estatísticas descritivas.

Tabela 1 – Estatísticas descritivas para MOR em flexão estática

Estatística	Clone 1	Clone 2	Diferença
Média (kgf/cm²)	598,7	738,2	+139,5
Desvio Padrão (kgf/cm²)	± 155,0	± 189,7	-
Mínimo (kgf/cm²)	158,1	406,9	-
Máximo (kgf/cm²)	947,4	1.130,9	-
Coeficiente de Variação (%)	25,90	25,70	-

Fonte: Dados da pesquisa (2025).

Tabela 2 – Estatísticas descritivas para MOR em compressão paralela

Estatística	Clone 1	Clone 2	Diferença
Média (kgf/cm²)	341,6	420,1	+78,5
Desvio Padrão (kgf/cm²)	± 59,1	± 72,4	-
Mínimo (kgf/cm²)	240,6	279,4	-
Máximo (kgf/cm²)	437,5	592,5	-
Coeficiente de Variação (%)	17,30	17,20	-

Fonte: Dados da pesquisa (2025).

Tabela 3 – Estatísticas descritivas para MOR em cisalhamento

Estatística	Clone 1	Clone 2	Diferença
Média (kgf/cm²)	95,3	111,2	+15,9
Desvio Padrão (kgf/cm²)	± 19,1	± 17,8	-
Mínimo (kgf/cm²)	67,2	60,5	-
Máximo (kgf/cm²)	136,3	141,1	-

Coeficiente de Variação (%)	20,00	16,00	-

Fonte: Dados da pesquisa (2025).

3.2. Análise de Variância (ANOVA)

Os resultados da análise de variância (ANOVA) para comparação entre os clones estão apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 – Resultados da ANOVA para comparação das propriedades mecânicas entre os clones

Propriedade	Fonte de Variação	GL	SQ	QM	F-valor	p-valor
Flexão	Clone (1 vs. 2)	1	2.845,7	2.845,7	18,92	< 0,001
	Resíduos	46	6.920,3	150,4	-	-
Compressão Paralela	Clone (1 vs. 2)	1	1.128,4	1.128,4	12,45	0,001
	Resíduos	46	4.167,8	90,6	-	-
Cisalhamento	Clone (1 vs. 2)	1	6.124,3	6.124,3	8,76	0,005
	Resíduos	46	32.178,9	699,5	-	-

Fonte: Dados da pesquisa (2025).

Os resultados da ANOVA demonstraram que os clones se diferem significativamente em todas as propriedades mecânicas testadas, com p-valores inferiores a 0,05 para todos os parâmetros. A flexão foi a propriedade mais sensível à variação genética, apresentando o maior F-valor (18,92) e menor p-valor (< 0,001). Estes resultados confirmam que as

diferenças observadas não são aleatórias e que o Clone 2 apresenta desempenho mecânico superior ao Clone 1.

3.3. Flexão Estática

Os valores médios de MOR em flexão estática foram 598,7 kgf/cm² para o Clone 1 e 738,2 kgf/cm² para o Clone 2, representando uma diferença de 23,3% entre os clones. Estes resultados demonstram que o material genético da seringueira pode apresentar variação expressiva, corroborando a ideia de que a seleção de clones pode favorecer o potencial de melhoria em sua função estrutural.

Quando comparados com a literatura, os valores obtidos para o Clone 1 posicionam-se próximos aos encontrados por Pereira et al. (2020) para seringueira em Mato Grosso (560,9 a 764,8 kgf/cm²). Já o Clone 2 apresenta valores superiores à média da seringueira, aproximando-se do eucalipto (815,8 a 1.019,7 kgf/cm²). Segundo Pereira (2021), madeiras com MOR em flexão ≥ 600 kgf/cm² suportam aplicações em vigas e decks, enquanto valores entre 300 e 500 kgf/cm² são adequados para móveis e painéis. Com base nessa classificação, ambos os clones podem ser utilizados em aplicações estruturais leves, com o Clone 2 apresentando maior margem de segurança.

3.4. Compressão Paralela

Os valores médios de MOR em compressão paralela foram 341,6 kgf/cm² para o Clone 1 e 420,1 kgf/cm² para o Clone 2, representando uma diferença de 23,0% entre os clones. Estes valores enquadram a madeira de seringueira na categoria de média resistência (350-500 kgf/cm²), conforme classificação da NBR 7190 (ABNT, 1997).

A comparação com outras madeiras comerciais revela que o Clone 1 situa-se no limite inferior da faixa de média resistência, enquanto o Clone 2 aproxima-se do eucalipto (509,9-611,8 kgf/cm²). Os valores encontrados são superiores aos relatados por Lima et al. (2020) para seringueira em São Paulo (356,9-458,9 kgf/cm²), possivelmente refletindo a idade avançada das árvores estudadas.

A resistência à compressão paralela é um parâmetro crítico para aplicações estruturais, pois indica a capacidade da madeira de suportar cargas axiais. Valores acima de 400 kgf/cm², como os obtidos para o Clone 2, sugerem que a madeira pode ser utilizada em elementos estruturais leves, como pilares e escoras, desde que devidamente dimensionados.

3.5. Cisalhamento

Os valores médios de MOR em cisalhamento foram 95,3 kgf/cm² para o Clone 1 e 111,2 kgf/cm² para o Clone 2. Ambos os valores enquadram a madeira de seringueira na categoria de média resistência ao cisalhamento (100 a 140 kgf/cm²), conforme classificação da NBR 7190 (ABNT, 1997).

A resistência ao cisalhamento é particularmente relevante para junções estruturais, como ligações em móveis, painéis colados e estruturas de madeira. A norma ASTM D143 (2021) estabelece que madeiras com resistência ao cisalhamento abaixo de 70 kgf/cm² exigem reforços mecânicos em construções. Os valores obtidos para ambos os clones são superiores a este limite, indicando que a madeira de seringueira pode ser utilizada em elementos estruturais sem a necessidade de reforços adicionais.

Os valores superiores de resistência ao cisalhamento dos dois clones, em comparação com o eucalipto (49,97 kgf/cm² segundo Lobão et al., 2004), destacam-se como uma característica favorável da madeira de seringueira. Este comportamento pode ser explicado pelas características anatômicas da espécie, incluindo a presença de desvios de grã associados à densidade média da madeira.

3.6. Comparação com Outras Madeiras Comerciais

A Tabela 5 apresenta a comparação dos resultados obtidos com outras madeiras comerciais amplamente utilizadas no mercado brasileiro.

Tabela 5 – Comparação das propriedades mecânicas com outras madeiras comerciais

Propriedade	Clone 1	Clone 2	Eucalipto*	Pinus*	Ipê*
Flexão (MOR)	598,7	738,2	815,8-1.019,7	509,9-713,8	> 1.019,7
Compressão Paralela	341,6	420,1	509,9-611,8	305,9-407,9	611,8-815,8
Cisalhamento	95,3	111,2	140-180	100-120	> 200

Fonte: Dados da pesquisa (2025). *Dados de literatura: Eucalipto (Lobão et al., 2004; Pereira, 2021), Pinus (Pereira, 2021), Ipê (Pereira, 2021).

A comparação com outras espécies comerciais revela que a madeira de seringueira, especialmente o Clone 2, apresenta desempenho comparável ou superior ao pinus, que é amplamente utilizado na indústria moveleira e de painéis. Embora não atinja os valores de resistência do eucalipto e do ipê, a seringueira apresenta vantagens em termos de estabilidade dimensional e trabalhabilidade, conforme verificado em estudos complementares (NPQM, 2025).

3.7. Considerações sobre a Variação Clonal

A diferença significativa entre os clones estudados, com o Clone 2 apresentando valores superiores em todas as propriedades mecânicas, reforça a importância da seleção de materiais genéticos para o aproveitamento madeireiro da seringueira. Esta variação clonal pode ser atribuída a diferenças genéticas na estrutura anatômica da madeira, na densidade e na orientação das fibras (Gonçalves et al., 2006).

É importante ressaltar que as diferenças clonais observadas neste estudo podem ter sido influenciadas pelas condições específicas de cultivo em consórcio com cacau. Estudos adicionais são necessários para avaliar a interação entre genótipo, ambiente e manejo na qualidade da madeira de seringueira.

4. CONCLUSÕES

A avaliação das propriedades mecânicas da madeira de Hevea brasiliensis de dois clones cultivados em consórcio com cacau no sul da Bahia revelou que a espécie apresenta resistência mecânica compatível com aplicações na indústria moveleira, na fabricação de painéis e em estruturas leves. Os valores posicionam a madeira na categoria de média resistência, comparável ou superior ao pinus, embora inferior ao eucalipto e ao ipê. A análise estatística por ANOVA confirmou diferenças significativas ($p < 0,05$) entre os clones em todas as propriedades avaliadas, com o Clone 2 apresentando desempenho superior ao Clone 1 em todos os parâmetros discutidos. Essa variação clonal evidencia a importância de se conhecer as caracteristicas de qualidade da madeira para o direcionamento de diferentes finalidades, como o Clone 2 por exemplo sendo mais indicado para aplicações que demandam maior resistência mecânica. Os resultados obtidos estão em consonância com a literatura para a espécie e demonstram que a madeira de seringueira de sistemas consorciados, mesmo sem

ter sido conduzida com manejo específico para produção madeireira, atinge propriedades mecânicas que viabilizam seu aproveitamento comercial. Dessa forma, a utilização da madeira de seringueira como subproduto dos sistemas agroflorestais com cacau configura-se como estratégia sustentável para a otimização do uso da terra, a geração de renda adicional para os produtores e a redução da pressão sobre florestas nativas, alinhando-se aos princípios do manejo florestal sustentável e da economia de baixo carbono.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Agrícola Cantagalo Ltda. e à Symbiosis Investimentos e Participações S.A. pelo fornecimento do material, financiamento e apoio logístico. Ao Núcleo de Pesquisa em Qualidade da Madeira (NPQM) do Departamento de Produtos Florestais da UFRRJ pelo suporte técnico e infraestrutura. A todos os membros da equipe de pesquisa que contribuíram com as atividades de campo e laboratoriais. Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro (FAPERJ) e à Fundação de Apoio a Pesquisa da Univervisade Rural (FAPUR) pelo apoio institucional.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7190: Projeto de estruturas de madeira. Rio de Janeiro, 1997; Atualizada em 2022.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM D143: Standard test methods for small clear specimens of timber. West Conshohocken, 2021.

CARVALHO, J. E. Políticas públicas para a seringueira no Brasil. São Paulo: EdUFSCar, 2021.

GONÇALVES, P. de S. et al. Anatomical characteristics of rubber tree clones. Scientia Agricola, v. 63, n. 1, p. 52-58, 2006.

INTERNATIONAL TROPICAL TIMBER ORGANIZATION (ITTO). Annual Review of Rubberwood Markets. Yokohama, 2023.

KILLMANN, W.; HONG, L. T. Rubberwood – The success of an agricultural by-product. Unasylva, v. 51, n. 200, p. 66-72, 2000.

LIMA, J. T. et al. Propriedades mecânicas da madeira de seringueira em monocultivos. Floresta, v. 52, n. 2, p. 345-356, 2022.

LOBÃO, M. S.; LÚCIA, R. M. D.; MOREIRA, M. S. S.; GOMES, A. Caracterização das propriedades físico-mecânicas da madeira de eucalipto com diferentes densidades. Árvore, v. 28, n. 6, p. 889-894, 2004. https://doi.org/10.1590/S0100-67622004000600014

PEREIRA, B. L. C. Resistência à flexão em madeiras tropicais. Cerne, v. 27, n. 3, p. 412-420, 2021.

PEREIRA, B. L. C. et al. Propriedades mecânicas da madeira de seringueira em Mato Grosso. Floresta e Ambiente, v. 27, n. 4, p. 1-12, 2020.

RAO, K. S. et al. Wood properties of rubberwood (Hevea brasiliensis). IAWA Journal, v. 11, n. 3, p. 235-243, 1990.

SANTOS, M. A. Ciclo da borracha na Amazônia: história e impactos. Manaus: EDUA, 2020.

SILVA, M. P.; VALLE, M. L. A. Sustentabilidade agroflorestal: Avaliação das propriedades físicas da madeira de Hevea brasiliensis clone SIAL 1005. In: VI CBCTEM – Congresso Brasileiro de Ciência e Tecnologia da Madeira. Anais. Pelotas, 2024.

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

1279. QUALIDADE DA MADEIRA E O IMPACTO NA PRODUÇÃO DE POLPA KRAFT

Cristian Calazans Cruz da Conceição*[1]; Nilton Louvem da Silva Júnior[1]; Larisse Aparecida Ribas Batalha[1]; Fernando José Borges Gomes[1]; Roberto Carlos Costa Lelis[1]; Claudia Marcia Gomes[1]

[1] Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro

Resumo: O Brasil destaca-se como um dos maiores produtores mundiais de celulose, tendo o *Eucalyptus* spp. como principal matéria-prima. A qualidade da madeira e a produtividade florestal influenciam diretamente o desempenho industrial e os custos de produção. Este trabalho avaliou os impactos dessas características sobre a polpação kraft, o branqueamento e o planejamento florestal de três clones comerciais de *Eucalyptus* spp. Os clones apresentaram relações S/G (mol/mol) de 4,9, 3,2 e 2,1 e rendimentos depurados de 54,8%, 53,1% e 51,2%, respectivamente. O Clone 1 apresentou melhor desempenho na polpação e um menor consumo de reagentes no branqueamento, enquanto o Clone 2, devido ao maior incremento médio anual (41,2 $m^3\ ha^{-1}\ ano^{-1}$), apresentou o menor custo global estimado de produção. Os resultados demonstram que a seleção de materiais genéticos para produção de celulose deve integrar produtividade florestal e qualidade química da madeira, visando conciliar eficiência industrial e redução dos custos de produção.

Palavras-chave: Polpação kraft; Qualidade da madeira; Produção florestal.

1280. WOOD QUALITY AND ITS IMPACT ON KRAFT PULP PRODUCTION

1281.

Abstract:. Brazil stands out as one of the world's leading pulp producers, with *Eucalyptus* spp. as its main raw material. Wood quality and forest productivity directly influence industrial performance and production costs. This study evaluated the impacts of these characteristics on kraft pulping, bleaching, and forest planning for three commercial *Eucalyptus* clones. The clones showed S/G ratios of 4.9, 3.2, and 2.1 and screened pulp yields of 54.8%, 53.1%, and 51.2%, respectively. Clone 1 showed the best pulping performance and the lowest bleaching chemical consumption, whereas Clone 2, due to its higher mean annual increment (41.2 $m^3\ ha^{-1}\ year^{-1}$), resulted in the lowest estimated overall production cost. These results demonstrate that selecting genetic materials for pulp production should integrate forest productivity and wood chemical quality to achieve a balance between industrial efficiency and reduced production costs.

Keywords: Kraft pulping; Wood quality; Forest production.

1. Introdução

A indústria brasileira de celulose e papel consolidou-se como uma das mais competitivas e importantes no mundo, produzindo e exportando mais de 20 milhões de toneladas de polpa celulósica branqueada somente em 2025, resultando em um faturamento de US$ 15 bilhões (IBA, 2026). A principal matéria-prima utilizada são as árvores do gênero *Eucalyptus spp*., devido ao seu rápido crescimento e alta produtividade no cenário nacional, quando se comparadas às madeiras do gênero *Pinus spp.* (Costa et al., 2022).

Ao longo dos anos, a indústria de celulose e papel vem buscando florestas altamente produtivas e de menores custos logísticos. Com o passar das décadas, os estudos de hibridação, clonagem e da qualidade da madeira foram aperfeiçoados e geraram um aumento de produtividade nas culturas (Assis et al., 2014). Uma das

principais maneiras de contabilizar a produtividade anual das culturas é utilizando o incremento médio anual (IMA) e o incremento médio anual de celulose (IMACel), que correspondem ao incremento anual do volume total por hectare e o incremento anual do volume de celulose por hectare, respectivamente (Santos et al., 2020).

As características anatômicas, físicas e químicas da madeira exercem influência direta sobre a eficiência da produção de celulose kraft, afetando tanto a produtividade florestal, por meio da densidade básica e do incremento médio anual (IMA), quanto o desempenho industrial, principalmente em relação ao rendimento depurado, consumo de reagentes, grau de deslignificação e qualidade da polpa produzida, consequentemente,

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

afetando o custo dos processos fabris (Wang et al., 2024; Rodrigues et al., 2022). Além do IMA, outra

Em decorrência da grande influência das características qualitativas da madeira no cenário fabril e industrial de celulose e papel, esse trabalho teve como objetivo simular e avaliar o quanto que a lignina e o incremento médio anual (IMA), podem impactar logística e financeiramente uma fábrica de polpa celulósica Kraft branqueada (BHKP), observando desde o planejamento florestal até os processos de polpação e branqueamento.

2. Material e métodos

Três clones de eucalipto (Clone 1, 2 e 3), com idade média de 7 anos e distinta composição química (Tabela 2) foram selecionados, cavaqueados e analisados quimicamente no Laboratório de Biorrefinaria Lignocelulósica (LBL). O processo de polpação kraft e branqueamento livre de cloro elementar (ECF) foi realizado de acordo com as normas TAPPI T200 sp, TAPPI T236 om-06 e seguindo os parâmetros apresentados na Tabela 1, com o objetivo de atingir alvura de 90% ISO. Com os resultados obtidos, foram realizados cálculos para uma simulação fabril de 6000 adt/dia, avaliando desde o planejamento florestal até o produto branqueado.

2.1. Padronização das amostras

As amostras foram deslignificadas para um Kappa 18. Para cálculos de estimativa de impacto fabril, foi considerada a produtividade diária de 6000 toneladas secas ao ar (adt), simulando-se uma operação fabril de 350 dias/ano e raio de transporte de 250 km, considerando o transporte realizados por carreta bitrem com o Km rodado custando R$ 0,50 e com 65 m^3 de carga máxima. Para a transformação da madeira em cavacos, utilizou-se uma eficiência de picagem de 90%.

2.2. Planejamento florestal

Baseando-se nos componentes da equação (1), foram calculados o consumo específico de madeira (m^3/adt), o consumo específico por hectare e por ano (m^3/adt/ha/ano), bem como o volume de madeira necessário para a produção de 6000 adt de celulose. Os cálculos de plantio foram realizados de acordo com a equação (4), adotando um espaçamento 3x2m com 20% de mudas para reposição e o custo unitário

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

de R$ 0,70 por planta.

2.3. Branqueamento

Utilizando a tecnologia livre de Cloro Elementar (ECF), a polpa marrom obtida a partir de cada clone passou pelo processo de branqueamento, com uma consistência de 10% em todas as etapas (Tabela 1). No final, obteve-se a quantidade de CAT/Kg/adt e o custo total com reagentes. O custo por tonelada foi feito a partir do resultado das quantias de ClO_2 e H_2O_2 utilizadas, extrapolando para 6000 adt.

Tabela 1 – Parâmetros utilizados no branqueamento

Parâmetros	O	D*	(EP)	D	P
Consistência, %	10	10	10	10	10
Temperatura, °C	100	90	95	90	90
Pressão, kPa	730	-	-	-	-

Tempo, min.	60	90	90	90	60
pH final	11,0–11,7	3	10,5–11,0	5,0–5,5	10,0–10,5
Fator Kappa	-	0,18	-	-	-
Dosagem de dióxido de ClO_2, %	-	-	-	0,3–1,2	-
Dosagem de H_2O_2, %	-	-	0,4	-	0,2
Dosagem de O_2, %	2	-	-	-	-
Dosagem de NaOH, %	1,4–2,7	-	1,0	0,1–0,3	0,5
Dosagem de H_2SO_4, %	-	0,2–0,6	-	-	-

2.4. Performance dos materiais genéticos para a produção de polpa celulósica

O consumo específico de madeira, expresso em metros cúbicos por tonelada absolutamente seca de celulose (m^3 ADT^{-1}), foi calculado pela razão entre o fator de rendimento da madeira e o produto da densidade básica da madeira pelo rendimento depurado da polpação kraft, conforme a equação a seguir:

$$CE = \frac{1000}{DB \times RD} \quad (1)$$

em que:

CE = consumo específico de madeira (m^3/ADT).

DB = densidade básica (kg/m^3).

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

RD = rendimento depurado da polpação kraft.

O IMAcel corresponde à produtividade anual de celulose por unidade de área, sendo obtido pela razão entre o incremento médio anual volumétrico (IMA) e o consumo específico de madeira (CE), conforme a equação a seguir:

$$IMACel = \frac{IMA}{CE} \quad (2)$$

em que:

IMA = incremento médio anual ($m^3\ ha^{-1}\ ano^{-1}$);

CE = consumo específico de madeira ($m^3\ ADT^{-1}$);

IMAcel = incremento médio anual em celulose ($ADT\ ha^{-1}\ ano^{-1}$).

$$P_a = P_d \times D \quad (3)$$

em que:

Pa = produção anual.

Pd = produção diária.

D = dias de operação por ano

$$A = \frac{P_a}{IMACE} \quad (4)$$

em que:

A = Área de plantio (ha)

Através da produção anual (3), foi possível calcular a área de plantio para a simulação (4) em hectares e extrapolar o número de plantas por hectare para o total da população. Com isso, chegou-se nos volumes diários, anuais e para o ciclo de 7 anos. O transporte levou em consideração o volume por dia, obtendo assim os custos por dia, ano e ciclo.

Após as análises, as etapas da polpação, do branqueamento e do planejamento florestal foram avaliadas e comparadas, buscando encontrar o clone com melhor performance e menor gasto total, considerando-se o custo com logística, reagentes e estruturação.

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

3. Resultados e discussão

3.1. Análise química e física

As análises foram realizadas utilizando diferentes normas já mencionadas anteriormente, e resultou nos seguintes valores:

Tabela 2 – Composição química dos clones

Composição	Clone 1	Clone 2	Clone 3
Relação S/G da lignina S/G, mol/mol	4,9	3,2	2,1
Lignina Total, %	25,6	28,8	29,9
Glicanas, %	47,1	46,8	46,6
Xilanas, %	14,7	12,6	11,5
Mananas, %	1,7	1,2	0,8
Extrativos totais, %	2,5	3,1	3,7
Minerais, %	0,34	0,49	0,61
Densidade, kg/m^3	510	495	523
IMA, m^3/ha/ano	21,2	41,2	17,6

3.2. Rendimento polpação

O processo de polpação Kraft nas amostras resultou em diferentes valores de rendimento depurado, sendo estes utilizados para o futuro cálculo de consumo específico. Sendo eles: 54,8% para o clone 1; 53,1% para o clone 2 e 51,2% para o clone 3. Os clones 1 e 2 apresentaram valores que estão dentro da faixa observada na literatura para clones de *Eucalyptus spp*, (Fernandes et al., 2025), porém o clone 3 teve um rendimento ligeiramente abaixo do esperado.

As amostras com maiores porcentagens de xilanas, glicanas e mananas, e menores concentrações de minerais, extrativos totais e lignina total, tiveram melhor performance no processo, indicando que materiais com essas características podem melhorar os resultados (Barbosa et al., 2016). A presença de lignina total em menores quantidades e maiores valores de relação S/G tendem a resultar em um maior rendimento de polpa, pois estes fatores contribuem para uma mais rápida e eficiente deslignificação (Gomide et al., 2010).

3.3. Consumo de reagentes no branqueamento

Com a realização da etapa de branqueamento das polpas Kraft, foi possível obter os percentuais de cloro ativo total (CAT) por clone, os custos correspondentes (Tabela 3).

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Tabela 3 – Demandas e custos de CAT por clone avaliado

Clones	Necessidade (Kg/ADT)	Custo (R$, milhões/ano)
1	40,5	272
2	42,6	282
3	43,9	293

O clone 1 utilizou cerca de 10,13 kg ClO_2/adt e 4,50 kg H_2O_2/adt resultando em um custo médio de R$ 116,18/tonelada de polpa e R$ 13,74/tonelada de polpa e economia de 3,5% e 7,7% quando se comparado aos clones 2 e 3, respectivamente. Esses valores são compatíveis com aqueles reportados na indústria, e mostram que o primeiro clone possuiu um branqueamento mais eficiente, reduzindo o custo com reagentes e diminuindo a geração de efluentes (Carvalho et al., 2015).

3.4. Planejamento florestal

A etapa de planejamento levou em consideração os valores obtidos no rendimento de polpação e as informações das características químicas. Os cálculos foram realizados utilizando como base as Equações (1), (2), (3) e (4), resultando nos valores disponíveis abaixo (Tabela 4).

Tabela 4 – IMAcel e custo anual com plantio

Clones	IMAcel (m^3/adt/ha/ano)	Custo (R$, milhões)
1	6,52	114

2	12,03	88
3	5,25	132

Com o IMAcel de cada clone, foi possível realizar a projeção para o suprimento inicial de 6000 adt/dia. No espaçamento 3:2, o total de plantas por hectare alcançado foi de 1667, resultando em cerca de 600 milhões de mudas para o clone 1 ao longo do ciclo de 7 anos, 300 milhões de mudas para o clone 2, e 800 milhões de mudas para o clone 3. Isso resultou em um gasto de R$ 450 milhões para o clone 1, R$ 240 milhões para o clone 2, e R$ 560 milhões para o clone 3, apenas com o plantio. Isso mostrou que um menor custo unitário está diretamente relacionado com uma maior produtividade florestal média, pois estas demandam menos área e custos fixos relacionados ao processamento do material.

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Para o transporte, estimou-se uma necessidade de 398 carretas/dia para o primeiro clone, 418 carretas/dia para o segundo clone e 408 carretas/dia para o terceiro clone, resultando em um custo de R$ 34 milhões/ano em carretas para o clone 1, R$ 36 milhões/ano para o clone 2 e R$ 35 milhões/ano para o clone 3, considerando 2 viagens por dia. Esses valores representam cerca de 7% a 8% do custo total da produção, contando todas as etapas, e são compatíveis com os reportados na literatura (McKinsey & Company, 2026).

3.5. Impactos econômico

As amostras resultaram em diferentes valores e padrões nos rendimentos de polpação e branqueamento, isso ocorreu devido ao percentual de lignina apresentada em cada material, que tem ligação direta com o processo e a eficiência do branqueamento (Gomide et al., 2010). O clone 1 apresentou melhores rendimentos de depuração e branqueamento, resultando em menor custo com reagentes. No entanto, o clone 2 levou vantagem financeira quando se foi observado todo o processo fabril, desde o plantio até o armazenamento da polpa celulósica branqueada (Tabela 5).

Tabela 5 – Custos anuais de produção de polpa celulósica por clone avaliado.

Clone 1	Clone 2	Clone 3
R$ 406.000.000	R$ 390.000.000	R$ 443.000.000

A diferença nos valores se deu principalmente por causa da etapa de plantio e transporte, na qual o clone 2 teve uma necessidade de 71 hectares/dia de plantio, enquanto o clone 1 de 131 hectares/dia, e o clone 3 de 163 hectares/dia. Nesses casos, a característica de maior influência foi o elevado IMA do clone 2, que geraria mais m^3/ha^{-1} de madeira e celulose, demandando uma área menor e barateando o processo industrial.

4. Conclusões

As características químicas da madeira exerceram influência significativa sobre custos estimados de produção de celulose. Clones de maior produtividade tiveram menores custos logísticos e florestais, enquanto altos valores de relação S/G e xilana tenderam a melhores rendimentos depurados e branqueados e menores consumos de reagentes.

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Esses resultados indicam que o desempenho ideal para a produção de celulose kraft branqueada é alcançado por materiais genéticos que conciliem elevada produtividade florestal com características químicas favoráveis, promovendo simultaneamente ganhos em rendimento e redução dos custos logísticos.

5. Agradecimentos

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), na modalidade ITI-MAI-DAI, com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES). Além disso, gostaríamos de agradecer à Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (UFRRJ) e ao Laboratório de Biorrefinaria Lignocelulósica (LBL).

6. Referências bibliográficas

1. Alves, I. C. N., Gomide, J. L., Colodette, J. L., & Silva, H. D. da. (2011). Caracterização tecnológica da madeira de *Eucalyptus benthamii* para produção de celulose kraft. *Ciência Florestal, 21*(1), 167–174. https://doi.org/10.5902/198050982759
2. Assis, T. F., Resende, M. D. V., Grattapaglia, D., & Pires, I. E. (2014). Genética e melhoramento do eucalipto. In A. B. do Vale, C. C. Machado, J. M. Machado Filho, M. B. Vilar, C. B. Costa, & A. P. Nacif (Eds.), *Eucaliptocultura no Brasil: Silvicultura, manejo e ambiência* (pp. 103–119). Sociedade de Investigações Florestais.
3. Barbosa, B. M., Colodette, J. L., Muguet, M. C. dos S., Gomes, V. J., & Oliveira, R. C. (2016). Effects of xylan in eucalyptus pulp production. *CERNE, 22*(2), 207–214. https://doi.org/10.1590/01047760201622022102
4. Carvalho, D. M. de, Silva, M. R. da, & Colodette, J. L. (2015). Estudo da branqueabilidade da polpa kraft de eucalipto. *Ciência Florestal, 25*(1), 185–197. https://doi.org/10.5902/1980509817476
5. Costa, M. M., Nogueira, T. A. P. C., Bittencourt, R. C., da Silva, W. H. M., Soares, L., de Almeida, R. F., dos Santos, G. A., & Pena, C. A. A. (2022). Avaliação comparativa do desempenho industrial para produção de polpa celulósica entre eucalipto e híbridos de *Corymbia*. *Revista Árvore, 46*(1), e4628. https://doi.org/10.1590/1806-908820220000028
6. Fernandes, M. A. M., Nörnberg, L. V., Santos, O. P., Pimentel, N., Quevedo, F. F., Cardoso, G. V., & Moreira, M. L. (2025). Qualidade da madeira de híbridos de *Corymbia* para a produção de celulose kraft. *Ciência Florestal, 35*, e87028. https://doi.org/10.5902/1980509887028
7. Gomide, J. L., Fantuzzi Neto, H., & Regazzi, A. J. (2010). Análise de critérios de qualidade da madeira de eucalipto para produção de celulose kraft. *Revista Árvore, 34*(2), 339–344.
8. Indústria Brasileira de Árvores. (2026, 24 de março). *Brasil bate recorde de produção e exportação de celulose em 2025*. https://iba.org/comunicacao/brasil-bate-recorde-de-producao-e-exportacao-de-celulose-em-2025/

9. McKinsey & Company. (2026). *Resetting cost competitiveness in pulp and paper packaging*. https://www.mckinsey.com/industries/packaging-and-paper/our-insights/resetting-cost-competitiveness-in-pulp-and-paper-packaging
10. Rodrigues, B. P., Oliveira, J. T. S., Demuner, B. J., Mafia, R. G., & Vidaurre, G. B. (2022). Chemical and kraft pulping properties of young eucalypt trees affected by physiological disorders. *Forests*, *13*(4), 504. https://doi.org/10.3390/f13040504
11. Wang, Y., Xue, D., Zhuo, J., & Xiang, Z. (2024). Optimizing hemicelluloses pre-extraction in eucalyptus kraft pulping: A pathway towards enhancing pulp mill biorefineries. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, *70*, 162–172. https://doi.org/10.1016/j.cjche.2024.03.017

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Qualidade do carvão vegetal de raízes e galhos de eucalipto sob diferentes temperaturas de carbonização

Anna Júlia Leite de Oliveira[1]; Dalton Longue Júnior[1]; Camila Cristina Simão da Silva[1]; Rafaella Dias Ramos[1]

[1] Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia

Resumo: O Brasil lidera a produção e o consumo mundial de carvão vegetal, produzido principalmente a partir de *Eucalyptus spp.*, com produção anual de 6,6 milhões de toneladas destinada, sobretudo, à siderurgia. Embora o tronco seja a principal matéria-prima, a busca por maior aproveitamento dos recursos florestais tem incentivado o uso de resíduos, como galhos e raízes, normalmente descartados. Este estudo teve como objetivo avaliar o efeito da temperatura de carbonização sobre o rendimento e a qualidade do carvão vegetal produzido a partir desses resíduos. Os cinco materiais genéticos estudados foram carbonizados em forno mufla a 300 e 450 °C por 4 horas. Avaliaram-se o rendimento gravimétrico, a densidade aparente e o teor de carbono fixo do carvão vegetal. O aumento da temperatura reduziu o rendimento gravimétrico, elevou o teor de carbono fixo e promoveu pouca variação na densidade aparente. Os carvões produzidos a partir das raízes apresentaram comportamento semelhante aos obtidos dos troncos, enquanto os resultados provenientes de galhos mostraram maior densidade básica e densidade aparente em relação aos demais.

Palavras-chave: Biomassa; Carbonização; Resíduos florestais.

Quality of Charcoal Produced from Eucalyptus Roots and Branches under Different Carbonization Temperatures

Abstract: Brazil leads the global production and consumption of charcoal, produced mainly from *Eucalyptus* spp., with an annual production of 6.6 million tons, primarily destined for the steel industry. Although the stem is the main raw material, the search for more efficient use of forest resources has encouraged the utilization of forest residues, such as branches and roots, which are usually discarded. This study aimed to evaluate the effect of carbonization temperature on the yield and quality of charcoal produced from these residues. The materials were carbonized in a muffle furnace at 300 and 450 °C for 4 hours. Gravimetric yield, apparent density, and fixed carbon content were evaluated. Increasing the carbonization temperature reduced the gravimetric yield, increased the fixed carbon content, and caused only slight changes in the apparent density. Charcoal produced from roots showed behavior similar to that obtained from stems, whereas while the results from branches showed higher basic density and apparent density compared to the others.

Keywords: Biomass; Carbonization; Forestry residues.

1. Introdução

O Brasil lidera a produção e o consumo global de carvão vegetal, com 6,6 milhões de toneladas anuais oriundas de florestas plantadas. Esse destaque deve-se ao uso do insumo na redução do minério de ferro para a produção de ferro-gusa e aço. Para suprir a demanda, o setor siderúrgico investe em cultivos próprios e parcerias, fortalecendo a atividade florestal nacional (IBÁ, 2025).

O gênero *Eucalyptus* destaca-se pelo rápido crescimento, produtividade e adaptação edafoclimática. Aliadas ao melhoramento genético e à clonagem, essas características garantem madeira uniforme e de alta qualidade para a carbonização (Trugilho et al., 2001; Trugilho et al., 2011; Protásio et al., 2021; Pereira et al., 2024; Ramos, 2025). Além de sua relevância estratégica na bioeconomia e na geração de energia renovável (Cardoso, 2012; Adeodato et al., 2017), o eucalipto também é fundamental para as indústrias de celulose, papel, serraria e painéis.

Desta forma, a qualidade do carvão vegetal depende da matéria-prima de origem e das condições de carbonização, sendo a temperatura final uma das principais variáveis associadas às transformações físicas e químicas que ocorrem durante a pirólise. Segundo Protásio et al. (2021), esse processo decompõe termicamente as hemiceluloses, celulose e lignina, gerando carvão, líquidos e gases. Assim, o controle térmico rigoroso é vital para a eficiência do processo e a uniformidade do produto, evitando a heterogeneidade causada por oscilações de temperatura no forno.

A temperatura final de carbonização impacta diretamente o rendimento e as propriedades do carvão. O aumento térmico reduz o rendimento gravimétrico pela degradação da biomassa, mas eleva o carbono fixo e reduz os voláteis, otimizando a estabilidade e o desempenho energético (Trugilho et al., 2011). Vieira et al. (2013) também destacam que o controle térmico é um parâmetro determinante para a distribuição dos produtos da carbonização e para a qualidade do carvão vegetal, melhorando a sustentabilidade dos processos.

Por isso, apesar do uso tradicional do tronco, a colheita e o manejo geram volumes expressivos de galhos e raízes que, normalmente, permanecem no campo após a colheita. O aproveitamento energético desses resíduos amplia a eficiência da biomassa, reduz desperdícios e agrega valor à cadeia produtiva, promovendo um manejo florestal mais sustentável (Rodrigues et al., 2019).

Dessa forma, o objetivo deste trabalho foi avaliar o efeito da temperatura de carbonização sobre o rendimento e as propriedades físicas e químicas do carvão vegetal produzido a partir de galhos e raízes de diferentes materiais genéticos de Eucalyptus, visando

verificar o potencial das biomassas residuais e dos carvões vegetais produzidos como fonte renovável de energia e outras aplicações industriais.

2. Material e métodos

Os indivíduos foram coletados em Vitória da Conquista, na região Sudoeste da Bahia (14°49'42.66"S; 40°59'8.75"O), onde o município apresenta relevo plano a suavemente ondulado, altitude entre 857 e 1.000 m, clima tropical de altitude (Cwb), temperatura média de 21 °C e precipitação média de 700 mm.

Foram coletados e avaliados resíduos florestais de cinco materiais de *Eucalyptus spp.*: *Eucalyptus urophylla* produzido via seminal, I-144 (*Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis*), 1404 (*Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis*), 1355 *(Eucalyptus urophylla x Eucalyptus grandis*) e VM058 (*Eucalyptus camaldulensis x Eucalyptus grandis*). Foram colhidas 15 árvores de cada material, totalizando 75 árvores, onde foram separadas as seções de troncos, galhos e raízes. Todas as biomassas foram descascadas, cortadas em pedaços menores de aproximadamente 5 x 5 x 5 cm e misturados, formando uma amostra composta. O excesso de solo e partículas minerais foram removidos, visando a limpeza, homogeneização e padronização das amostras.

As carbonizações foram realizadas em triplicata, em forno elétrico tipo mufla, com taxa de aquecimento controlada de 1,7 °C/minuto, partindo de 100 °C até as temperaturas finais de 300°C e 450 °C, mantida por 4 horas..

O experimento foi conduzido em delineamento inteiramente casualizado, em esquema fatorial 5 × 3 × 2, constituído por cinco materiais genéticos de *Eucalyptus*, três tipos de biomassa (tronco, galhos e raízes) e duas temperaturas finais de carbonização (300 e 450 °C), com três repetições, totalizando 90 unidades amostrais (carvões). Os dados foram submetidos à análise estatística descritiva, sendo calculadas as médias e os desvios-padrão para cada tratamento avaliado.

A densidade básica da madeira foi determinada pelo método de imersão em água e balança hidrostática, conforme a NBR-11941 (ABNT, 2003); o rendimento gravimétrico do carvão foi calculado pela relação entre a massa final de carvão e a massa inicial de madeira seca; a densidade aparente do carvão vegetal foi obtida de acordo com a NBR-9165 (ABNT, 1985); o teor de carbono fixo foi obtido a partir da análise química imediata do carvão vegetal, e seguiu a NBR-8112 (ABNT, 1986), com trituração e classificação das amostras em peneiras de 40-60 mesh, segundo técnicas de amostragem para carvão vegetal da NBR-6923 (ABNT, 1981).

3. Resultados e discussão

A densidade básica da madeira apresentou um padrão consistente no qual, em quatro dos cinco materiais, os galhos tiveram valores superiores até aproximadamente 10%, enquanto os troncos mostraram desempenho semelhante ao das raízes. A exceção foi apresentada pelo material *E. urophylla* - seminal, no qual o padrão "galho > tronco ≥ raiz" não se confirmou, devido à maior heterogeneidade anatômica e comportamento físico-químico padrão de materiais não clonais (Sbardella, 2020). Em conjunto, esses resultados são compatíveis com a maior fração de parede celular em galhos finos e com a possibilidade de raízes mais maduras exibirem densidade igual ou superior ao tronco, dependendo do grau de lignificação e da distribuição de tecidos condutores e de parênquima (Rusch, 2019).

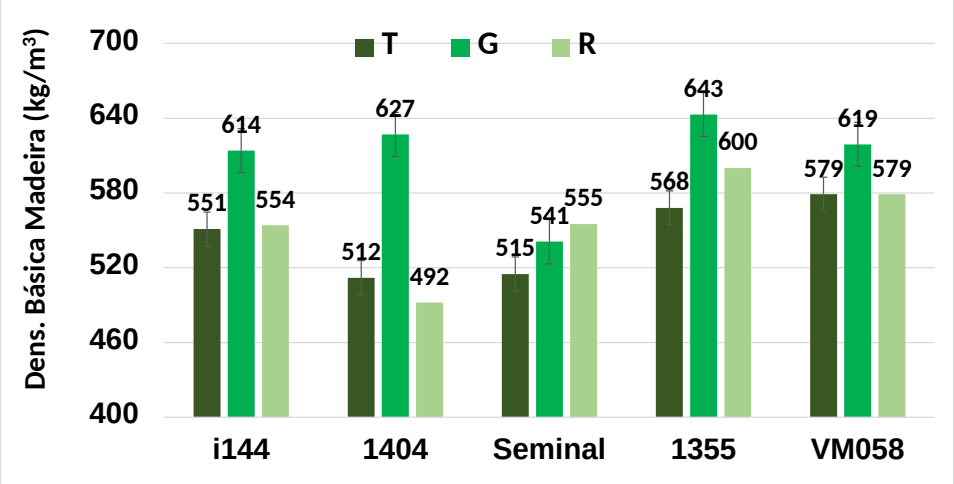


Figura 1 – Densidade básica do tronco (T) e dos resíduos galhos (G) e raízes (R) dos materiais de eucaliptos cultivados na região Sudoeste da Bahia.

O rendimento gravimétrico dos resíduos a 300 °C variou entre 32,7% e 39,7%, superiores aos valores encontrados nas carbonizações realizadas a 450 °C, em que os rendimentos dos resíduos variaram entre 27,8% e 34,5%. Esses resultados demonstram uma intensificação da degradação de celulose e a continuidade da transformação da lignina, reduzindo o rendimento em relação a 300 °C, sugerindo que diferenças na composição das matérias-primas podem ter contribuído para o comportamento observado (Marabezi, 2009).

Observou-se equivalência entre tronco e raiz em quatro dos cinco materiais, com uma exceção notável no clone 1355 a 300 °C, no qual o rendimento da raiz foi inferior ao de galhos e troncos. Essa maior similaridade dos resultados entre tronco e raiz em 300 °C é coerente com a dominância das transformações térmicas de hemiceluloses e do início da degradação de celulose

amorfa, com menor contribuição da lignina nessa faixa (Trugilho et al., 2001; Marabezi, 2009; Batista, 2021; Oliveira, 2025). A menor resposta das raízes do 1355 pode refletir maior fração de hemiceluloses e/ou efeito catalítico de minerais alcalinos presentes, os quais antecipam a volatilização da massa de madeira e reduzem o rendimento inicial (Soares et al., 2014; Silva, 2019).

Na maior temperatura (450 °C), os rendimentos em raízes superaram os de troncos e galhos, com destaque para o material VM058, no qual as raízes foram consideravelmente superiores, com valor de 34,5%. Esse comportamento sugere maior contribuição da lignina para a retenção de massa do carvão e uma cinética menos propensa a perdas secundárias nesse compartimento, sob temperatura mais elevada, a partir de uma maior degradação térmica em troncos do que raízes (Oliveira, 2025). Em contraste, os galhos mantiveram os menores rendimentos também nessa condição, entre 27,8% e 29,3%, compatível com sua maior área específica e aquecimento mais rápido, que favorecem a volatilização, perda de rendimento e a formação de produtos voláteis (Protásio et al., 2021; Oliveira et al., 2024).

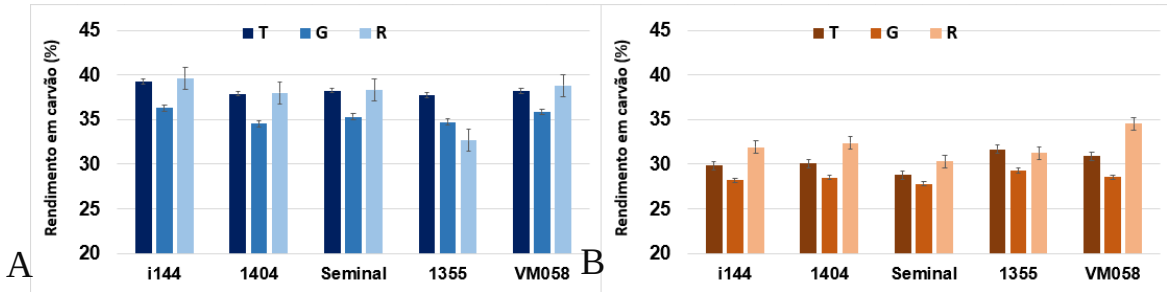


Figura 2 – Rendimento da carbonização dos diferentes resíduos (tronco, galhos e raízes) dos clones de eucalipto em temperaturas finais de A) 300 °C e B) 450 °C.

A densidade aparente do carvão obtido a 300 °C apresentou valores aproximadamente 22% menores nas raízes e maiores nos galhos, com o tronco exibindo comportamento intermediário e variável entre materiais (1404 e 1355). Nessa temperatura, em que a aromatização da madeira e seus compostos, como extrativos, ainda é inicial, a densidade aparente resulta do balanço entre densidade básica inicial da madeira, colapso térmico da parede celular e configuração lignocelulósica de resistência (Soares et al., 2014; Oliveira, 2025).

O maior valor de densidade nos galhos é compatível com estrutura mais compacta e degradação moderada, enquanto o menor valor nas raízes sugere maior suscetibilidade a microfissuração e colapso anisotrópico no estágio inicial da pirólise, reduzindo a compactação volumétrica do carvão (Protásio et al., 2021). Essa resposta heterogênea dos troncos entre

clones indica que pequenas diferenças anatômicas e de volatilização da massa de madeira se manifestam de forma diferente em um regime térmico semelhante (Guimarães, 2021; Oliveira, 2025).

A densidade aparente do carvão do resíduo de galhos foi superior aos demais resíduos avaliados, tanto na temperatura de 300 quanto na temperatura de 450 °C. Da mesma forma do rendimento, a densidade aparente de troncos e raízes foram mais próximas, indicando uma maior volatilização e a reorganização estrutural, de modo que matérias-primas com maior densidade básica e arquitetura propícia à compactação geram carvões mais densos (Trugilho et al. 2001; Protásio et al. 2021).

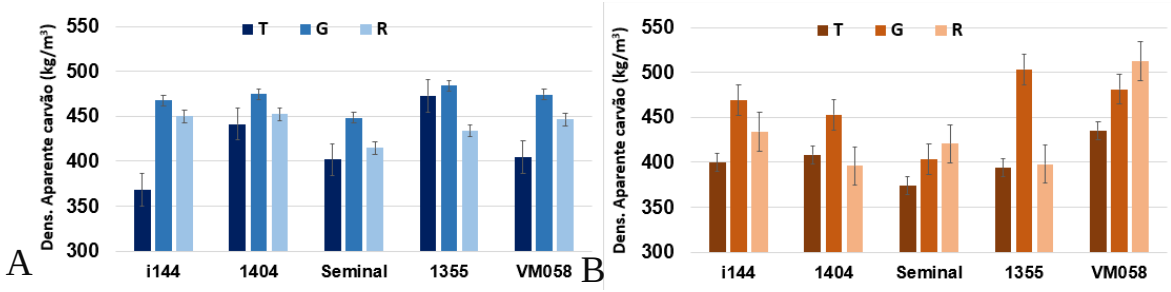


Figura 3 – Densidade aparente dos carvões de diferentes resíduos (tronco, galhos e raízes) dos clones de eucalipto em temperaturas finais de A) 300 °C e B) 450 °C.

Por fim, os teores de carbono fixo dos carvões produzidos a 300 °C foram inferiores aos teores de carbono fixo dos carvões gerados a 450 °C. Esse comportamento é contrário ao observado nos rendimentos, em que carvões de maior rendimento apresentam menores teores de carbono fixo.

Os teores de carbono fixo mantiveram-se, em geral, em patamares médios e próximos entre os resíduos na maioria dos materiais, refletindo a etapa inicial da pirólise a esta temperatura, em que ainda persiste parcela substancial de voláteis na matriz do carvão (Soares et al., 2014). A exceção foi observada no clone 1355, com carbono fixo de 74,6% a 450 °C, maior dos que obtidos pelo tronco e raízes, 66,5% e 67,0%, respectivamente, sinalizando maior contribuição relativa de lignina e/ou de volatilização inicial mais efetiva em frações menores neste patamar térmico (Vale et al., 2001; Marabezi, 2009; Soares et al., 2014).

Em contraste, o material seminal exibiu o menor carbono fixo, possivelmente associada à maior heterogeneidade anatômica e química comum a esses materiais e com retenção relativamente maior de espécies oxigenadas e hidrogenadas, as quais deprimem o percentual de carbono fixo nessa condição (Figueiredo et al., 2018). Esses resultados são coerentes com a

dominância, nesse intervalo, das transformações de hemiceluloses e do início da degradação de celulose, e, portanto, com diferenças entre materiais atenuadas e fortemente moduladas pela composição de base e pela distribuição de extrativos e minerais (Pereira et al., 2024).

Os carvões produzidos a 450 °C apresentaram maior homogeneidade dos resultados entre os diferentes resíduos, demonstrando o efeito da temperatura final da carbonização na uniformidade da composição química imediata dos carvões, independente da matéria-prima de origem (Sbardella, 2020; Oliveira et al., 2024).

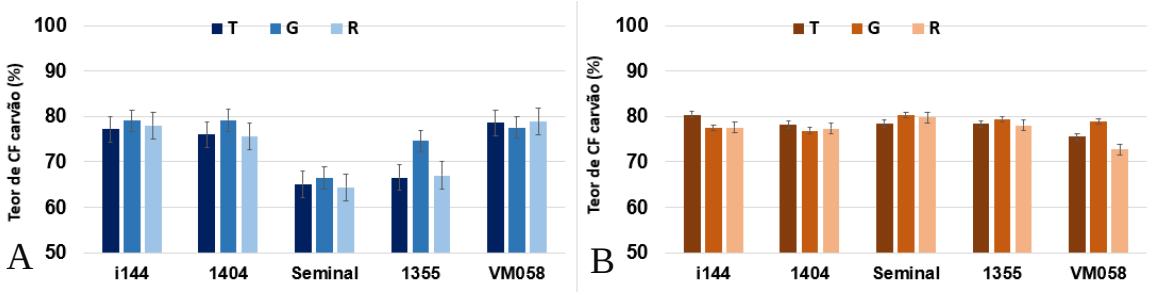


Figura 4 – Teor de carbono fixo dos carvões de diferentes resíduos (tronco, galhos e raízes) dos clones de eucalipto em temperaturas finais de A) 300 °C e B) 450 °C.

4. Conclusões

A temperatura final de carbonização influenciou as propriedades físicas e químicas do carvão vegetal produzido a partir de troncos, galhos e raízes dos diferentes materiais de *Eucalyptus* spp.

O aumento da temperatura de 300 para 450 °C promoveu redução do rendimento gravimétrico, aumento do teor de carbono fixo e pouca variação na densidade aparente dos carvões.

Os carvões dos resíduos de raízes apresentaram comportamento mais semelhante aos carvões dos troncos, sendo o resíduo de galhos mais distinto dos demais.

5. Agradecimentos

A Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia pela infraestrutura para realização da pesquisa. Ao CNPq pelo fomento da bolsa de pesquisa. Ao Grupo de Pesquisa em Tecnologia de Produtos Florestais (Woodtech) pelo suporte científico.

6. Referências bibliográficas

Adeodato, S., Feltran-Barbieri, R., Iizuka, E. S., Vilela, M., & Ramos, L. (2017). Do Brasil para o mundo: Inovação e sustentabilidade nas cadeias globais de valor (Ciclo 2). FGVces. https://repositorio.fgv.br/items/e55053d3-a000-4b81-810b-985ebf170638

Associação Brasileira de Normas Técnicas. (1981). NBR 6923: Carvão vegetal – Amostragem e preparação da amostra.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. (1985). NBR 9165: Carvão vegetal – Determinação da densidade relativa aparente, relativa verdadeira e porosidade.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. (1986). NBR 8112: Carvão vegetal – Análise imediata.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2003). NBR 11941: Madeira – Determinação da densidade básica.

Batista, R. R. (2021). Influência de variáveis físico-químicas de biomassas lignocelulósicas e de processo pirolítico no rendimento de biocarvão e potencial de aplicação no sequestro de carbono (Tese de doutorado). Universidade do Estado do Rio de Janeiro. http://www.bdtd.uerj.br/handle/1/17683

Cardoso, B. M. (2012). Uso da biomassa como alternativa energética (Monografia de graduação). Universidade Federal do Rio de Janeiro.

Figueiredo, M. E. O., Longue Júnior, D., Pereira, A. K. S., Carneiro, A. de C. O., & Silva, C. M. S. da. (2018). Potencial da madeira de Pterogyne nitens Tul. (Madeira-Nova) para produção de carvão vegetal. Ciência Florestal, 28(1), 420–431. https://doi.org/10.5902/1980509831620

Guimarães, L. K. (2021). Carbonização de mix de resíduos de exploração de plano de manejo florestal e análises qualitativas do carvão (Monografia de graduação). Universidade Federal Rural da Amazônia.

Indústria Brasileira de Árvores. (2025). Relatório anual IBÁ 2025. IBÁ.

Marabezi, K. (2009). Estudo sistemático das reações envolvidas na determinação dos teores de lignina e holocelulose em amostras de bagaço e palha de cana-de-açúcar (Tese de doutorado). Universidade de São Paulo.

Oliveira, A. J. L., Longue Júnior, D., Ramos, R. D., Silva, J. V. M., & Lima, H. R. (2024). Variabilidade na determinação da composição química imediata do carvão vegetal de eucalipto. Semana de Engenharia Florestal da Bahia (SEEFLOR-BA), 4.

Oliveira, M. R. (2025). Determinação da composição química de biomassas lignocelulósicas por meio da análise térmica (Tese de doutorado). Universidade Estadual Paulista. https://hdl.handle.net/11449/315930

Pereira, N. S., Longue Júnior, D., Rocha, L. da S., Medeiros, N. C. G. de, & Moreira, B. O. (2024). Avaliação qualitativa dos extrativos de madeira comercial de eucalipto. Semana de Engenharia Florestal da Bahia (SEEFLOR-BA), 4. https://anais2.uesb.br/index.php/seeflor/article/view/2892

Protásio, T. P., Lima, M. D. R., Teixeira, R. A. C., et al. (2021). Influence of extractives content and lignin quality of Eucalyptus wood in the mass balance of pyrolysis process. BioEnergy Research, 14, 175–189. https://doi.org/10.1007/s12155-020-10166-z

Ramos, R. D. (2025). Estudo da carbonização e das características do carvão vegetal de eucalipto para churrasco (Dissertação de mestrado). Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia.

Rodrigues, T., & Braghini Junior, A. (2019). Prospecção tecnológica na produção de carvão vegetal: Um estudo de patentes. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 111, 170–183. https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.04.081

Rusch, F. (2019). Produção de painéis de alta densidade e uso energético de bambu com coparticipação de erva-mate.

Sbardella, M. (2020). Capacidade de brotação e crescimento de espécies de Eucalyptus spp. em sistema de alto fuste e talhadia (Tese de doutorado). Universidade Estadual Paulista. http://hdl.handle.net/11449/214988

Silva, F. T. M. (2019). Valorização da madeira Eucalyptus sp. via pirólise: Caracterização e rendimentos dos produtos.

Soares, V. C., Bianchi, M. L., Trugilho, P. F., Pereira, A. J., & Höfler, J. (2014). Correlações entre as propriedades da madeira e do carvão vegetal de híbridos de eucalipto. Revista Árvore, 38(3), 543–549. https://doi.org/10.1590/S0100-67622014000300017

Trugilho, P. F., Lima, J. T., Mori, F. A., & Lino, A. L. (2001). Avaliação de clones de Eucalyptus para a produção de carvão vegetal. Cerne, 7(2), 104–114.

Trugilho, P. F., Silva, D. A., Napoli, A., & Mendes, L. M. (2011). Propriedades e rendimento do carvão de clones de eucalipto. Scientia Forestalis, 39(90), 221–230

Vale, A. T., Costa, A. F., Gonçales, J. C., & Nogueira, M. (2001). Relações entre a densidade básica da madeira, o rendimento e a qualidade do carvão vegetal de espécies do Cerrado. Revista Árvore, 25(1), 89–95.

Vieira, R. S., Lima, J. T., Monteiro, T. C., Selvatti, T. S., Baraúna, E. E. P., & Napoli, A. (2013). Influência da temperatura no rendimento dos produtos da carbonização de Eucalyptus microcorys. Cerne, 19(1), 59–64. https://doi.org/10.1590/S0104-77602013000100008.

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Qualificação dos extrativos da madeira de *Eucalyptus*, *Corymbia* e *Pinus* extraídos em solvente acetona

Laura da Silva Rocha[1]; Dalton Longue Júnior[1]; Bruno Oliveira Moreira[2]; José Pedro Brito Santos[1]; Matildes Santos Borges[1]; Natielly Cristina Gomes de Medeiros[3]; Flaviana Reis Milagres[4]

[1] Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia
[2] Universidade Federal da Bahia
[3] Universidade Federal do Espírito Santos
[4] Klabin S.A

Resumo: Os extrativos da madeira influenciam processos de polpação devido à presença de compostos lipofílicos associados à formação de *pitch*. Este trabalho objetivou qualificar os compostos presentes nos extrativos da madeira de espécies comerciais dos gêneros *Eucalyptus*, *Corymbia* e *Pinus*. Amostras de serragem foram submetidas à extração simples (acetona) e dupla (acetona seguida de água quente), conforme metodologia TAPPI, e os extratos analisados por CG-EM. Foram identificados 32/9 compostos em *Eucalyptus*, 12/6 em *Corymbia* e 38/39 em *Pinus* na extração simples/dupla, respectivamente. Em *Eucalyptus* e *Corymbia*, predominaram compostos exclusivos da extração simples, incluindo ácidos graxos, fitoesteróis e ácidos resinosos. A extração dupla favoreceu a remoção de compostos hidrofílicos, enquanto a extração simples foi mais eficiente na extração de compostos lipofílicos de interesse industrial, sendo mais indicada para o controle de *pitch*.

Palavras-chave: Caracterização química; Extrativos lipofílicos; Polpação Kraft.

Characterization of wood extractives from *Eucalyptus*, *Corymbia*, and *Pinus* obtained by acetone extraction

Abstract: Wood extractives influence pulping processes due to the presence of lipophilic compounds associated with pitch formation. This study aimed to characterize the compounds present in the wood extractives of commercial species from the genera *Eucalyptus*, *Corymbia*, and *Pinus*. Wood meal samples were subjected to single extraction (acetone) and sequential extraction (acetone followed by hot water) according to the TAPPI methodology, and the extracts were analyzed by GC–MS. A total of 32/9 compounds were identified in *Eucalyptus*, 12/6 in *Corymbia*, and 38/39 in *Pinus* for the single/sequential extraction, respectively. In *Eucalyptus* and *Corymbia*, compounds exclusive to the single extraction predominated, including fatty acids, phytosterols, and resin acids. Sequential extraction primarily promoted the removal of hydrophilic compounds, whereas single extraction was more effective in extracting lipophilic compounds of industrial interest, making it the most suitable method for pitch control.

Keywords: Chemical characterization; Lipophilic extractives; Kraft pulping.

1. Introdução

A busca por madeiras mais adequadas aos diferentes processos industriais tem ampliado a utilização de novas espécies e combinações híbridas, incluindo aquelas pertencentes ao gênero *Corymbia* (Reis et al., 2014). Em 2024, a área total destinada ao plantio de árvores para fins industriais no Brasil alcançou 10,5 milhões de hectares, dos quais 8,1 milhões de hectares correspondiam a plantios de espécies do gênero *Eucalyptus* e 1,9 milhão de hectares a plantios de *Pinus* (IBÁ, 2025).

Além da elevada produtividade dessas espécies, a composição química da madeira exerce influência direta sobre sua utilização industrial. Os extrativos da madeira são uma mistura de compostos de baixo e médio peso molecular que podem ser extraídos da madeira com água quente e solventes orgânicos, e podem ser categorizados pelo seu comportamento e dissolução (Lehr et al., 2021). Dependendo do solvente, podem ser divididos em extrativos hidrofílicos e lipofílicos (Wastowski, 2018), sendo uma estratégia de caracterização para controle de processo.

Extrativos particularmente lipofílicos, como ácidos graxos e ácidos resinosos, tendem a se aglomerar na água do processo de polpação Kraft e formar os depósitos de *pitch* (Silvério, 2008). A acetona, solvente seletivo e pouco prejudicial à saúde e ao ambiente, tem sido usada em substituição dos solventes especificamente lipofílicos, como diclorometano, apesar de extrair componentes mais polares, como simples fenóis, ligninas e açúcares (Wastowski, 2018).

A alta resolução encontrada em análises que utilizam coluna capilar transformou a cromatografia gasosa em uma excelente técnica para estudar misturas de componentes muito complexas como os extrativos da madeira (Silvério, 2008). A combinação CG com a espectrometria de massas (CG-EM) é uma poderosa técnica para identificação de componentes em misturas desse tipo (Sintholé et al., 1992).

Nesse sentido, o objetivo deste trabalho foi qualificar os compostos presentes nos extrativos da madeira de espécies dos gêneros comerciais *Eucalyptus*, *Corymbia* e *Pinus* por cromatografia gasosa acoplada à espectrometria de massas (CG-EM), utilizando acetona e água quente como solventes extratores.

2. Material e métodos

2.1 Local de estudo e materiais utilizados

Foram utilizadas amostras de cavacos de madeiras dos gêneros *Eucalyptus* e *Pinus*, provenientes do processo industrial de fábricas de polpa celulósica localizadas no Extremo Sul da Bahia e na região dos Campos Gerais, no Paraná, respectivamente. As amostras de *Corymbia*

foram obtidas do processo industrial de carvão vegetal, localizada em Alagoinhas, Bahia, na forma de toretes. Todo o material foi enviado para o Laboratório de Tecnologia de Produtos Florestais (WoodTech), da Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia (UESB), *campus* Vitória da Conquista, para realização das análises

Os cavacos de *Eucalyptus* e *Pinus* foram classificados e selecionados manualmente, com a retirada de cavacos defeituosos, nós, cunhas, cavacos com cascas ou manchados. Em seguida, os cavacos foram quarteados, para garantir a representatividade e homogeneidade das amostras. Por outro lado, os toretes de *Corymbia*, foram transformados em discos com auxílio de uma serra circular e os discos foram picados com auxílio de ferramenta manual do tipo formão e martelo, até a obtenção de cavacos com dimensões adequadas para as análises.

Os cavacos foram transformados em serragem utilizando um moinho de facas do tipo Willey. A serragem foi classificada em peneiras de 40-60 mesh, sendo utilizado a fração retida na peneira de 60 mesh, de acordo a norma TAPPI T 257 cm-12 (2012) (Figura 1).



Figura 1 - Cavacos e serragem (60 mesh) das madeiras dos gêneros *Eucalyptus*, *Corymbia* e *Pinus*, utilizados nas análises laboratoriais.

2.2 Análise qualitativa dos compostos orgânicos por CG-EM

O teor de extrativos foi determinado conforme norma TAPPI T 204 cm-17, utilizando acetona (extração simples) e com posterior extração em água quente (extração dupla). Para qualificação, o resíduo seco obtido no balão foi solubilizado em acetona e transferido para tubos de Eppendorf e submetido à secagem em temperatura ambiente.

Essas amostras foram levadas para os laboratórios de Química Orgânica e de Análise Instrumental da Universidade Federal da Bahia (UFBA), *campus* Anísio Teixeira, e analisadas no equipamento de Cromatografia Gasosa acoplada à Espectrometria de Massas (CG-EM) para separação, qualificação e identificação dos compostos presentes nos extrativos removidos das madeiras de *Eucalyptus*, *Corymbia* e *Pinus*.

Para o processo de derivatização, foi pesado 3,0 mg dos extratos em uma balança analítica e, em seguida, dissolvidos em 60 µL de piridina e 100 µL de BSTFA (N,O-bis(trimetilsilil)-trifluoroacetamida), contendo cerca de 1% de clorotrimetilsilano. A mistura reacional foi aquecida a 70 °C por 30 minutos, injetando-se 1 µL no cromatógrafo (Figura 2).



Figura 2 – Processo de derivatização dos extratos de *Eucalyptus*, *Corymbia* e *Pinus*, para análise de Cromatografia Gasosa acoplada à Espectrometria de Massas (CG-EM).

As análises por CG-EM foram realizadas no aparelho QP2010SE (GC2010 Plus) da marca Shimadzu, usando coluna capilar de sílica fundida Rtx-5MS (30 m; 0,25 mm de diâmetro interno; filme de 0,25 µm) utilizando gás hélio com elevado grau de pureza (99,9%) de arraste com vazão de 1 $mL.min^{-1}$. O tempo total de corrida foi de 90 min. A identificação dos compostos químicos presentes nos extrativos foi realizada utilizando um banco de dados de espectros da biblioteca NIST08.LIB.

Foram considerados os compostos identificados que apresentaram similaridade superior a 80% com a biblioteca. Os compostos foram classificados em lipofílicos e hidrofílicos, sendo os lipofílicos: ácidos graxos, ácidos resinosos, diterpenoides, fitoesteróis e hidrocarbonetos. Já os hidrofílicos foram classificados em açúcares, ácidos orgânicos, álcoois, ácido benzoico e derivados.

2.3 Análise dos dados

A quantidade de compostos identificados nas extrações simples e duplas foi representada graficamente por meio de diagramas de Venn, permitindo a visualização das substâncias exclusivas e compartilhadas entre os tipos de extração para cada espécie. Cada composto identificado foi avaliado por uma planilha de presença e ausência.

3. Resultados e discussão

A quantidade de compostos identificados e a sobreposição das extrações simples e dupla variaram entre os gêneros estudados (Figura 3). Para *Eucalyptus*, foram identificados 35

compostos, dos quais 74,3% foram detectados exclusivamente em acetona (extração simples) e 17,1% dos compostos foram identificados em extração com acetona + água.

Comportamento semelhante foi observado para *Corymbia*, no qual foram identificados 14 compostos, sendo a grande maioria (57,1%) somente na extração simples com acetona e a menor parte em acetona + água (14,3%). Por outro lado, para *Pinus* foram identificados 59 compostos, estando os mesmos bem distribuídos nas duas extrações propostas: 20 detectados somente na extração simples com acetona e 21 na extração dupla, e 18 compostos em comum entre as extrações.

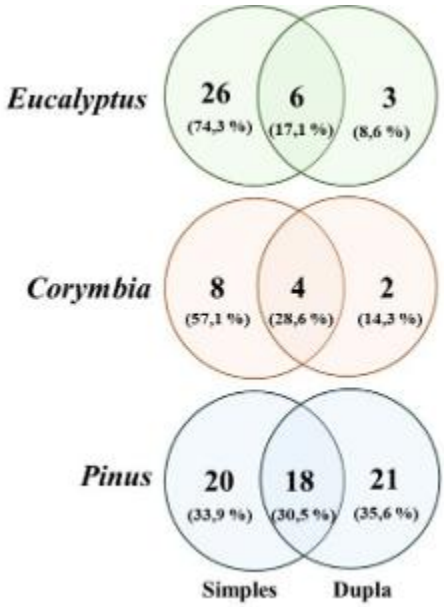


Figura 3 – Distribuição dos compostos identificados nos extrativos da madeira dos gêneros *Eucalyptus, Corymbia* e *Pinus* por Cromatografia Gasosa acoplada a Espectroscopia de Massas (CG-EM).

A caracterização química dos extrativos de *Eucalyptus* mostrou diferenças na classificação dos compostos lipofílicos e hidrofílicos em função do tipo de extração (Tabela 1). A extração simples extraiu mais compostos lipofílicos, enquanto a extração dupla extraiu uma quantidade significativa de compostos hidrofílicos, especialmente açúcares e álcoois, sendo essa diferença muito expressiva do ponto de vista de caracterização dos compostos da madeira e na rotina para monitoramento dos extrativos em indústrias de polpa celulósica, mais interessadas nos extrativos lipofílicos que se acumulam no processo gerando *pitch*.

Entre os compostos lipofílicos (42,3%), os ácidos graxos representaram a principal classe química extraída pela acetona, correspondendo a 23,1% do total identificado. Nessa fração, foram observados compostos como ácido esteárico, ácido palmítico, ácido linoleico e ácido oleico, além de monopalmitina e monoestearina.

Tabela 1 - Grupos de compostos químicos identificados nas extrações com acetona (simples e dupla) para o gênero *Eucalyptus*

Eucalyptus		
	Acetona	**Acetona + água**
Lipofílicos	**Total (%)**	
Ácidos graxos	23,1	0,0
Diterpenoides	7,7	0,0
Fitoesteróis	11,5	0,0
Total	42,3	0,0
Hidrofílicos		
Açúcares	19,2	33,3
Ácidos orgânicos	3,8	33,3
Álcoois	19,2	0,0
Ácido benzoico e derivados	15,4	33,3
Total	57,6	99,9

O cromatograma de *Eucalyptus* demonstrou diferenças claras entre os tipos de extração. É possível observar que a extração simples apresentou maior quantidade e intensidade de picos cromatográficos quando comparada a extração dupla (Figura 4).

No estudo desenvolvido por Silvério et al. (2008) para espécies do gênero *Eucalyptus*, os extrativos foram agrupados principalmente nas classes de álcoois graxos, ácidos graxos e esteroides, com predominância dos ácidos graxos entre os compostos identificados. Esse comportamento corrobora os resultados obtidos no presente estudo, uma vez que, nas extrações realizadas com acetona, os ácidos graxos constituíram a principal classe de compostos lipofílicos identificada.

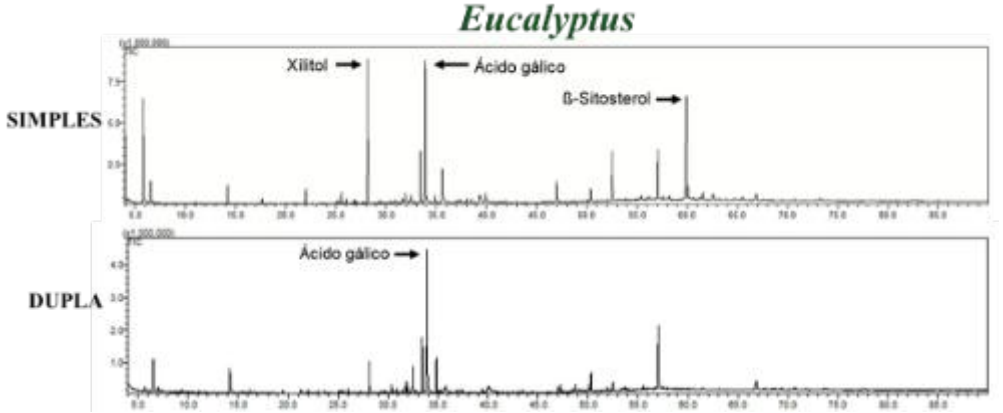


Figura 4 – Cromatogramas obtidos por CG-EM dos extrativos de *Eucalyptus* utilizando extração simples e dupla.

Para madeira de *Corymbia*, foi observado a predominância de compostos hidrofílicos (74,9%), principalmente álcoois, enquanto os compostos lipofílicos apresentaram menor diversidade (25,0%) quando comparado ao *Eucalyptus*, e também só foram detectados na extração simples (Tabela 2).

Tabela 2 - Grupos de compostos químicos identificados nas extrações com acetona (simples e dupla) para o gênero *Corymbia*

Corymbia		
	Acetona	**Acetona + água**
Lipofílicos	**Total (%)**	
Ácidos graxos	16,7	0,0
Fitoesteróis	8,3	0,0
Total	25,0	0,0
Hidrofílicos		
Açúcares	33,3	16,7
Ácidos orgânicos	8,3	16,7
Álcoois	33,3	66,7
Total	74,9	99,9

Entre os principais compostos identificados tem-se o glicerol, eritritol, glucitol, arabitol e xilitol (Figura 5). Esses compostos possuem elevada polaridade e estão associados à maior afinidade dos sistemas contendo água por substâncias hidrossolúveis presentes na madeira.

Nesse sentido, os extrativos de *Corymbia* apresentam um perfil químico predominantemente hidrofílico, especialmente quando ocorre a extração dupla. Sob a perspectiva industrial, esse comportamento sugere menor potencial de formação de *pitch* associado aos compostos lipofílicos.

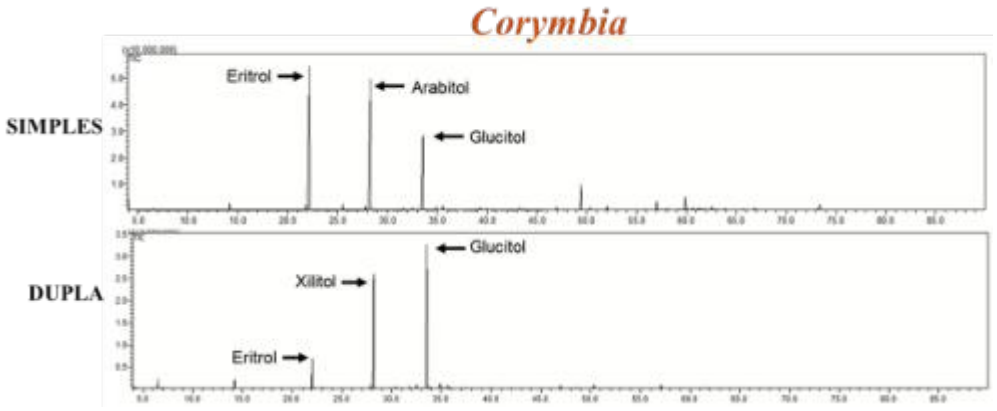


Figura 5 – Cromatogramas obtidos por CG-EM dos extrativos de *Corymbia* utilizando extração simples e dupla.

Para a madeira de *Pinus*, foi observado um perfil químico mais complexo entre os três gêneros comerciais avaliados, com maior diversidade de compostos identificados, tanto na fração lipofílica quanto na fração hidrofílica (Tabela 3). Esse comportamento está associado à elevada presença de substâncias resinosas características das madeiras de coníferas, como ácidos graxos, ácidos resinosos e fitoesteróis, compostos relacionados aos problemas de *pitch* na indústria de celulose e papel (Keeling e Bohlmann, 2006).

Tabela 3 - Grupos de compostos químicos identificados nas extrações com acetona (simples e dupla) para o gênero *Pinus*

	Pinus	
	Acetona	**Acetona + água**
Lipofílicos		**Total (%)**
Ácidos graxos	27,8	13,3
Ácidos resinosos	8,3	0,0
Diterpenoides	5,6	0,0
Fitoesteróis	2,8	3,3
Hidrocarbonetos	0,0	3,3
Total	44,5	19,9
Hidrofílicos		
Açúcares	8,3	23,3
Ácidos orgânicos	33,3	26,7
Álcoois	11,1	16,7
Ácido benzoico e derivados	2,8	13,3
Total	54,5	80,0

Os ácidos resinosos, característicos de espécies do gênero *Pinus*, foram identificados na extração simples, destacando-se ácido abiético, ácido pimárico, ácido dehidroabiético e ácido isopimárico. Esses compostos possuem elevada relevância industrial por serem reconhecidos como importantes precursores da formação de *pitch* durante o processo de polpação. Na extração dupla, entretanto, os ácidos resinosos não foram identificados.

De acordo com Hubbe et al. (2020), a severidade dos problemas de *pitch* está mais relacionada à composição química dos extrativos do que à sua quantidade total, uma vez que ácidos graxos, ácidos resinosos e seus derivados apresentam elevada hidrofobicidade e tendência à formação de depósitos.

Os cromatogramas das amostras de *Pinus* mostraram uma maior diversidade de compostos químicos (Figura 6), e diferentemente de *Eucalyptus* e *Corymbia*, os dois

tratamentos apresentaram grande quantidade de picos distribuídos ao longo de todo o tempo de retenção, confirmando uma maior complexidade química desta madeira.

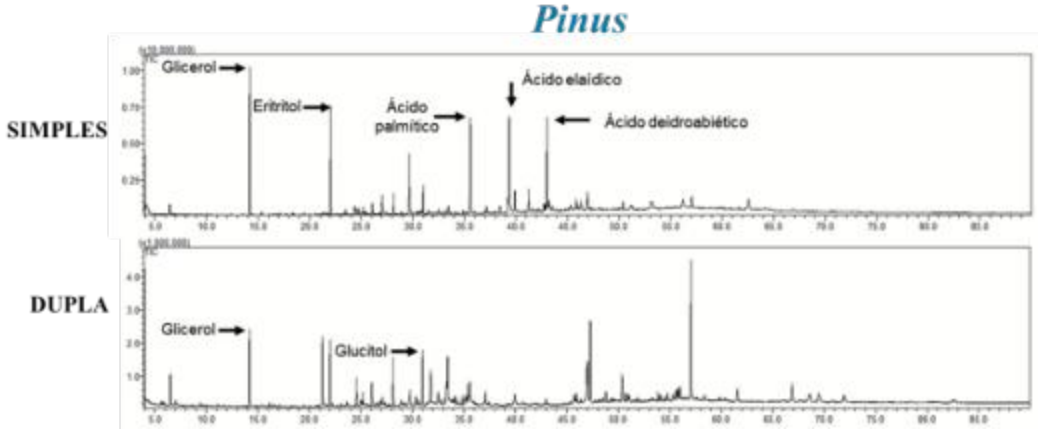


Figura 6 – Cromatogramas obtidos por CG-EM dos extrativos de *Pinus* utilizando extração simples e dupla.

Sob a perspectiva industrial, os resultados demonstram que a madeira de *Pinus* possui maior potencial para geração de depósitos de *pitch* quando comparado aos gêneros *Eucalyptus* e *Corymbia*, devido à maior ocorrência de ácidos resinosos, ácidos graxos e fitoesteróis. Dessa forma, a escolha da espécie e do método de extração influencia diretamente a caracterização desses compostos e, consequentemente, a avaliação do potencial de deposição e dos impactos operacionais no processo de produção de celulose.

4. Conclusões

A caracterização química dos extrativos de todas as espécies demonstrou que a fração lipofílica em acetona foi expressiva, e que a adição da etapa de extração em água quente favoreceu principalmente a remoção de compostos hidrofílicos derivados da dissolução de carboidratos de baixo peso molecular.

Os extrativos removidos na extração com acetona, caracterizados principalmente na fração lipofílica, apresentam maior relevância no controle operacional de processos industriais, principalmente aqueles associados à formação de *pitch*.

5. Referências bibliográficas

Hubbe, M. A., McLean, D. S., Stack, K. R., Lu, X., Strand, A.; & Sundberg, A. (2020). Self-assembly of alkyl chains of fatty acids in papermaking systems: a review of relared pitch

issues, hydrophobic sizing, and pH effects. BioResurces, 15(2). https://doi.org/10.15376/biores.15.2.4591-4635

Indústria Brasileira de Árvores. (2025). Relatório IBÁ 2025 ano base 2024. https://iba.org/wp-content/uploads/2025/10/IBA_relatorio_digital_POR.pdf

Keeling, C. I.; & Bohlmann J. (2006). Diterpen resin acids in conifers. Phytochemistry, 67(22). https://doi.org/10.1016/j.phytochem.2006.08.019

Lehr, M., Miltner, M.; & Friedl, A. (2021). Removal of wood extractives as pulp (pre-)treatment: a technological review. SN Applied Sciences, 3(886). https://doi.org/10.1007/s42452-021-04873-1

Oliveira, F. S. (2008). Caracterização de extrativos de madeira de *Eucalyptus* e depósitos de *pitch* envolvidos na fabricação de celulose e papel (Tese de doutorado). Universidade Federal de Minas Gerais.

Reis, C. A. F., Assis, T. F., Santos, A. M.; & Paludzyszyn Filho, E. (2014). Embrapa Florestas. ISSN 1980-3958

Sitholé, B. B., Sullivan, J. L.; & Allen, L. H. (1992). Identification and quantitation of acetone extractives of wood and bark by ion exchange capillary GC with a spreadsheet program. Holzforschung, 46(5). https://doi.org/10.1515/hfsg.1992.46.5.409

Technical association of the pulp and paper industry. (2017). TAPPI T 204 cm-17. Solvent extractives of wood and pulp.

Technical association of the pulp and paper industry. (2012). TAPPI T 257 cm-02. Sampling and preparing wood for analysis.

Wastowski, A. D. (2018). Química da madeira. Editora Interciência.

Rachaduras e perdas de rendimento em madeiras de *Eucalyptus benthamii, Eucalyptus dunnii* e *Eucalyptus grandis*

Maickele Aparecida Muniz[1]; Alexsandro Bayestorff da Cunha[1]; Tarcísio Franscisco De Camargo[1]; Camila Alves Corrêa[1]; Nicolas Costa Pucci[1]; Marine Alves Antonello[1]; José Fellip Catique Marinho[1]

[1] Universidade do Estado de Santa Catarina – UDESC/CAV

Resumo: As rachaduras constituem um dos principais defeitos que comprometem o aproveitamento tecnológico da madeira de *Eucalyptus*, pois reduzem o comprimento útil das peças e provocam perdas durante o processamento. Este trabalho comparou a ocorrência de rachaduras e as perdas de rendimento em madeiras de *Eucalyptus benthamii*, *Eucalyptus dunnii* e *Eucalyptus grandis*, considerando classes diamétricas, sistemas de desdobro e o efeito da secagem. Foram utilizados dados de toras submetidas aos desdobros tangencial e radial, além do desdobro em blocos para *E. benthamii*. As rachaduras foram avaliadas nas toras e nas peças serradas antes e após a secagem. As perdas de rendimento foram determinadas pela diferença entre o rendimento bruto e o rendimento obtido após a retirada das regiões comprometidas por rachaduras. Foram realizadas análises estatísticas descritivas, com cálculo de média, desvio-padrão, mediana, valores mínimo e máximo e amplitude. A perda média foi de 7,20 pontos percentuais, equivalente a 12,90% do rendimento bruto. *Eucalyptus benthamii* apresentou a maior perda relativa média, seguido por *E. dunnii* e *E. grandis*. O desdobro tangencial apresentou perdas superiores às observadas no desdobro radial. A secagem ampliou as rachaduras nas três espécies, com maior incremento nas peças tangenciais. Os resultados demonstram que a ocorrência de rachaduras resulta da interação entre espécie, classe diamétrica, tensões de crescimento, orientação de corte e comportamento higroscópico da madeira.

Palavras-chave: Qualidade da madeira; Tensões de crescimento; Secagem convencional.

Occurrence of cracks and yield losses in *Eucalyptus benthamii*, E*ucalyptus dunnii* and *Eucalyptus grandis* woods

Abstract: Cracks are among the main defects affecting the technological utilization of Eucalyptus wood because they reduce the useful length of lumber and cause losses during processing. This study compared cracking occurrence and yield losses *in Eucalyptus benthamii*, *Eucalyptus dunnii*, and *Eucalyptus grandis*, considering diameter classes, sawing methods, and the effect of drying. Data from logs subjected to tangential and radial sawing were used, in addition to block sawing for *E. benthamii*. Cracks were evaluated in logs and lumber before and after drying. Yield losses were determined from the difference between gross yield and the yield obtained after removing cracked regions. Descriptive statistical analyses were performed, including mean, standard deviation, median, minimum and maximum values, and range. The mean loss was 7,20 percentage points, corresponding to 12.90% of gross yield. *Eucalyptus benthamii* showed the highest mean relative loss, followed by *E. dunnii* and *E. grandis*. Tangential sawing resulted in greater losses than radial sawing. Drying increased cracking in all species, with greater increments in tangentially sawn boards. The results demonstrate that cracking results from the interaction among species, diameter class, growth stresses, sawing orientation, and the hygroscopic behavior of wood.

Keywords: Lumber quality; Growth stresses; Conventional drying.

1293. Introdução

As espécies do gênero *Eucalyptus* apresentam elevada importância para o setor florestal brasileiro e são utilizadas em diferentes segmentos de transformação da madeira. Entretanto, o processamento de espécies de eucalipto para obtenção de madeira serrada pode ser limitado pela ocorrência de defeitos associados à liberação das tensões de crescimento, entre os quais se destacam as rachaduras de topo e as deformações das peças. Esses defeitos podem ocorrer após o abate, durante o desdobro e ao longo da secagem, comprometendo a qualidade e o aproveitamento da madeira. Estudos recentes demonstram que as rachaduras de extremidade estão relacionadas à liberação das tensões de crescimento e podem representar perdas relevantes no processamento de espécies de *Eucalyptus* (Lima et al., 2023; Amer et al., 2019).

As tensões de crescimento constituem um dos principais fatores associados à formação de rachaduras após o abate e o desdobro. A liberação dessas tensões altera o estado de equilíbrio existente na árvore e pode provocar fissuras nas extremidades das toras e nas peças serradas. No *Eucalyptus grandis*, Lima et al. (2023) observaram que o rachamento das peças serradas está relacionado ao processo de liberação das tensões de crescimento e que a secagem contribui para a evolução das rachaduras. No *Eucalyptus dunnii*, estudos anteriores também demonstraram associação entre as tensões de crescimento, o índice de rachadura e o rendimento da madeira serrada (Hernández et al., 2014a, 2014b; Murphy et al., 2005; Rozas et al., 2023).

As diferenças entre espécies podem contribuir para respostas distintas durante o processamento. *Eucalyptus benthamii* e *Eucalyptus dunnii* apresentam diferenças em características físicas, químicas e anatômicas da madeira, incluindo densidade básica,

dimensões das fibras e composição química (Samistraro et al., 2015). Entretanto, essas características não foram determinadas no presente estudo e, portanto, não devem ser utilizadas como variáveis explicativas diretamente avaliadas. Estudos recentes sobre *Eucalyptus benthamii* também demonstram a importância da variabilidade genética na determinação de características relacionadas ao crescimento e à qualidade da madeira (Estopa et al., 2023; (Amer et al., 2019; Famiri et al., 2011; Marchesan et al., 2015).

A classe diamétrica constitui outro fator relevante para a manifestação das tensões de crescimento e dos defeitos associados ao processamento. No *Eucalyptus benthamii*, Cunha et al. (2015) verificaram maior frequência de rachaduras de intensidade média nas toras de menor classe diamétrica, enquanto as toras de maior diâmetro apresentaram predominância de rachaduras de baixa intensidade. Resultados recentes obtidos para *Eucalyptus grandis* também demonstram que a ocorrência de rachaduras em toras e peças serradas pode ser relacionada ao processo de liberação das tensões de crescimento e à posição da madeira no fuste (Lima et al., 2023).

O sistema de desdobro também interfere na qualidade da madeira serrada. Diferentes orientações de corte alteram a distribuição das tensões internas e as características dimensionais das peças, podendo modificar a manifestação dos defeitos e o rendimento efetivo do processo. Em *Eucalyptus benthamii*, estudos de rendimento demonstraram diferenças entre os sistemas de desdobro tangencial e radial, inclusive quanto às perdas associadas às rachaduras (Cunha et al., 2015; Tomio et al., 2021).

Durante a secagem, a redução do teor de umidade abaixo do ponto de saturação das fibras provoca retração da madeira. Como a retração tangencial é superior à radial, podem ser desenvolvidas tensões internas associadas ao gradiente de umidade e à retração anisotrópica, favorecendo a formação e a propagação de rachaduras (Gacitúa et al., 2007; Valenzuela et al., 2012). Gao et al. (2023) demonstraram que a evolução das microfissuras durante a secagem está relacionada ao gradiente de umidade e à retração anisotrópica da madeira. Em espécies de Eucalyptus, a secagem também pode modificar a manifestação dos defeitos associados às tensões de crescimento (Rozas et al., 2023).

Considerando a relevância das rachaduras para o rendimento e a qualidade da madeira serrada, o objetivo deste trabalho foi comparar a ocorrência de rachaduras e as perdas de rendimento em madeiras de *Eucalyptus benthamii*, *Eucalyptus dunnii* e *Eucalyptus grandis*, considerando a classe diamétrica, o sistema de desdobro e o efeito da secagem.

2. Material e métodos

2.1. Material Experimental

Foram utilizados dados experimentais referentes às madeiras de *Eucalyptus benthamii*, *Eucalyptus dunnii* e *Eucalyptus grandis*, provenientes de áreas experimentais, as árvores apresentavam 13 anos. As toras foram classificadas em classes diamétricas de 20–25 cm e 25–30 cm. Para a avaliação das rachaduras de topo, também foram considerados dados de toras com diâmetro superior a 30 cm. As toras foram submetidas aos sistemas de desdobro tangencial e radial. Para *Eucalyptus benthamii*, foi avaliado adicionalmente o sistema de desdobro em blocos na classe diamétrica de 20–25 cm. As peças serradas foram avaliadas antes e após a secagem convencional. O processo foi conduzido até a obtenção de teor de umidade final próximo de

12%. Foram analisadas peças provenientes dos desdobros radial e tangencial, considerando a evolução das rachaduras durante o processo de secagem. Não foi obtido informação se as árvores eram provenientes de clones ou de plantios seminais.

2.2. Avaliação das rachaduras

A avaliação das rachaduras de topo foi realizada visualmente em todas as toras das amostras, considerando comprimento, largura e profundidade do defeito. As rachaduras foram classificadas em três categorias de intensidade: baixa, média e alta. As frequências de ocorrência foram organizadas por espécie, classe diamétrica e lote.

Nas peças serradas, foram determinados os comprimentos das rachaduras antes e após a secagem. O índice de rachaduras foi obtido pela razão entre a soma dos comprimentos das rachaduras e o comprimento da peça serrada, conforme o procedimento descrito no relatório original.

2.3. Avaliação do rendimento e das perdas associadas às rachaduras

O rendimento da madeira serrada foi determinado a partir da cubagem das toras e das peças produzidas. Foram considerados o rendimento bruto, o rendimento após a retirada das regiões rachadas, o rendimento após o destopo e o rendimento líquido.

As perdas associadas às rachaduras foram determinadas pela diferença entre o rendimento bruto e o rendimento obtido após a retirada das regiões rachadas. Para comparação entre os tratamentos, também foi calculada a perda relativa em relação ao rendimento bruto.

Foram considerados 13 tratamentos para a análise das perdas associadas às rachaduras, envolvendo as três espécies, as duas classes diamétricas, os sistemas tangencial e radial e, adicionalmente, o sistema em blocos para Eucalyptus benthamii na classe de 20–25 cm. Os dados originais do relatório confirmam os tratamentos e os respectivos rendimentos utilizados.

2.4. Análise estatística

Os dados disponíveis para o rendimento correspondiam a valores consolidados para as combinações de espécie, classe diamétrica e sistema de desdobro. Dessa forma, foram aplicadas análises estatísticas descritivas, com determinação de média, desvio-padrão, mediana, valores mínimo e máximo e amplitude. As perdas médias foram comparadas entre as espécies e os sistemas de desdobro por meio da magnitude dos valores obtidos. As frequências de rachaduras de topo foram organizadas por classes de intensidade e analisadas descritivamente.

3. Resultados e discussão

A ocorrência de rachaduras de topo apresentou variação entre as espécies, as classes diamétricas e os lotes avaliados. De modo geral, observou-se predominância de toras classificadas com baixa intensidade de rachamento. Entretanto, foram identificados tratamentos com maior frequência de rachaduras de intensidade média, especialmente em toras de menor diâmetro. A maior ocorrência de rachaduras em determinadas classes diamétricas pode estar relacionada à proporção de madeira juvenil, à distribuição das tensões de crescimento e às características específicas do material genético. As tensões de crescimento são desenvolvidas

durante a formação da madeira e podem ser liberadas de forma intensa após o corte da árvore, ocasionando deformações e fissuras nas extremidades das toras (Amer et al., 2019; Rozas et al., 2023).

Cunha et al. (2015) verificaram, para *Eucalyptus benthamii*, maior frequência de rachaduras de intensidade média nas toras da classe diamétrica inferior e predominância de baixa intensidade nas toras de maior diâmetro. Os resultados obtidos no presente estudo apresentam comportamento compatível com essa tendência, indicando que a classe diamétrica pode influenciar a manifestação dos defeitos. Em *Eucalyptus dunnii*, Hernández et al. (2014a, 2014b) observaram relações entre as tensões de crescimento, as propriedades físicas da madeira e a qualidade das peças serradas. Resultados mais recentes também reforçam a relação entre tensões de crescimento e rachaduras em espécies de Eucalyptus (Rozas et al., 2023; Lima et al., 2023). Dessa forma, a interpretação das rachaduras deve considerar a interação entre diâmetro, propriedades da madeira e magnitude das tensões internas.

A retirada das regiões rachadas reduziu o rendimento em todas as combinações de espécie, classe diamétrica e sistema de desdobro. A estatística descritiva das perdas de rendimento é apresentada na Tabela 1.

Tabela 1 – Estatística descritiva das perdas de rendimento associadas às rachaduras

Estatística	**Perda absoluta (pontos percentuais)**	**Perda relativa (%)**
Número de tratamentos	13	13
Média	7,20	12,90
Desvio-padrão	3,70	5,91
Mediana	5,80	11,48
Mínimo	2,50	4,99
Máximo	12,80	21,66
Amplitude	10,30	16,67

As perdas observadas demonstram que as rachaduras representam um fator importante na redução do aproveitamento da madeira serrada. A necessidade de remoção das extremidades comprometidas reduz o comprimento útil das peças e pode limitar sua utilização em produtos que exigem dimensões mínimas. A diferença entre rendimento bruto e rendimento após a remoção das rachaduras permite avaliar a parcela do volume inicialmente produzida que permanece efetivamente aproveitável. Dessa forma, a análise do rendimento deve considerar simultaneamente a quantidade de madeira serrada e a qualidade das peças obtidas. Na tabela 2 são apresentadas as perdas médias por espécie

Tabela 2 – Perdas médias de rendimento associadas às rachaduras por espécie

Espécie	**Perda absoluta média (pontos percentuais)**	**Perda relativa média (%)**
Eucalyptus benthamii	9,12	16,50
Eucalyptus dunnii	7,78	14,04
Eucalyptus grandis	4,23	7,25

Eucalyptus benthamii apresentou a maior perda média associada às rachaduras, enquanto *Eucalyptus dunnii* apresentou valor intermediário e *Eucalyptus grandis* apresentou a menor perda média. Esse resultado indica maior impacto das rachaduras sobre o rendimento da madeira de *Eucalyptus benthamii* nas condições avaliadas.

A perda relativa média observada para *E. benthamii* foi aproximadamente 2,3 vezes superior à registrada para *E. grandis*. Esse resultado indica maior impacto das rachaduras sobre o rendimento da madeira de E. benthamii nas condições avaliadas. As diferenças entre espécies podem estar relacionadas às particularidades anatômicas, químicas e físicas da madeira. Samistraro et al. (2015) destacaram diferenças entre *E. benthamii* e *E. dunnii* relacionadas à densidade, ao comprimento das fibras e à composição química. Essas características podem influenciar a distribuição das tensões e o comportamento da madeira durante o processamento e a secagem.

Entretanto, as propriedades anatômicas, químicas e mecânicas não foram determinadas no conjunto de dados utilizado. Portanto, esses fatores são apresentados como mecanismos explicativos fundamentados na literatura, e não como variáveis diretamente mensuradas neste estudo. Em *E. dunnii*, as tensões de crescimento podem influenciar o rendimento e a qualidade da madeira serrada (Hernández et al., 2014b). A espécie também apresenta variabilidade genética para características relacionadas ao crescimento e à qualidade da madeira, indicando potencial para a seleção de materiais com maior estabilidade tecnológica (Arnold et al., 2004; Smith et al., 2007; Thomas et al., 2009).

Embora *E. grandis* tenha apresentado os menores níveis de perda no conjunto avaliado, essa espécie possui reconhecida suscetibilidade à propagação de rachaduras após a liberação das tensões de crescimento (Amer et al., 2019). Assim, o resultado não deve ser interpretado como evidência de baixa suscetibilidade intrínseca da espécie, mas como resposta do material analisado sob as condições experimentais consideradas. A perda média no desdobro tangencial foi de 9,33 pontos percentuais, correspondente a 15,78% do rendimento bruto. No desdobro radial, a perda média foi de 4,13 pontos percentuais, equivalente a 8,56%.

Tabela 3 – Perdas médias de rendimento por sistema de desdobro

Sistema de desdobro	Número de tratamentos	Perda absoluta média (pontos percentuais)	Perda relativa média (%)
Tangencial	6	9,33	15,78
Radial	6	4,13	8,56
Em blocos[1]	1	12,80	21,66

[1]Avaliado somente para *Eucalyptus benthamii* na classe diamétrica de 20–25 cm.

O sistema tangencial apresentou maior perda média associada às rachaduras, enquanto o sistema radial apresentou menor perda. O sistema em blocos apresentou o maior valor, porém esse tratamento corresponde a apenas uma combinação experimental.

A perda relativa média no sistema tangencial foi aproximadamente 84% superior à observada no sistema radial. O resultado indica maior impacto das rachaduras nas peças obtidas pelo desdobro tangencial. Tomio et al. (2021) demonstraram que a classe diamétrica e o método de desdobro influenciam o rendimento e a qualidade da madeira de *Eucalyptus benthamii*. Os autores observaram maior rendimento em determinadas condições de desdobro tangencial, mas

identificaram rachaduras entre os defeitos associados à classificação das peças. Portanto, o maior rendimento volumétrico não implica necessariamente maior rendimento útil após a remoção das regiões comprometidas.

A maior suscetibilidade das peças tangenciais pode estar relacionada à anisotropia da retração. Como a retração tangencial é superior a radial, a ocorrência de deformações diferenciais pode gerar tensões capazes de ampliar rachaduras. A orientação do corte, a largura das peças e a distribuição da umidade também podem contribuir para esse comportamento. O sistema de desdobro em blocos apresentou a maior perda relativa, de 21,66%. Contudo, esse resultado corresponde a apenas uma combinação experimental e não deve ser utilizado para estabelecer uma tendência geral do método.

A secagem ampliou as rachaduras nas três espécies e nos dois sistemas de desdobro. O aumento foi mais expressivo nas peças tangenciais. Os incrementos médios do comprimento das rachaduras são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 – Incremento médio das rachaduras durante a secagem

Espécie	Sistema radial (cm)	Sistema tangencial (cm)
Eucalyptus grandis	1,80	7,50
Eucalyptus benthamii	12,93	22,83
Eucalyptus dunnii	1,03	16,80

O incremento médio das rachaduras foi de 5,25 cm nas peças radiais e de 15,71 cm nas peças tangenciais. Assim, o aumento médio nas peças tangenciais foi aproximadamente 199% superior ao observado nas peças radiais. Durante a secagem, a redução do teor de umidade promove retração da madeira. A diferença entre as retrações tangencial e radial pode gerar tensões internas e favorecer a propagação de rachaduras. Estudos sobre a formação de microfissuras demonstram que a distribuição de umidade, as propriedades mecânicas locais da parede celular e a heterogeneidade anatômica influenciam o início e a evolução das fraturas (Gacitúa et al., 2007; Gao et al., 2023; Valenzuela et al., 2012). O colapso também pode contribuir para a ocorrência de defeitos. Durante a secagem, forças capilares podem provocar deformações celulares e aumentar as tensões internas, principalmente quando a resistência transversal da madeira é superada (Bariska, 1992; Yang & Liu, 2018).

Os resultados reforçam a necessidade de utilizar programas de secagem específicos para as características de cada espécie. Batista et al. (2016) destacaram a importância da avaliação da taxa de secagem e da classificação dos defeitos para a previsão da qualidade da madeira submetida à secagem convencional. Severo et al. (2013) verificaram que tratamentos térmicos com vapor podem modificar o comportamento da madeira de *Eucalyptus dunnii* durante a secagem. Os resultados demonstram que a redução das rachaduras pode aumentar o rendimento efetivo da madeira serrada sem a necessidade de ampliação do volume de matéria-prima processada. A seleção genética de materiais com menor suscetibilidade às tensões de crescimento constitui uma estratégia de longo prazo. Estudos com *Eucalyptus benthamii* indicam potencial para o uso de parâmetros genéticos e genômicos na seleção de características relacionadas ao crescimento e à qualidade da madeira (Paludeto et al., 2021; de Souza et al., 2023).

No processamento, o desdobro radial apresentou menores perdas associadas às rachaduras. Entretanto, a escolha do sistema deve considerar também o rendimento volumétrico, as dimensões comerciais, a produtividade e a qualidade final das peças. A adequação dos programas de secagem às características anatômicas, físicas e químicas de cada espécie pode contribuir para a redução dos gradientes de umidade e dos defeitos. A literatura aponta que o comportamento de secagem e a suscetibilidade às rachaduras podem variar entre espécies, sendo necessária a definição de condições específicas de processamento.

4. Conclusões

Eucalyptus benthamii apresentou as manifestações mais severas de rachamento nas condições avaliadas, enquanto *Eucalyptus grandis* apresentou as menores perdas médias de rendimento. As diferenças observadas resultam da interação entre espécie, classe diamétrica, tensões de crescimento, orientação de corte e comportamento higroscópico da madeira. A seleção de materiais geneticamente mais estáveis, a escolha adequada do sistema de desdobro e o desenvolvimento de programas específicos de secagem constituem estratégias relevantes para reduzir perdas e elevar a qualidade da madeira serrada.

5. Agradecimentos

Agradecimento à Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação do Estado de Santa Catarina - FAPESC e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal da Universidade do Estado de Santa Catarina – UDESC, pelo suporte acadêmico e científico.

1298. **Referências bibliográficas**

Amer, M., Kabouchi, B., Rahouti, M., Famiri, A., Fidah, A., Ziani, M., & El Alami, S. (2019). Kinetic of cracks propagation related to the growth stress of clonal Eucalyptus wood. Journal of the Indian Academy of Wood Science, 16(2), 155–161. https://doi.org/10.1007/s13196-019-00242-z

Arnold, R., Johnson, I. G., & Owen, J. V. (2004). Genetic variation in growth, stem straightness and wood properties in Eucalyptus dunnii trials in northern New South Wales. *Forest Genetics*, *11*, 1–12.

Bariska, M. (1992). Collapse phenomena in eucalypts. *Wood Science and Technology*, *26*(3). https://doi.org/10.1007/bf00224290

Batista, D. C., Klitzke, R. J., Rocha, M. P. da, & Batista, T. R. (2016). ensaio de taxa de secagem e escore de defeitos para a predição da qualidade da secagem convencional da madeira de eucalyptus sp. – parte 2. *Floresta E Ambiente*, *23*(1), 135–141. https://doi.org/10.1590/2179-8087.046613

Famiri, A., Kabouchi, B., Abid, A., Salah, E. A., & Hakam, A. (2011). Effect of standing trees girdling on the fissurations propagation and sawing distortions for two Eucalyptus species: E. grandis and E. gomphocephala. *Physical and Chemical News*, *59*.

Gacitua, W., Ballerini, A., Lasserre, J.-P., & Bahr, D. (2007). Nanoindentaciones y ultraestructura en madera de Eucalyptus nitens con micro y meso grietas. *Maderas. Ciencia Y Tecnología*, *9*, 259–270. https://doi.org/10.4067/S0718-221X2007000300006

Gao, Y., Fu, Z., Fu, F., Zhou, Y., Gao, X., & Zhou, F. (2023). The formation mechanism of microcracks and fracture morphology of wood during drying. *Drying Technology*, *41*, 1–10. https://doi.org/10.1080/07373937.2022.2139270

Harwood, C., Bush, D., Butcher, T., Bird, R., Henson, M., Lott, R., & Shaw, S. (2007). Achievements in forest tree genetic improvement in Australia and New Zealand 4: tree improvement for low-rainfall farm forestry. *Australian Forestry*, *70*, 23–27. https://doi.org/10.1080/00049158.2007.10676258

Hernández, M., Constantino, Z., & Monteoliva, S. (2014a). Efecto de las tensiones de crecimiento en el rendimiento y calidad del aserrado de Eucalyptus dunnii. *Maderas. Ciencia Y Tecnología*, *16*(4), 403–412. https://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-221X2014000400003

Hernández, M., Constantino, Z., & Monteoliva, S. (2014b). Tensiones de crecimiento y propiedades físicas de la madera de Eucalyptus dunnii implantado en Argentina. *Maderas. Ciencia Y Tecnología*, *16*(3), 373–384. https://www.scielo.cl/scielo.php?pid=S0718-221X2014000300011&script=sci_arttext

Marchesan, R., Tecchio, M. M., Loiola, P. L., Juizo, C. G. F., Pereira da Rocha, M., & Klitzke, R. J. (2015). Avaliação das técnicas de anelamento e inserção de sabre em árvores de eucalyptus grandis visando maior qualidade da madeira serrada. *Floresta*, *45*(4), 695. https://doi.org/10.5380/rf.v45i4.35776

Murphy, T., Henson, M., & Vanclay, J. (2005). Growth stress inEucalyptus dunnii. *Australian Forestry*, *68*, 144–149. https://doi.org/10.1080/00049158.2005.10674958

Paludeto, J. G. Z., Grattapaglia, D., Estopa, R. A., & Tambarussi, E. V. (2021). Genomic relationship–based genetic parameters and prospects of genomic selection for growth and wood quality traits in Eucalyptus benthamii. *Tree Genetics & Genomes*, *17*(4). https://doi.org/10.1007/s11295-021-01516-9

Samistraro, G., Hart, P., Colodette, J., & Paim, R. (2015). Chemical, anatomical, and technology aspects of Eucalyptus benthamii and Eucalyptus dunii for use in an integrated pulp and paper mill. *TAPPI Journal*, *14*, 73–81. https://doi.org/10.32964/TJ14.2.73

Severo, E. T. D., Tomaselli, I., Calonego, F. W., Ferreira, A. L., & Mendes, L. M. (2013). Effect of steam thermal treatment on the drying process of Eucalyptus dunnii variables. *Cerne*, *19*(4), 637–645. https://doi.org/10.1590/s0104-77602013000400014

Souza, B. M. de, Abreu, L. M. de, Pappas, M. de C. R., Azevedo, V., Santos, P. E. T. dos, Sousa, V. A. de, Santos, R. F. dos, Lopes, M. T. G., & Aguiar, A. V. (2023). Using of relatedness and heritability in a Eucalyptus benthamii trial for conservation and breeding. *Crop Breeding and Applied Biotechnology*, *23*(4). https://doi.org/10.1590/1984-70332023v23n4a43

Thomas, D., Henson, M., Joe, B., Boyton, S., & Dickson, R. (2007). *Growth and wood quality of plantation grown Eucalyptus dunnii*.

Tomio, G. F., Cunha, A. B. da, Brand, M. A., & Córdova, U. de A. (2021). Rendimento e qualidade da madeira de Eucalyptus benthamii Maiden et Cambage de rotação longa no processo de desdobro. *Scientia Forestalis*, *49*(132). https://doi.org/10.18671/scifor.v49n132.01

Valenzuela, P., Bustos, C., Pierre Lasserre, J., & Gacitúa, W. (2012). Fracturas en madera de Eucalyptus nitens: Efecto de las propiedades mecánicas a nivel ultraestructural y de la anatomía celular. *Maderas. Ciencia Y Tecnología*, *14*(2), 225–238. https://doi.org/10.4067/s0718-221x2012000200009

Yang, L., & Liu, H. (2018). A review of eucalyptus wood collapse and its control during drying. *BioResources*, *13*, 2171–2181. https://doi.org/10.15376/biores.13.1.Yang

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Recuperação e reuso de solvente na análise de extrativos da madeira de eucalipto

Laura da Silva Rocha[1]; Dalton Longue Júnior[1]; Bruno Oliveira Moreira[2]; Elen de Sousa Barbosa[1]; Stéfany Vieira Silva[1]; Victor Vinícius Sousa Martinelli Sales[1]

[1] Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia
[2] Universidade Federal da Bahia

Resumo: A acetona é um dos principais solventes utilizados na determinação dos extrativos da madeira devido à sua elevada capacidade de solubilização, baixo custo e ampla aplicação laboratorial. Entretanto, o elevado consumo desse solvente gera custos operacionais e impactos ambientais relacionados à sua produção e descarte. O presente estudo avaliou a viabilidade técnica do reaproveitamento da acetona utilizada na extração de extrativos da madeira de *Eucalyptus* sp. O solvente foi recuperado após cada ciclo de extração em aparelho Soxhlet e reutilizado em quatro ciclos consecutivos. O teor de extrativos foi determinado pelos métodos de pesagem da serragem e do balão. Além disso, amostras da acetona recuperada foram analisadas por CG-EM para verificar a contaminação do solvente recuperado após os ciclos de reuso. Com base nos resultados do método do balão, não houve diferenças significativas entre a acetona reutilizada e a acetona P.A. de referência. A análise cromatográfica também demonstrou a manutenção do perfil químico do solvente ao longo dos ciclos de reutilização. Dessa forma, o reaproveitamento da acetona mostrou-se uma alternativa técnica viável para análises de extrativos da madeira, e ambientalmente desejável.

Palavras-chave: Composição química; Cromatografia; Sustentabilidade

Recovery and reuse of solvent in wood extractives analysis

Abstract: Acetone is one of the main solvents used in the determination of wood extractives due to its high solvation capacity, low cost, and wide laboratory application. However, the high consumption of this solvent generates operational costs and environmental impacts related to its production and disposal. This study evaluated the technical feasibility of reusing acetone used in the extraction of extractives from *Eucalyptus* sp. wood. The solvent was recovered after each extraction cycle in a Soxhlet apparatus and reused in four consecutive cycles. The extractives content was determined by two weighing sawdust methods: sawdust and flask methods. In addition, samples of the recovered acetone were analyzed by GC-MS to verify the contamination of the recovered solvent after the reuse cycles. The results indicated that, using the flask method, there were no significant differences between the reused acetone and the reference analytical grade acetone. Chromatographic analysis also demonstrated the maintenance of the solvent's chemical profile throughout the reuse cycles. Thus, the reuse of acetone proved to be a technically viable alternative for analyzing wood extractives, and is also environmentally desirable.

Keywords: Chemical Composition; Chromatography; Sustainability

1. Introdução

A acetona é produzida principalmente pelo processo de peroxidação do cumeno ou pela desidrogenação do álcool isopropílico (2-propanol). Entretanto, esses métodos apresentam desvantagens econômicas e ambientais, uma vez que demandam elevadas temperaturas e pressões durante o processo produtivo (Alvarez-Amparán e Cedeño-Caero, 2014; Quesada et al., 2014). Além disso, estima-se que os países industrializados realizem o tratamento adequado de menos de 4% dos solventes utilizados, embora aproximadamente 87,4% desses compostos apresentem potencial de reciclagem (Lau e Koenig, 2001). Nesse contexto, torna-se essencial o desenvolvimento de técnicas sustentáveis e eficientes para a recuperação e reutilização de solventes orgânicos.

Amplamente utilizada em laboratórios de pesquisa como agente de limpeza e solvente orgânico, a acetona apresenta baixa toxicidade, miscibilidade em água, elevada capacidade de solubilização de compostos orgânicos e custo relativamente baixo (Munday et al., 2026). Na análise de extrativos da madeira, a utilização de solventes orgânicos é necessária para a extração dos diversos compostos presentes na matriz lignocelulósica (TAPPI T 204 cm-17, 2017). Devido às suas propriedades físico-químicas, a acetona destaca-se como um dos solventes mais empregados para essa finalidade.

Apesar de sua eficiência, a utilização da acetona em análises laboratoriais resulta em um consumo significativo de solvente, especialmente em estudos que envolvem muitas amostras (Brito et al., 2025). A recuperação da acetona pode ser realizada por processos de separação, como a destilação, possibilitando sua reutilização em novas análises laboratoriais (Weires et al., 2011). Contudo, para que o seu reuso seja viável, é necessário avaliar se as propriedades do solvente recuperado permanecem adequadas e se sua eficiência na extração dos compostos da madeira não é comprometida ao longo de sucessivos ciclos de utilização.

Nesse sentido, a aplicação de técnicas capazes de identificar possíveis substâncias contaminantes presentes no solvente recuperado torna-se fundamental. A Cromatografia Gasosa acoplada à Espectrometria de Massas (CG-EM) é uma técnica analítica de alta resolução amplamente utilizada para a separação, identificação e caracterização de compostos orgânicos voláteis e semivoláteis (Silvério, 2008). Dessa forma, a técnica possibilita a avaliação da composição química do solvente recuperado e a detecção de eventuais contaminantes oriundos do processo de extração.

Assim, o objetivo deste trabalho foi reaproveitar a acetona empregada na extração de extrativos da madeira de eucalipto e avaliar a viabilidade técnica de reuso após sucessivos ciclos de utilização.

2. Material e métodos

2.1 Local de estudo e materiais utilizados

Foram utilizados cavacos de *Eucalyptus* sp. provenientes do processo industrial de fábricas de polpa celulósica localizada no Extremo Sul da Bahia. Os cavacos foram previamente classificados em equipamento laboratorial e quarteados, para garantir representatividade e homogeneidade das amostras.

Posteriormente, os cavacos foram transformados em serragem utilizando um moinho de facas do tipo Willey. A serragem foi classificada em peneiras de 40-60 mesh, sendo utilizado a fração retida na peneira de 60 mesh (TAPPI T 257, 2012).

2.2 Determinação do teor de extrativos

Para a determinação do teor de extrativos da madeira de *Eucalyptus*, foram pesadas aproximadamente 2,000 g de serragem da fração selecionada em balança analítica. Em seguida, seis amostras foram submetidas à extração em aparelho do tipo Soxhlet durante cinco horas, utilizando-se 150 mL de acetona como solvente extrator em cada amostra, conforme os procedimentos descritos na norma TAPPI T 204 cm-17.

O teor de extrativos foi determinado por dois métodos gravimétricos: o método do balão e o método da serragem. No método do balão, o teor de extrativos foi obtido pela quantificação da massa de extrativos depositada no balão de vidro após a evaporação do solvente. Já no método da serragem, o teor de extrativos foi calculado com base na diferença entre a massa seca das amostras antes e após o processo de extração, representando a quantidade de compostos removidos pelo solvente.

2.3 Avaliação do uso da acetona regenerada

Para este estudo, foi utilizado o solvente acetona P.A, fórmula química $(CH_3)_2CO$ e massa molar de 58,08 g mol^{-1}. Após cada ciclo de extração no sistema Soxhlet, o solvente foi recuperado (aproximadamente 130 mL por amostra) por um sistema de refluxo e armazenado em recipiente apropriado (Figura 1).

A acetona recuperada foi, então, misturada em recipiente adequado, esfriada, completada com acetona nova em quantidade para mais seis extrações, e a mistura final foi reutilizada em quatro ciclos consecutivos de extração, sob as mesmas condições experimentais

que utilizou o solvente puro inicial. Após cada ciclo de reutilização, foi coletada uma amostra de 1 mL do solvente recuperado para análise de contaminação.



Figura 1 -Sistema de extração Soxhlet, evidenciando o sistema de refluxo e recuperação do solvente acetona.

2.4 Análise qualitativa da acetona regenerada

Após cada ciclo de extração, foi coletada uma alíquota de 1 mL da acetona recuperada, a qual foi transferida para microtubos do tipo eppendorf. As amostras foram encaminhadas aos Laboratórios de Química Orgânica e de Análise Instrumental da Universidade Federal da Bahia (UFBA), *campus* Anísio Teixeira, onde foram submetidas à análise por Cromatografia Gasosa acoplada à Espectrometria de Massas (CG-EM), com o objetivo de identificar possíveis substâncias presentes no solvente recuperado.

Previamente às análises cromatográficas, as amostras foram submetidas ao processo de derivatização. Para isso, foram adicionados 60 µL de piridina e 100 µL de BSTFA (N,O-bis(trimetilsilil)trifluoroacetamida), contendo aproximadamente 1% de clorotrimetilsilano (TMCS), aos microtubos contendo as amostras. A mistura reacional foi aquecida a 70 °C durante 30 minutos. Posteriormente, foi injetado um volume de 1 µL de cada amostra no cromatógrafo. Foram analisadas a acetona P.A. (utilizada como referência) e as amostras correspondentes à primeira, terceira e quarta reutilizações da acetona regenerada.

As análises por CG-EM foram realizadas em um cromatógrafo gasoso modelo GC-2010 Plus acoplado a um espectrômetro de massas QP2010SE, ambos da Shimadzu. Foi utilizada uma coluna capilar de sílica fundida Rtx-5MS (30 m × 0,25 mm de diâmetro interno × 0,25 µm de espessura de filme). O gás de arraste empregado foi hélio com pureza de 99,9%, sob vazão constante de 1,0 mL min^{-1}.

O injetor operou em modo split com razão de divisão de fluxo de 1:10. As condições cromatográficas consistiram em temperatura do injetor de 290 °C e programação de temperatura do forno iniciando em 80 °C, mantida por 5 minutos, seguida de aquecimento à taxa de 4 °C min^{-1} até 285 °C, permanecendo nessa temperatura por 40 minutos. O tempo total de corrida cromatográfica foi de 90 minutos.

A ionização foi realizada por impacto de elétrons (EI) a 70 eV, com aquisição de espectros na faixa de massa de 30 a 600 m/z. A identificação dos compostos presentes nas amostras foi realizada por comparação dos espectros de massas obtidos com aqueles disponíveis na biblioteca espectral NIST08.LIB.

2.5 Análise estatística dos dados

Os dados referentes ao teor de extrativos das seis amostras de serragem por quatro ciclos com acetona regenerada foram submetidos à análise estatística, utilizando-se a acetona P.A. como tratamento referência. As comparações entre o tratamento referência e os diferentes ciclos de reutilização da acetona foram realizadas por meio do teste de Dunnett, com nível de significância de 5% ($p \leq 0,05$).

Adicionalmente, os compostos identificados nas análises CG-EM foram avaliados de forma qualitativa. Os espectros obtidos para as amostras de acetona regenerada foram comparados com aqueles observados para a acetona P.A., visando identificar a presença de substâncias que poderiam ser acumuladas ao longo dos sucessivos ciclos de reutilização do solvente.

3. Resultados e discussão

A avaliação do reaproveitamento da acetona demostrou comportamentos distintos entre os métodos de pesagem (Tabela 1). Pelo método da serragem, apenas o primeiro ciclo de reutilização da acetona apresentou teor de extrativos superior ao da acetona P.A (3,2 %). A partir do segundo ciclo, houve redução significativa do teor de extrativos extraídos, ou seja, uma possível perda da eficiência do solvente após sucessivas reutilizações.

Por outro lado, pelo método do balão (norma Tappi), não foram observadas diferenças estatísticas entre a acetona P.A. e os solventes reutilizados. Os teores de extrativos variaram entre 2,4 e 2,9%, valores próximos ao obtido para a acetona de referência (2,6%). Esses resultados indicam que, sob as condições avaliadas, a reutilização da acetona não comprometeu significativamente a determinação do teor de extrativos quando empregada a metodologia do balão.

Tabela 1 – Teor de extrativos (%) após ciclos de reuso da acetona

	Teor de extrativos (%)	
Ciclos	**Serragem**	**Balão**
1	$3,2 \pm 0,1^{*}$	$2,6 \pm 0,2^{ns}$
2	$1,7 \pm 0,1^{*}$	$2,9 \pm 0,2^{ns}$
3	$1,5 \pm 0,1^{*}$	$2,7 \pm 0,1^{ns}$
4	$1,9 \pm 0,1^{*}$	$2,4 \pm 0,04^{ns}$
Acetona P.A (referência)	**2,6 ± 0,1**	**2,6 ± 0,2**

* diferenças estatisticas da referência; ^{ns} sem diferenças estatísticas em relação a referência, pelo Teste de Dunnett com nível de significância de 5% ($p \leq 0,05$).

A diferença entre os métodos está relacionada às diferenças inerentes aos procedimentos de quantificação. Enquanto o método da serragem avalia a variação de massa da amostra antes e após a extração, estando sujeito a interferências associadas ao manuseio da serragem, o método do balão quantifica diretamente a massa de extrativos após a evaporação do solvente (Medeiros, 2024). Dessa forma, o método do balão segue plenamente a norma Tappi e apresenta menor variação dos resultados para avaliar a eficiência do reaproveitamento do solvente.

Por outro lado, o método da serragem pode ser uma alternativa para a realização de uma maior quantidade de amostras desde que novas avaliações sejam feitas a fim de compreender melhor a tendência de redução do teor de extrativos.

A análise qualitativa por CG-EM (Figura 2) mostrou que, mesmo após sucessivos ciclos de regeneração da acetona, não houve alterações expressivas no perfil cromatográfico do solvente recuperado. Em todos os ciclos avaliados foram identificados os mesmos compostos majoritários, com destaque para um derivado associado a álcool terpênico cíclico e um éter álcool behenílico, ambos com baixa similaridade espectral. Entretanto, apesar da detecção

desses compostos residuais, os cromatogramas apresentaram perfil semelhante à acetona P.A, ou seja, o reaproveitamento da acetona é viável para aplicação laboratorial e industrial.

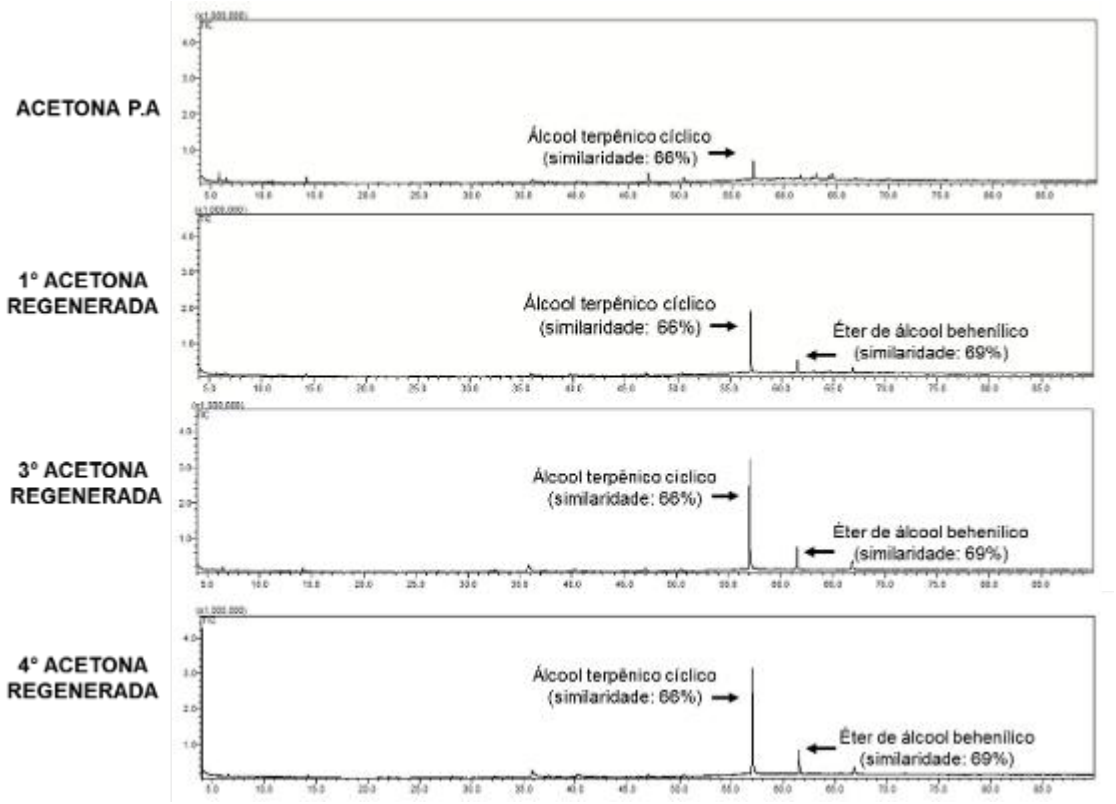


Figura 2 – Perfil cromatográfico obtido por CG-EM da acetona P.A. e da acetona regenerada após diferentes ciclos de reutilização no processo de extração de extrativos da madeira de eucalipto.

A recuperação e reutilização de solventes residuais orgânicos são essenciais para melhorar a sustentabilidade e a circularidade dos processos industriais (Aboagye et al., 2021). Haripriya et al. (2024) mostraram que a reutilização da acetona apresentou viabilidade técnica mesmo após o contato com resíduos orgânicos, mostrando que processos de recuperação podem manter características adequadas do solvente para novas aplicações de análises.

Nesse sentido, a reutilização do solvente acetona na análise do teor de extrativos da madeira de eucalipto representa uma alternativa tecnicamente viável e ambientalmente favorável, especialmente para aplicações laboratoriais e industriais que demandam elevado consumo de solventes orgânicos.

4. Conclusões

A avaliação do reuso da acetona demonstrou que o solvente pode ser reutilizado em até quatro ciclos sem comprometer significativamente os resultados obtidos pelo método do balão.

5. Agradecimentos

A Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia (UESB) pela concessão da bolsa. Ao Laboratório de Tecnologia de Produtos Florestais (WoodTech) e Universidade Federal da Bahia (UFBA) pela concessão dos equipamentos necessários para o desenvolvimento da pesquisa.

6. Referências bibliográficas

Abogye, E. A., Chea, J. D.; & Yenkie, K. M. (2021). Systems level roadmap for solvent recovery and reuse in industries. iScience, 24(10). https://doi.org/10.1016/j.isci.2021.103114

Alvarez-Amparán, M.A.; & Cedeño-Caero, L. (2014). Efecto del hidroperóxido de cumeno sobre la desulfuración oxidativa. Revista Mexicana de Ingeniería Química, 13(3), 787-797. ISSN 1665-2738

Brito, E. C. T., Diaz, C. E. B., Córdoba, L. I. A., Uribe, B. A. F.; & Casados, D. A. S. (2025). Recovery and reuse of acetone from pharmaceutical industry waste by solar distillation. Processes, 13(2). https://doi.org/10.3390/pr13020361

Haripriya, M., Vijayakumar, K.; & Vijayakumar, S. (2024). Acetone reclamation: an affordable and practical approach to recycle impure acetone from plastination. International Journal of Anatomy and Research, 12(1), 8815-8819. https://dx.doi.org/10.16965/ijar.2023.218

Lau, P. K. W.; & Koenig A. (2001). Management, disposal and recycling of wast industrial organic solvents in Hong Kong. Chemosphere, 44(1), 9-15. https://doi.org/10.1016/S0045-6535(00)00378-7

Munday, E. S., Gredia, N., Towner, M.; & Gacki, C. (2026). Acetone recycling: a case study in the undergraduate teaching laboratory. RSC Sustainability, v. 4, 779-784. https://doi.org/10.1039/d5su00926j

Medeiros, N. C. G. (2024). Estudo dos extrativos e da casca de eucalipto e seus impactos na indústria de polpa Kraft (Dissertação de mestrado). Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia.

Quesada, J., Faba, L., Díaz, E.; & Ordóñez, S. (2014). La biomassa como alternativa al petróleo para la obtención de productos químicos: acetona y etanol como moléculas plataforma. Avances em Ciencias e Ingeniería, 5(2), 31-49. ISSN 0718-8706

Silvério, F. O. (2008). Caracterização de extrativos de madeira de *Eucalyptus* e depósitos de *pitch* envolvidos na fabricação de papel e celulose (Tese de doutorado). Universidade Federal de Minas Gerais.

Technical association of the pulp and paper industry. (2017). TAPPI T 204 cm-17. Solvent extractives of wood and pulp.

Weires, N. A., Johnston, A., Warner, D. L., McCormick, M. M., Hammond K.; & McDougal, O. M. (2011). Recycling of waste acetone by fractional distillation. Journal of Chemical Education, 88(12), 1724-1726. https://doi.org/10.1021/ed2001158

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Relação entre a proporção de cerne e variáveis dendrométricas e tecnológicas em árvores jovens de eucalipto

Bruno Mendes Pereira Carlos[1]; Yasmin Aparecida de Oliveira Figueiredo[1]; Maria Clara Fontes Amichi[1]; Stéffany de Lima Araujo[1]; Natielly Cristine Gomes de Medeiros[1]; Thayanne Caroline Castor Neto[1]; Aguinaldo José de Souza[2]; Graziela Baptista Vidaurre[1]

[1] Universidade Federal do Espírito Santo, Jerônimo Monteiro, ES
[2] Suzano S. A., Aracruz, ES

Resumo: A formação de cerne influencia diretamente a qualidade da madeira destinada à produção de celulose, devido às diferenças químicas e anatômicas em relação ao alburno. Neste contexto, o presente estudo avaliou a relação entre o incremento médio anual (IMA), a densidade básica (DB) e o diâmetro na altura do peito (DAP) com a relação cerne/alburno (C/A) em árvores jovens de *Eucalyptus*. Foram avaliados 45 indivíduos pertencentes a 15 clones comerciais, distribuídos em plantios localizados nos estados de São Paulo, Bahia e Maranhão. A relação cerne/alburno (C/A) foi determinada em discos retirados na posição do diâmetro à altura do peito (DAP), enquanto o IMA, a densidade básica da madeira (DB) e o DAP foram correlacionados com a variável C/A por meio de regressões lineares simples. Observou-se correlação negativa entre C/A e IMA em todos os estados, sendo significativa na Bahia (r = -0,98) e no Maranhão (r = -0,97). Na análise conjunta, o IMA apresentou o maior poder explicativo da variação da relação C/A (R^2aj = 86,10%; r = -0,93), indicando que árvores com maior crescimento tendem a apresentar menor proporção relativa de cerne. A densidade básica apresentou correlação positiva significativa apenas na análise conjunta (R^2aj = 36,80%), enquanto o DAP apresentou baixo poder explicativo (R^2aj = 16,90%) e ausência de significância estatística. Os resultados demonstram que o crescimento foi a variável mais associada à formação relativa de cerne entre as avaliadas, evidenciando seu potencial como indicador na seleção de materiais genéticos para a produção de celulose.

Palavras-chave: Densidade básica; Qualidade da madeira; *Eucalyptus*.

Relationship between heartwood proportion and dendrometric and wood properties in young *Eucalyptus* trees

Abstract: Heartwood formation directly influences the quality of wood used for pulp production due to its distinct chemical and anatomical characteristics compared with sapwood. In this context, this study evaluated the relationship between mean annual increment (MAI), basic wood density (BD), and diameter at breast height (DBH) with heartwood-to-sapwood ratio (C/A) in young *Eucalyptus* trees. and heartwood proportion in young *Eucalyptus* trees. A total of 45 trees representing 15 commercial clones were evaluated in plantations located in the states of São Paulo, Bahia, and Maranhão, Brazil. The heartwood-to-sapwood ratio (H/S) was determined from discs collected at breast height (DBH), while MAI, basic wood density (BD), and DBH were correlated with the H/S ratio using simple linear regression analyses. A negative correlation between H/S and MAI was observed in all states, being significant in Bahia (r = −0.98) and Maranhão (r = −0.97). In the combined analysis, MAI showed the highest

explanatory power for the variation in the H/S ratio (adjusted R^2 = 86.10%; r = −0.93), indicating that faster-growing trees tend to exhibit a lower relative proportion of heartwood. Basic wood density showed a significant positive correlation only in the combined analysis (adjusted R^2 = 36.80%), whereas DBH showed low explanatory power (adjusted R^2 = 16.90%) and no significant relationship with the H/S ratio. The results demonstrate that growth was the variable most strongly associated with relative heartwood formation among those evaluated, highlighting its potential as an indicator for the selection of genetic materials for pulp production.

Keywords: Basic wood density; Wood quality; *Eucalyptus*.

1. Introdução

O Brasil ocupa posição estratégica na produção mundial de celulose proveniente da madeira de fibras curtas, sendo o segundo maior produtor global. A celulose representa a maior parte do valor exportado pelo setor de árvores plantadas, reforçando a importância econômica e industrial da madeira de eucalipto para o país (IBÁ, 2025).

A presença de cerne na madeira é um fator determinante para a indústria de celulose. O cerne apresenta maior teor de extrativos e lignina, o que pode dificultar o processo de polpação, sendo o alburno preferido para a produção de celulose (Almeida et al., 2020; Almeida, 2021).

Além dos fatores ambientais e de manejo, a idade das árvores desempenha papel importante na formação do cerne. À medida que ocorre o desenvolvimento da árvore, mudanças fisiológicas e estruturais promovem alterações nas características da madeira, refletindo na proporção de cerne presente no tronco. Estudos realizados com eucalipto indicam que o avanço da idade está associado a modificações na produção de cerne e na qualidade da madeira, evidenciando a necessidade de considerar esse fator em avaliações voltadas ao uso industrial da matéria-prima (Santos et al., 2024).

Diante desse contexto, ainda são escassas as informações sobre a influência do crescimento das árvores na formação de cerne em povoamentos jovens de *Eucalyptus*. Levantou-se a hipótese de que árvores com maior incremento médio anual apresentam menor proporção de cerne. Assim, o objetivo deste trabalho foi avaliar a relação entre a proporção de cerne e o incremento médio anual, a densidade básica da madeira e o diâmetro à altura do peito em árvores jovens de *Eucalyptus*.

2. Material e métodos

Área de estudo e amostragem

O estudo foi conduzido em plantios comerciais de *Eucalyptus* localizados nos estados de São Paulo (SP), Bahia (BA) e Maranhão (MA), representativos de importantes regiões produtoras de madeira para celulose no Brasil. Foram avaliados quinze clones comerciais pertencentes às espécies *Eucalyptus grandis*, *Eucalyptus urophylla*, *Eucalyptus platyphylla*, *Eucalyptus brassiana* e *Eucalyptus tereticornis*.

A classificação climática seguiu o sistema de Köppen (1936), conforme atualização de Alvares et al. (2013). Os plantios de São Paulo situavam-se em clima Cfa, altitude de 700 m e solos profundos de textura arenosa a argilosa. Na Bahia, os materiais foram cultivados em clima Af, altitudes entre 50 e 150 m e solos de textura média a argilosa. No Maranhão, predominou o clima Am, com altitude de 150 m e solos de textura arenosa a argilosa. O espaçamento variou entre 5 e 11 m² por planta, de acordo com as características de cada sítio (Stape et al., 2004).

Foram selecionadas três árvores por clone, totalizando 45 indivíduos com aproximadamente seis anos de idade. A seleção foi baseada no diâmetro médio do povoamento obtido no inventário florestal, desconsiderando-se as duas primeiras linhas de bordadura. A altura comercial foi definida considerando diâmetro mínimo de 5 cm. De cada árvore foram coletados cinco toretes para determinação da densidade básica da madeira por cavacos e um disco de aproximadamente 3,5 cm de espessura na altura do peito (DAP; 1,30 m do solo), destinado às análises de cerne e alburno.

Incremento Médio Anual (IMA)

O incremento médio anual (IMA), expresso em $m^3\ ha^{-1}\ ano^{-1}$, foi determinado a partir da cubagem rigorosa de árvores representativas de cada talhão. O fuste foi dividido em seções de comprimento conhecido (L), sendo mensurados os diâmetros com e sem casca nas extremidades de cada seção. O volume individual foi estimado pelo método de Smalian (Soares et al., 2011), conforme a Equação 1.

$$V = \sum_{i=1}^{n} \frac{(Ai + Ai+1)}{2} \times L \qquad \text{Equação 1}$$

em que V corresponde ao volume individual de madeira (m^3), Ai e Ai+1 representam as áreas seccionais nas extremidades de cada seção (m^2), e L corresponde ao comprimento da seção (m).

O volume de madeira por hectare foi obtido considerando a densidade de plantio de cada área e, posteriormente, dividido pela idade do povoamento, obtendo-se o incremento médio anual (Equação 2).

$$IMA = \frac{V}{Idade} \qquad \text{Equação 2}$$

Densidade básica da madeira

A densidade básica da madeira foi determinada utilizando amostras representativas obtidas a partir dos cavacos produzidos dos cinco toretes coletados em cada árvore, conforme os procedimentos descritos na ABNT NBR 11941 (ABNT, 2003).

Relação cerne/alburno

A relação cerne/alburno foi determinada em discos coletados na posição do diâmetro à altura do peito (DAP). Inicialmente, as superfícies dos discos foram polidas com lixas de granulação nº 50, 80 e 120. Em seguida, realizou-se a aspersão de água para intensificar o contraste visual entre cerne e alburno, cuja delimitação foi baseada na diferença de coloração entre essas regiões.

Posteriormente, foram traçadas duas retas perpendiculares entre si, passando pela medula e atravessando toda a seção transversal do disco, permitindo a estimativa das áreas de cerne e de alburno conforme a metodologia proposta por Brito et al. (2019). A proporção de cerne foi calculada pela relação percentual entre a área de cerne e a área total do disco, incluindo a casca. A relação cerne/alburno (C/A) foi obtida pela razão entre as áreas de cerne e alburno (Equação 3).

$$C/A = \frac{Área\ de\ cerne}{Área\ de\ alburno} \qquad \text{Equação 3}$$

Análise estatística

A relação entre a razão cerne/alburno (C/A) e as variáveis incremento médio anual (IMA), densidade básica da madeira (DB) e diâmetro à altura do peito (DAP) foi avaliada por meio de regressões lineares simples, considerando separadamente os estados de São Paulo, Bahia e Maranhão, bem como o conjunto dos dados. Para cada modelo foram obtidas a equação de regressão, o coeficiente de correlação de Pearson (r) e o coeficiente de determinação ajustado (R^2aj). A significância dos modelos foi avaliada por meio da análise de variância da regressão (teste F), adotando-se nível de significância de 5% ($p < 0,05$).

3. Resultados e discussão

Os plantios de São Paulo apresentaram os maiores valores médios de incremento médio anual (63,2 $m^3\ ha^{-1}\ ano^{-1}$), enquanto o Maranhão apresentou os menores (34,4 $m^3\ ha^{-1}\ ano^{-1}$). Em contrapartida, a relação cerne/alburno (C/A) apresentou comportamento inverso, aumentando de 0,76 em São Paulo para 1,23 no Maranhão (Tabela 1).

Tabela 1 - Estatísticas descritivas das variáveis incremento médio anual (IMA), idade, diâmetro à altura do peito (DAP), densidade básica da madeira (DB) e relação cerne/alburno (C/A) dos materiais genéticos avaliados nos estados de São Paulo (SP), Bahia (BA) e Maranhão (MA).

Estado	IMA ($m^3\ ha^{-1}\ ano^{-1}$)	Idade (anos)	DAP (cm)	DB (kg/m^3)	C/A
SP	63,2 ± 7,4	6,3 ± 0,8	20,1 ± 4,1	397 ± 19	0,76 ± 0,26
BA	46,4 ± 8,3	5,8 ± 0,5	25,3 ± 2,4	412 ± 14	1,03 ± 0,18
MA	34,4 ± 8,9	5,9 ± 0,5	21,4 ± 4,2	438 ± 30	1,23 ± 0,23

Observou-se correlação negativa entre C/A e IMA em todos os estados avaliados, indicando que árvores com maior incremento médio anual tendem a apresentar menor proporção relativa de cerne. Essa tendência foi mais evidente na Bahia e no Maranhão, com R^2aj superiores a 90% e correlações significativas (r = -0,98 e -0,97, respectivamente). Em São Paulo, embora a correlação tenha sido elevada (r = -0,84), não houve significância estatística (Figura 1).

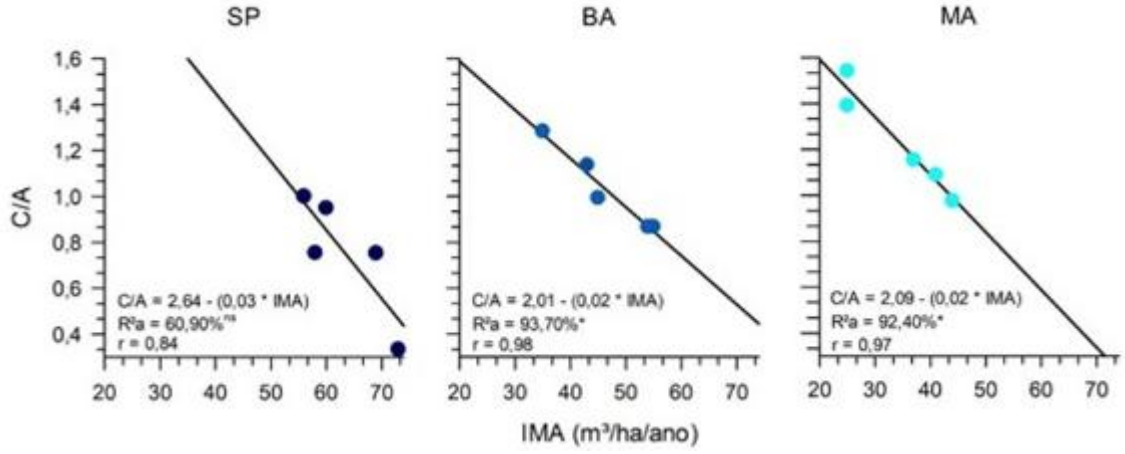


Figura 1 – Correlação entre a relação cerne/alburno (C/A) e o incremento médio anual (IMA) para os estados de São Paulo (SP), Bahia (BA) e Maranhão (MA). ns = não significativo ($p \geq 0,05$); * = significativo ($p < 0,05$).

Almeida et al. (2020) e Nunes et al. (2026) demonstraram que a formação de cerne depende da interação entre material genético e ambiente, podendo aumentar ou diminuir conforme a disponibilidade hídrica e as características dos clones. Além disso, Santos et al. (2021) e Santos et al. (2024) verificaram que idade e manejo silvicultural também influenciam significativamente esse processo, evidenciando que o crescimento representa apenas um dos fatores envolvidos na formação do cerne.

A densidade básica apresentou comportamento distinto daquele observado para o IMA. Nos estados avaliados separadamente, as correlações entre DB e C/A foram positivas, porém não significativas, indicando que a variação da densidade dentro de cada ambiente não explicou a formação relativa de cerne (Figura 2).

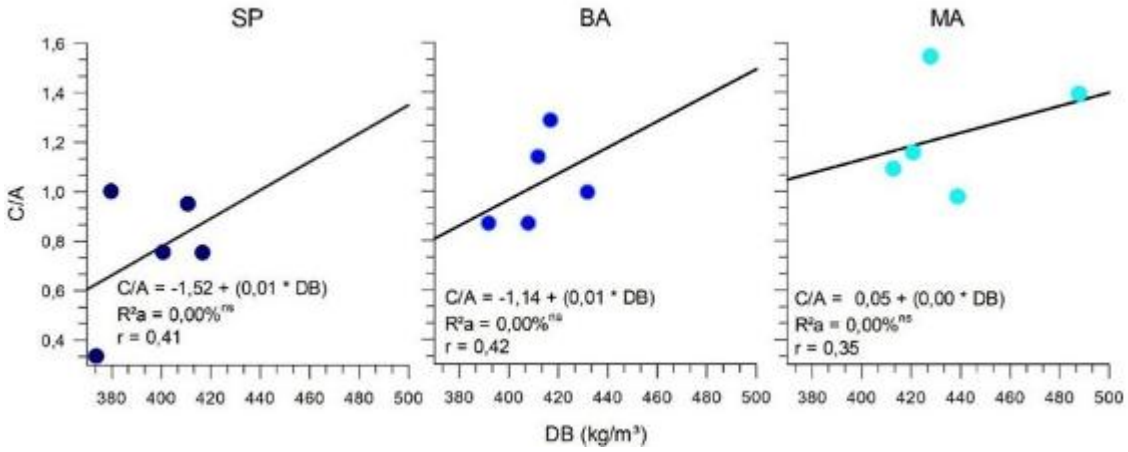


Figura 2 – Correlação entre a relação cerne/alburno (C/A) e a densidade básica (DB) para os estados de São Paulo (SP), Bahia (BA) e Maranhão (MA). ns = não significativo ($p \geq 0,05$); * = significativo ($p < 0,05$).

Resultados semelhantes foram identificados por Almeida et al. (2023) e Elissetche et al. (2024), que encontaram forte influência do ambiente sobre a densidade básica da madeira. Assim, a densidade não deve ser utilizada isoladamente como indicador da formação de cerne.

A relação entre C/A e DAP apresentou elevada variação entre os estados, porém nenhuma regressão foi significativa (Figura 3), indicando que o diâmetro foi a variável menos eficiente para explicar a formação relativa de cerne.

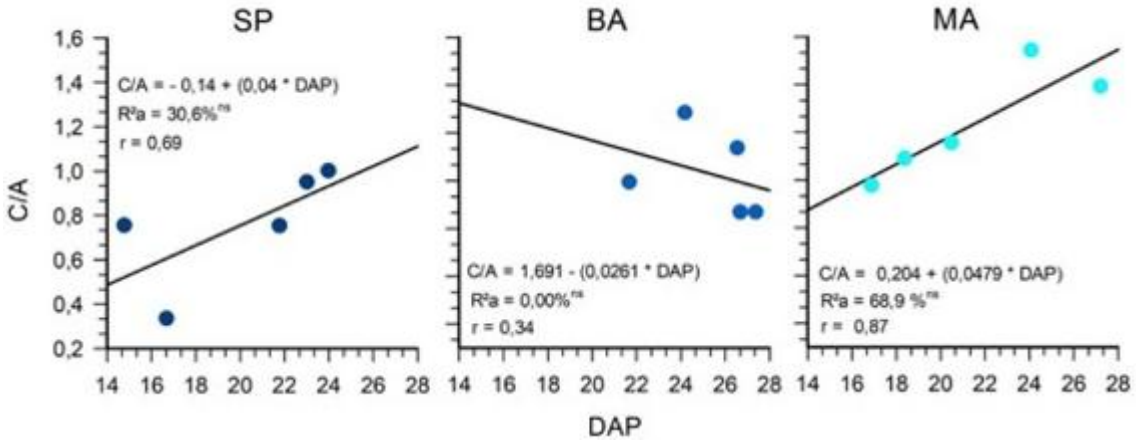


Figura 3 – Correlação entre a relação cerne/alburno (C/A) e o diâmetro na altura do peito (DAP) para os estados de São Paulo (SP), Bahia (BA) e Maranhão (MA). ns = não significativo ($p \geq 0,05$); * = significativo ($p < 0,05$).

Embora as árvores de maior diâmetro possam apresentar maior área de cerne, o crescimento em diâmetro também promove aumento do alburno, responsável pela condução de água e sustentação da copa. Dessa forma, árvores com DAP similar podem apresentar diferentes relações C/A em função da idade, do material genético, das condições ambientais e do histórico de crescimento (Nunes et al., 2026; Santos et al., 2021).

O IMA foi a variável que melhor explicou a relação cerne/alburno (R^2aj = 86,10%), seguido da densidade básica (36,80%) e do DAP (16,90%). Para a indústria de celulose, a combinação entre maior produtividade e menor relação C/A pode representar maior participação relativa de alburno, característica potencialmente favorável ao processo de polpação. Contudo, a seleção de materiais deve considerar também as propriedades químicas da madeira, uma vez que o cerne apresenta maiores teores de extrativos e lignina, fatores que podem dificultar a impregnação dos cavacos e aumentar o consumo de reagentes.

4. Conclusões

O incremento médio anual apresentou forte relação negativa com a relação cerne/alburno em árvores jovens de *Eucalyptus*, sendo a variável de maior capacidade explicativa da formação relativa de cerne entre as demais avaliadas.

A densidade básica e o DAP não explicaram a variação da relação cerne/alburno, demonstrando que essas variáveis não devem ser utilizadas isoladamente para estimar a formação de cerne.

Os resultados indicam que materiais de maior produtividade tendem a apresentar menor proporção relativa de cerne, característica potencialmente favorável à indústria de celulose. Entretanto, a formação de cerne pode ser influenciada pela interação entre crescimento, material genético e ambiente, devendo esses fatores ser considerados conjuntamente na seleção de materiais genéticos.

5. Agradecimentos

Os autores agradecem à Universidade Federal do Espírito Santo (UFES) e ao Núcleo de Pesquisa em Qualidade da Madeira (NUQMAD) pelo suporte científico, infraestrutura e apoio à realização desta pesquisa. Agradecem, ainda, à Suzano S.A. pela disponibilização do material experimental e pelo apoio ao desenvolvimento do estudo.

6. Referências bibliográficas

Almeida, M. N. F. (2021). Efeito do clima nas características e propriedades da madeira de um clone de Eucalyptus urophylla (Tese de doutorado). Universidade Federal do Espírito Santo.

Almeida, M. N. F., Vidaurre, G. B., Moulin, J. C., Arantes, M. D. C., Oliveira, J. T. S., Carneiro, A. C. O., & Hein, P. R. G. (2020). Heartwood variation of Eucalyptus urophylla is influenced by climatic conditions. Forest Ecology and Management, 458, 117743. https://doi.org/10.1016/j.foreco.2019.117743

Almeida, M. N. F., Vidaurre, G. B., Moulin, J. C., Arantes, M. D. C., Hein, P. R. G., & Oliveira, J. T. S. (2023). Wood density variations of E. urophylla clone among growth sites are related to climate. Canadian Journal of Forest Research, 53(5), 343–353. https://doi.org/10.1139/cjfr-2022-0037

Alvares, C. A., Stape, J. L., Sentelhas, P. C., Gonçalves, J. L. M., & Sparovek, G. (2013). Köppen's climate classification map for Brazil. Meteorologische Zeitschrift, 22(6), 711–728.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2003). NBR 11941: Madeira: Determinação da densidade básica. ABNT.

Brito, A. S., Vidaurre, G. B., Oliveira, J. T. S., Silva, J. G. M., Rodrigues, B. P., & Carneiro, A. C. O. (2019). Effect of planting spacing in production and permeability of heartwood and sapwood of Eucalyptus wood. Floresta e Ambiente, 26(1), 1–9.

Elissetche, J. P., Alzamora, R. M., Espinoza, Y., Emhart, V., Picheira, M., Medina, A., & Rubilar, R. (2024). Wood basic density assessment of Eucalyptus genotypes growing under contrasting water availability conditions. Forests, 15(1), 185. https://doi.org/10.3390/f15010185

Indústria Brasileira de Árvores. (2025). Relatório anual 2025. IBÁ.

Köppen, W. (1936). Das geographische System der Klimate. In W. Köppen & R. Geiger (Eds.), Handbuch der Klimatologie (pp. 1–44). Gebrüder Borntraeger.

Nunes, S. M. V., Araujo, S. L., Conceição, G. J., Neto, T. C. C., Gimenez, G. G., Figueiredo, Y. A. O., Silva, R. G. C., Souza, A. J., Gominho, J., Lourenço, A., Neiva, D. M., Almeida, M. N. F., & Vidaurre, G. B. (2026). Effect of contrasting climatic conditions in Brazil on heartwood and sapwood production and chemistry in young Eucalyptus clones. European Journal of Forest Research, 145, 93. https://doi.org/10.1007/s10342-026-01927-0

Santos, L. M. H., Almeida, M. N. F., Silva, J. G. M., Vidaurre, G. B., Hein, P. R. G., Silva, G. F., Zanuncio, A. J. V., Fraga Filho, C. V., Campinhos, E. N., Mafia, R. G., Arantes, M. D. C., Tomazello-Filho, M., Oliveira, M. P., Rocha, Q. S., Minini, D., Melo, A. B., & Amorim, G. A. (2021). Variations in heartwood formation and wood density as a function of age and plant spacing in a fast-growing eucalyptus plantation. Holzforschung, 75(11), 979–988. https://doi.org/10.1515/hf-2020-0215

Santos, V. B., Conceição, G. J., Rodrigues, P. D., Cirilo, N. R. M., Almeida, M. N. F., Rocha, M. F. V., Guimarães, J. F. R., Carvalho, A. M. M. L., Gomes, F. J. B., Marcelino, P. R. C., Barbosa, V. O. P., Neto, T. C. C., Moulin, J. C., Pedrazzi, C., & Vidaurre, G. B. (2024).

Impact of age and genotype on the quality of eucalyptus wood for dissolving pulp. Industrial Crops and Products, 218, 118930. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2024.118930

Soares, C. P. B., Paula, F., & Souza, A. L. (2011). Dendrometria e inventário florestal. Editora UFV.

Stape, J. L., Binkley, D., & Ryan, M. G. (2004). Eucalyptus production and the supply, use and efficiency of use of water, light and nitrogen across a geographic gradient in Brazil. Forest Ecology and Management, 193(1–2), 17–31.

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Relações entre o ângulo microfibrilar e as contrações lineares de *Pinus ayacahuite* Ehrenb.

Rodríguez-Rodríguez C. I.[1], Lima, J. T [2], Borja-De la Rosa A. [1], Corona-Ambriz A.[1], Machuca-Velasco R. [1].

[1] Mestrado em Ciências Florestais e Ambientais, Universidad Autónoma Chapingo, Km. 38.5 Carretera México-Texcoco, Chapingo, México.

[2] Universidade Federal de Lavras. Departamento de Ciências Florestais. Minas Gerais, Brasil.

Resumo: O ângulo microfibrilar (AMF) é um dos parâmetros mais importantes que influenciam o comportamento dimensional da madeira. O objetivo deste estudo foi analisar a correlação entre o AMF e a porcentagem de contração nos eixos radial e tangencial da madeira de *Pinus ayacahuite* Ehrenb. Para tanto, dez cubos de 1 cm³ orientados nos eixos típicos foram obtidos de uma tábua. Posteriormente, o AMF foi determinado por microscopia de luz polarizada nas faces radial e tangencial de traqueídeos, obtidos de secções histológicas maceradas. Na sequência, foram determinadas as porcentagens de contração linear tangencial, radial, axial e volumétrica total. Modelos de regressão linear simples foram ajustados, relacionando os valores de AMF e a contração correspondente aos eixos tangencial e radial os ângulos microfibrilares obtidos nas faces radial e tangencial dos traqueídeos apresentaram valores medios iguais a 18,71º e 18,04º, respectivamente. As contrações radial e tangencial foram de 3,3% e 8,1%, respectivamente. As análises de regressão do ângulo microfibrilar medido na face radial dos traqueídeos em função das contrações radiais revelaram apenas uma relação linear de dependência moderada (R^2 = 0,569; p < 0,1405).

Palavras chave: Microfibrila; instabilidade dimensional; eixos ortotrópicos.

Relationships between microfibrillar angle and linear shrinkages of *Pinus ayacahuite* Ehrenb.

Abstract: The microfibrillar angle (MFA) is one of the most important parameters influencing the dimensional behavior of wood. The aim of this study was to analyze the correlation between the microfibrillar angle and the percentage of shrinkage in the radial and tangential axes of *Pinus ayacahuite* Ehrenb wood. To this end, ten 1 cm³ cubes oriented along the typical axes were obtained from a board. Subsequently, the MFA was determined by polarized light microscopy on the radial and tangential faces of tracheids, obtained from macerated histological sections. Following this, the percentages of linear tangential, radial, axial, and total volumetric shrinkage were determined. Simple linear regression models were fitted, relating the MFA values and the corresponding shrinkage in the tangential and radial axes. The microfibrillar angles obtained on the radial and tangential faces of the tracheids presented average values of 18.71º and 18.04º, respectively. Radial and tangential shrinkages were 3.3% and 8.1%, respectively. Regression analyses of the microfibrillar angle measured in the radial phase of the tracheids as a function of radial contractions revealed only a moderate linear relationship (R2 = 0.569; p 0.1405).

Keywords: Microfibril; dimensional instability; orthotropic axes.

1. Introdução

Devido à sua natureza higroscópica e anisotrópica, a madeira perde estabilidade dimensional quando seu teor de umidade varia. A retração volumétrica corresponde às mudanças dimensionais que ocorrem abaixo do ponto de saturação das fibras (PSF), como resultado da

perda de água na parede celular, o que reduz principalmente a espessura e, em menor grau, o comprimento da peça (Fuentes Salinas, 1998).

A magnitude dessas contrações depende de fatores anatômicos, físicos e ambientais. Entre os mais relevantes está a densidade básica, visto que madeiras com maior densidade — e, portanto, paredes celulares mais espessas — apresentam maiores percentuais de encolhimento (Wiedenhoeft & Eberhardt, 2021). Da mesma forma, a orientação estrutural da madeira determina que as alterações dimensionais não sejam uniformes: o encolhimento tangencial é o maior, seguido pelo encolhimento radial (aproximadamente 50% do encolhimento tangencial) e, por fim, pelo encolhimento axial (cerca de 1%), um fenômeno conhecido como anisotropia de encolhimento (Fuentes, 1998).

Em nível ultraestrutural, o ângulo microfibrilar (AMF) é um dos parâmetros mais influentes no comportamento dimensional, pois afeta significativamente a deformação da parede celular durante a perda de umidade (Cave, 1972; Saucedo-Ibarra et al., 2022). Juntamente com a densidade, o AMF está intimamente relacionado à contração longitudinal — particularmente em coníferas — e à contração radial e tangencial, embora sua magnitude dependa da espécie e da estrutura dos anéis de crescimento (Donaldson, 2008; Yang et al., 2003). Além disso, fatores ambientais, como o local de crescimento, podem modificar essas propriedades devido a variações na disponibilidade de água e nas condições do solo (Arias et al., 2022).

O objetivo deste trabalho foi analisar a correlação entre o ângulo microfibrilar determinado nas faces radial e tangencial dos traqueídeos com as respectivas contrações radial e tangencial da madeira de *Pinus ayacahuite* Ehrenb.

Material e métodos

Preparação da madeira

Foram obtidas duas seções de uma tábua de *P. ayacahuite* Ehrenb, com 1 cm de espessura, 7,5 cm de largura e 1 cm de comprimento. Em cada seção, foram marcados 5 quadrados (Figura 1) para obter um total de 10 blocos de 1 cm^3 orientados segundo os planos típicos da madeira. Estes foram cortados com uma serra de mesa.



Figura 1- Marcação dos blocos nas seções da tábua de *P. ayacahuite* Ehrenb.

Fonte: Da autora.

Saturação dos blocos de madeira

Os blocos de madeira foram colocados em um dessecador de vidro com água destilada. Em seguida, criou-se um vácuo dentro do dessecador utilizando uma estufa a vácuo por cinco dias, até que os blocos de madeira se depositassem e permanecessem no fundo do dessecador.

Obtenção de cortes histológicos e determinação do ângulo microfibriar (AMF)

Secções histológicas com 8 µm de espessura foram obtidas das faces radial e tangencial de cada cubo de madeira utilizando um micrótomo Leica® SM 2000R. Em seguida, adicionou-se uma solução de dissociação 1:1 de peróxido de hidrogênio e ácido acético. As amostras foram colocadas em uma estufa a 60°C por 18 horas. Após esse período, os frascos foram retirados da estufa e agitados vigorosamente para completar a separação do material. As amostras dissociadas foram lavadas três vezes com água destilada. Desta forma foram obtidos traqueídeos com as faces expostas radialmente ou tangencialmente, preparadas para a medição dos ângulos microfibrilares.

A medição do AMF dos traqueídeos foi realizada utilizando um microscópio Labomex® LxPO1 equipado com um filtro de luz polarizada. Um traqueídeo fragmentado foi posicionado e orientado ao longo do eixo vertical. Este valor inicial foi registrado. O goniômetro foi então girado lentamente, dependendo da orientação da microfibrila (sentido horário para a orientação "s" e sentido anti-horário para a orientação "z"), até que parte da parede do traqueídeo fosse completamente escurecida. Este valor foi registrado como a posição de extinção máxima. O AMF foi calculado subtraindo-se as duas medições.

Medição das dimensões lineares nos eixos típicos da madeira

Em cada cubo de madeira, foi marcada uma linha onde cada medição seria feita com um paquímetro (Figura 2a). As medições foram feitas em cada eixo, conforme mostrado na Figura

2b. Posteriormente, o volume verde de cada cubo de madeira foi pesado e obtido de acordo com o método de Manzo e Vargas (1997).

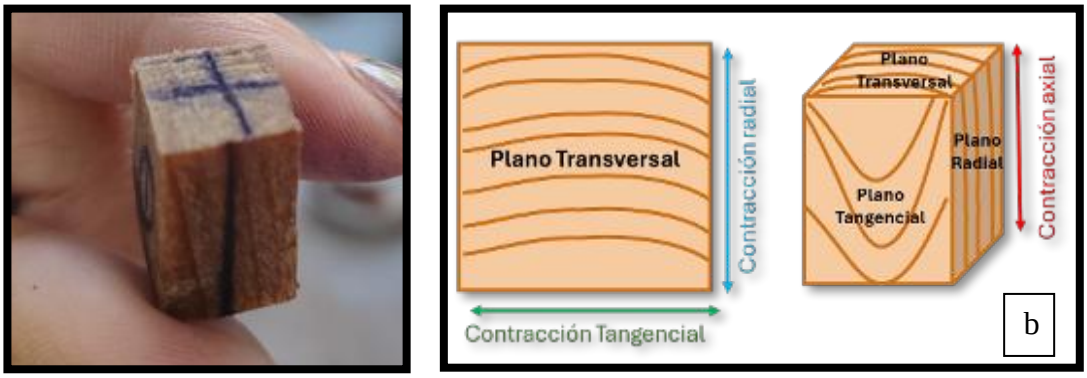


Figura 2 – **(a)** Marcas nos cubos para tirar medidas. **(b)** Medições de contrações em eixos típicos. Fonte: Da autora.

Após a obtenção das dimensões no estado saturado, os cubos foram colocados em uma estufa de laboratório a 103° ±1 até atingirem massa constante. No estado anidro, as dimensões foram obtidas ao longo dos eixos típicos nas linhas previamente marcadas e nas orientações indicadas na Figura 3. Da mesma forma, a massa e o volume anidros foram obtidos de acordo com a metodologia de Manzo e Vargas (1997).

Determinação das contrações

A porcentagem de contração radial foi calculada usando a seguinte fórmula (Fuentes, 1998):

$$\%\,\beta Rt = \left[\frac{Rv - Ro}{Rv}\right] \times 100$$

Onde:

%βRt = Percentagem da contração radial total;
Rv = Dimensão radial no estado verde;
Ro = Dimensão radial no estado anidro.

A porcentagem de contração tangencial foi calculada usando a seguinte fórmula (Fuentes, 1998):

$$\%\,\beta Tt = \left[\frac{Tv - ¿}{Tv}\right] \times 100$$

Onde:

%βTt = Contração tangencial total;
Tv = Dimensão tangencial em estado verde;
To = Dimensão tangencial em estado anidro.

A porcentagem de contração axial foi calculada usando a seguinte fórmula (Fuentes, 1998):

$$\%\,\beta At = \left[\frac{Av - Ao}{Av}\right] \times 100$$

Onde:

βAt = Contração axial total;
Av = Dimensão axial no estado verde;
Ao = Dimensão axial no estado anidro.

Finalmente, a porcentagem de contração volumétrica total foi calculada usando a seguinte fórmula (Fuentes, 1998):

$$\%\,\beta Vt = \left[\frac{Vv - Vo}{Vv}\right] \times 100$$

Onde:

%βVt = Contração volumétrica total;
Vv = Volume verde;
Vo = Volume anidro.

Análise estatística

Foram criados diagramas de dispersão para cada par de variáveis. Com base nessas visualizações, um modelo de regressão linear simples foi ajustado, seguido por um modelo não linear para avaliar possíveis relações alternativas entre as variáveis estudadas.

2. Resultados e discussão

Ângulo microfibrilar (AMF)

Os resultados médios do AMF nas faces tangencial e radial dos traqueídeos para cada cubo analisado (Tabela 1) e suas respectivas estatísticas descritivas (Tabela 2) são apresentados a seguir.

Tabela 1 – Ângulo microfibrilar (AMF) médio de cada cubo nas faces tangencial e radial dos traqueídeos da madeira de *Pinus ayacahuite* Ehrenb.

Seção	Cubo	AMF tangencial médio (º)	AMF radial médio (º)
1	1	16,26	16,87
	2	19,77	18,00
	3	19,18	19,57
	4	17,05	22,08
	5	17,58	17,49
2	6	19,13	19,75
	7	19,22	18,73
	8	16,00	17,70

	9	19,55	18,70
	10	16,68	19,25

Tabela 1- Estatísticas descritivas dos valores médios de ângulo microfibrilar medidos nas faces tangencial e radial dos traqueídeos da madeira de *Pinus ayacahuite* Ehrenb.

Face	Estatísticas (º)		Desvio padrão (º)	Coeficiente de variação (%)
Tangencial	Mínimo	16,00	1,47	8,16
	Médio	18,04		
	Máximo	19,77		
Radial	Mínimo	16,87	1,48	7,87
	Médio	18,71		
	Máximo	22,08		

Os valores obtidos para o ângulo microfibrilar (AMF) das faces radial e tangencial dos traqueídeos apresentaram variação moderada (CV ≈ 8%), característica de coníferas jovens (Donaldson, 2008). Embora duas faces anatômicas ortogonais tenham sido avaliadas, as amplitudes obtidas foram relativamente semelhantes (16,00° a 19,77° para a face tangencial e 16,87° a 22,08° para a face radial do traqueídeo); isso coincide com os resultados relatados por Saucedo-Ibarra et al. (2022), que observaram uma amplitude de AMF de 16,2° a 48,5° em *Pinus pseudostrobus* var. *apulcensis*. Winck et al. (2015) relataram uma amplitude de 19,2° a 44,8° para *Pinus taeda*, enquanto Erasmus et al. (2018) indicaram uma variação de 7° a 31° em *Pinus patula*.

Contrações volumétricas

As porcentagens de contração linear em cada eixo típico (Tabela 3) e suas respectivas estatísticas descritivas (Tabela 4) são apresentadas a seguir.

Tabela 2- Contrações lineares da madeira de *Pinus ayacahuite* Ehrenb

Seção	Cubo	Contração tangencial total (%βTt)	Contração radial total (%βRt)	Contração axial total (%βAt)	Contração volumétrica total (%βVt)
1	1	8,2394	4,8729	0,1706	13,0435
	2	8,5581	3,3473	0,1161	16,6667
	3	8,3255	3,0303	0,3401	12,7778

	4	7,9844	1,8349	0,0569	13,4409
	5	8,5859	2,5586	0,5131	13,4078
	6	7,3705	3,5088	0,1936	13,3929
	7	6,7048	3,3401	0,4323	13,2075
2	8	7,9681	4,0282	0,0961	13,4387
	9	8,5336	2,7613	0,6770	14,4628
	10	8,8564	3,9024	0,0970	14,0496

Tabela 3- Estatísticas descritivas dos valores de contração linear de *Pinus ayacahuite* Ehrenb.

Contração	**Estatísticas (º)**		**Desvio padrão (º)**	**Coeficiente de variação (%)**
Tangencial (%βTt)	Mínimo	6,70	0,64	7,99
	Médio	8,11		
	Máximo	8,85		
Radial (%βRt)	Mínimo	1,83	0,84	25,55
	Médio	3,31		
	Máximo	4,87		
Axial (%βAt)	Mínimo	0,05	0,21	78,38
	Médio	0,26		
	Máximo	0,67		
Contração volumétrica total (%βVt)	Mínimo	12,77	1,11	8,11
	Médio	13,78		
	Máximo	16.6667		

Em relação à porcentagem de contrações lineares, a magnitude média encontrada foi de 3,31% no eixo radial e 8,11% no eixo tangencial. Esses resultados são semelhantes aos relatados por Bárcenas e Dávalos (1999), para a madeira de *Pinus ayacahuite* Ehrenb onde a porcentagem de contração tangencial foi de 7,6% e radial, de 2,9%.

Por outro lado, a contração longitudinal da madeira em coníferas é consideravelmente menor do que a contração radial e tangencial, apresentando valores típicos próximos de 0,3% em madeira madura (Rowell, 2013), o que coincide com o valor médio obtido (0,26 %).

Figura 5 - Relação do AMF com a porcentagem de contração linear no eixo radial da madeira de *Pinus ayacahuite* Ehrenb.

A contração volumétrica total teve um valor médio de 13,78%, o que concorda com o relatado por Fuentes (1998), que registrou um valor de 13,64% para *P. ayacahuite*.

Os resultados da relação entre AMF e a porcentagem de contrações tangenciais são apresentados na Figura 3.

Os resultados da relação entre AMF e a porcentagem de contrações lineares no eixo radial são apresentados na Figura 4.

Secção A Secção B Secção A Secção B

Figura 3 - Relação do AMF com a porcentagem de contração tangencial da madeira de *Pinus ayacahuite* Ehrenb.

Secção A Secção B Secção A Secção B

Figura 4 - Relação do AMF com a porcentagem de contração radial da madeira de *Pinus ayacahuite* Ehrenb.

Os dados obtidos neste estudo revelaram evidências de relação fraca e não significativa entre AMF e contração tangencial para as duas seções da tábua. Entretanto, o AMF medido na fase radial dos traqueídeos, revelou dependência moderada (R^2 = 0,569) com a contração radial, apenas para a seção A da tábua. O resultado, entre fraco a moderado, das relações pode ser atribuído a diversos fatores, mas, neste caso, deveu-se principalmente à forma como as amostras foram obtidas. Os cubos utilizados foram extraídos de duas seções específicas de uma peça de madeira (Figura 1). Ou seja, as amostras apresentaram baixa variabilidade anatômica por serem contíguas. Isso resultou em uma pequena variação no AMF (Ângulo microfibrilar), impedindo o estabelecimento de uma relação mais forte entre o AMF determinado em cada fase dos traqueídeos e suas respectivas porcentagens de contração. Esse comportamento já foi documentado por Donaldson (2008), Yang et al. (2003) e outros autores, que apontam que a relação entre o AMF e as contrações depende não apenas do ângulo em si, mas também do eixo de medição, da densidade, da proporção de madeira juvenil e da heterogeneidade anatômica.

3. Conclusões

De modo geral, os resultados obtidos forneceram informações úteis sobre o AMF e a contração linear de *Pinus ayacahuite* Ehrenb., e destacaram a importância de se considerar a variabilidade anatômica e estrutural na interpretação da estabilidade dimensional da madeira. Os ângulos microfibrilares obtidos nas faces radial e tangencial dos traqueídeos apresentaram valores medios iguais a 18,71º e 18,04º, respectivamente. Por sua vez, as contrações radial e tangencial foram de 3,3% e 8,1%, respectivamente.

As análises de regressão do ângulo microfibrilar medido na fase radial dos traqueídeos em função das contrações radiais revelaram apenas uma relação linear de dependência moderada (R^2 = 0,569; p 0,1405). Outros ajustes de equações entre as variáveis não resultaram em relação significativa, o que pode ser atribuído à similaridade anatômica das amostras.

Os dados obtidos servem como referência para pesquisas futuras.

4. Agradecimentos

À Secretaria de Ciência, Humanidades, Tecnologia e Inovação (SECIHTI) do México, pelo apoio financeiro concedido para esta pesquisa.

À Universidade Autônoma de Chapingo, e especialmente ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais e Ambientais, pela confiança e auxílio.

Referências Bibliográficas

Arias, E., Sosa-Pinilla, C. del R., Rodriguez-Elias, F. H. (2022). Contração da madeira de desbaste de Neltuma alba proveniente de plantações. Quebracho-Revista de Ciencias Forestales, 30(2), 89–94. https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=48175287004

Bárcenas Pazos, G., & Dávalos Sotelo, R. (1999). Importância da lignina nas contrações da madeira: revisão bibliográfica. Madera y Bosques, 5(1), 13–26. https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=61750103

Cave, I. D. (1972). Uma teoria da contração da madeira. Wood Science and Technology, 6(4), 284–292. https://doi.org/10.1007/BF00357050/METRICS

Donaldson, L. (2008). Ângulo microfibrilar: medição, variação e relações – uma revisão. IAWA Journal, 29(4), 345–386. https://doi.org/10.1163/22941932-90000192

Erasmus, J., Kunneke, A., Drew, D. M., & Wessels, C. B. (2018). Efeito do espaçamento de plantio na retidão do fuste, ângulo microfibrilar e densidade da madeira de Pinus patula. Forestry: An International Journal of Forest Research, 91(3), 247–258. https://doi.org/10.1093/FORESTRY/CPY005

Fuentes Salinas, M. (1998). Propriedades tecnológicas das madeiras mexicanas de importância na construção. Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente, IV.

Manzo, S. V., Vargas-Hernández, J. (1997). Método empírico para estimar a densidade básica em pequenas amostras de madeira. Madera y Bosques, 3(1), 81–87.

Rowell, R. M. (2013). Handbook of wood chemistry and wood composites (2ª ed.). CRC Press. https://www.routledge.com/Handbook-of-Wood-Chemistry-and-Wood-Composites/Rowell/p/book/9781032099163

Saucedo-Ibarra, J., Borja-de la Rosa, A., Tarcísio-Lima, J., Corona-Ambriz, A., & Machuca-Velazco, R. (2022). Efeito do ângulo microfibrilar nas características tecnológicas da madeira de Pinus pseudostrobus var. apulcensis. Maderas. Ciencia y Tecnología, 24(48), 1–18. https://doi.org/10.4067/s0718-221x2022000100448

Wiedenhoeft, A., & Eberhardt, T. L. (2021). Estrutura e função da madeira. Em Wood handbook: Wood as an engineering material (3ª ed.). United States Department of Agriculture Forest Service. https://research.fs.usda.gov/treesearch/62200

Winck, R. Á., Fassola, H. E., & Área, M. C. (2015). Efeito do desbaste sobre as propriedades anatômicas da madeira de Pinus taeda. Maderas. Ciencia y Tecnología, 17, 1–10. https://doi.org/10.4067/S0718-221X2015005000037

Yang, J. L., Evans, R., Joe, B., & Chandra, K. (2003). Inter-relações entre propriedades de contração, ângulo microfibrilar e largura dos cristalitos de celulose em Eucalyptus globulus de 10 anos. New Zealand Journal of Forestry Science, 33, 47–61.

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Resistência ao cisalhamento de linhas de cola em painéis colados lateralmente (EGP) de *Cupressus lusitânica*

Maickele Aparecida Muniz[1]; Alexsandro Bayestorff da Cunha[1]; Tarcísio Franscisco de Camargo[1]; Camila Alves Corrêa[1]; Nicolas Costa Pucci[1]; Marine Alves Antonello[1]; Caio Cesar Faedo de Almeida[1]

[1] Universidade do Estado de Santa Catarina – UDESC/CAV

Resumo: Os painéis colados lateralmente (*Edge Glued Panels* – EGP) constituem produtos de madeira sólida obtidos pela união de lamelas por meio de linhas de cola. A qualidade dessas juntas depende da interação entre as propriedades da madeira, o sistema adesivo e as condições de processamento. Este estudo avaliou a resistência ao cisalhamento da linha de cola de painéis EGP produzidos com madeira de *Cupressus lusitanica* Mill., utilizando adesivos à base de poliacetato de vinila (PVA) e emulsão polimérica de isocianato (EPI), aplicados nas gramaturas de 180 e 200 g/m². Foram determinados a tensão máxima de cisalhamento, a porcentagem de falha na madeira e o quinto percentil inferior, em condição seca e após imersão em água. Após o pré-tratamento úmido, os tratamentos com EPI apresentaram resistência média de 5,53 MPa, para a gramatura de 180 g/m², e de 4,88 MPa, para 200 g/m², atendendo ao requisito mínimo de 2,5 MPa estabelecido pela norma. Os tratamentos com PVA apresentaram valores de 0,37 e 0,51 MPa, respectivamente, sem ocorrência de falha na madeira. Em condição seca, todos os tratamentos atenderam ao requisito normativo, embora os maiores valores de resistência tenham sido observados para o EPI. O tipo de adesivo exerceu influência mais expressiva sobre o desempenho das linhas de cola do que a variação de gramatura avaliada. O EPI aplicado a 180 g/m² apresentou o melhor desempenho global e potencial para a produção de painéis EGP de *C. lusitanica*.

Palavras-chave: Adesão; Durabilidade; Madeira sólida.

Shear strength of glue lines in laterally bonded panels (EGP) of *Cupressus lusitânica*

Abstract: Edge-glued panels (EGP) are solid wood products obtained by joining wood strips using glue lines. The quality of these joints depends on the interaction between the properties of the wood, the adhesive system, and the processing conditions. This study evaluated the shear strength of the glue line in EGP panels produced from *Cupressus lusitanica* Mill. wood, using polyvinyl acetate (PVA)-based and isocyanate polymer emulsion (EPI)-based adhesives

applied at coverage rates of 180 and 200 g/m². The maximum shear stress, the percentage of wood failure, and the lower fifth percentile were determined under dry conditions and after immersion in water. After wet pretreatment, the EPI treatments exhibited an average strength of 5.53 MPa for the 180 g/m² coating weight and 4.88 MPa for 200 g/m², meeting the minimum requirement of 2.5 MPa established by the standard. The PVA treatments yielded values of 0.37 and 0.51 MPa, respectively, with no failure observed in the wood. Under dry conditions, all treatments met the standard requirement, although the highest strength values were observed for EPI. The type of adhesive had a more significant influence on the performance of the glue lines than the variation in basis weight evaluated. The EPI applied at 180 g/m² showed the best overall performance and potential for the production of EGP panels from *C. lusitanica.*
Keywords: Bonding; Durability; Solid wood.

1. Introdução

A utilização da madeira em produtos de maior valor agregado tem impulsionado o desenvolvimento de tecnologias voltadas ao melhor aproveitamento da matéria-prima. Entre esses produtos, destacam-se os painéis colados lateralmente (Edge Glued Panels – EGP), obtidos pela união de lamelas de madeira por meio de linhas de cola. Esses painéis permitem o aproveitamento de peças de menores dimensões e podem ser utilizados na fabricação de móveis, portas, divisórias e tampos. A qualidade do produto está diretamente relacionada ao desempenho das linhas de cola, responsáveis pela transferência dos esforços entre as lamelas.

A resistência das juntas coladas resulta da interação entre as características da madeira, as propriedades do adesivo e as condições de fabricação. Fatores como massa específica, porosidade, permeabilidade, teor de umidade e rugosidade da superfície podem influenciar o molhamento, a penetração e a formação da interface adesiva (Frihart, 2012). A condição superficial também interfere na resistência das juntas, sendo necessário obter uma superfície adequada à distribuição do adesivo (Follrich et al., 2010).

A gramatura constitui um importante parâmetro na fabricação dos painéis. Quantidades insuficientes podem resultar em cobertura inadequada da superfície, enquanto o excesso não garante, necessariamente, maior resistência. Entre os adesivos utilizados na indústria madeireira, o poliacetato de vinila (PVA) apresenta ampla aplicação em produtos destinados a ambientes internos, enquanto a emulsão polimérica de isocianato (EPI) apresenta maior potencial de resistência em condições úmidas. Gadhave et al. (2017) destacam que a

durabilidade das juntas está relacionada às características do sistema adesivo e à sua interação com o substrato.

O tipo de adesivo pode exercer influência significativa sobre a resistência da linha de cola. Lopes et al. (2013), avaliando painéis de *Pinus taeda*, verificaram diferenças no desempenho de juntas produzidas com diferentes sistemas adesivos. De Souza et al. (2020) também ressaltaram a importância da compatibilidade entre a madeira e o adesivo na produção de painéis EGP. Além disso, Ferraresi et al. (2014) verificaram que o teor de umidade da madeira influencia a resistência ao cisalhamento e o modo de ruptura das juntas.

A exposição à água é uma condição importante para avaliar a durabilidade das linhas de cola, pois a umidade pode comprometer o desempenho de determinados sistemas adesivos. Gillespie e River (1976) demonstraram a influência da umidade sobre a durabilidade de adesivos empregados em produtos de madeira. Da mesma forma, Sikora et al. (2015) destacaram a importância da avaliação da resistência e da durabilidade das juntas coladas quando submetidas a condições de exposição.

A madeira de *Cupressus lusitanica* Mill. apresenta potencial para utilização em produtos de madeira sólida, porém ainda são escassas informações sobre seu comportamento em produtos colados, especialmente em painéis EGP. Assim, torna-se importante avaliar a influência do sistema adesivo e da gramatura sobre a resistência das linhas de cola dessa espécie.

Diante do exposto, o objetivo deste estudo foi avaliar a resistência ao cisalhamento da linha de cola de painéis EGP produzidos com madeira de *Cupressus lusitanica*, utilizando os adesivos PVA e EPI, aplicados nas gramaturas de 180 e 200 g/m², em condição seca e após pré-tratamento por imersão em água.

2. Materiais e métodos

2.1 Delineamento experimental

O experimento foi conduzido em arranjo fatorial 2x2, considerando dois tipos de adesivo e duas gramaturas de aplicação. Foram avaliados o adesivo à base de poliacetato de vinila (PVA) e o sistema de emulsão polimérica de isocianato (EPI), aplicados nas gramaturas de 180 e 200 g/m². Os tratamentos foram definidos conforme apresentado na Tabela 1.

Tabela 1 – Tratamentos utilizados na avaliação da colagem lateral

Tratamentos	Adesivo	Gramatura (g/m²)
T1	PVA	180
T2	PVA	200

Tratamentos	Adesivo	Gramatura (g/m²)
T3	EPI	180
T4	EPI	200

Foram utilizados 40 corpos de prova por tratamento. Desse total, 20 corpos de prova foram avaliados em condição seca e 20 foram submetidos ao pré-tratamento por imersão em água.

2.2 Produção dos conjuntos colados

Foram utilizadas peças de madeira de *Cupressus lusitanica* livres de defeitos visíveis que pudessem interferir no desempenho das linhas de cola. As peças apresentavam comprimento aproximado de 250 mm e espessura inicial de 15 mm. A espessura das peças foi reduzida para aproximadamente 10 mm por meio de aplainamento. O processamento foi realizado de modo a obter superfícies adequadas à aplicação do adesivo e atender às dimensões requeridas para a produção dos corpos de prova. Para a fabricação dos conjuntos colados, foram utilizadas quatro peças de madeira, formando três linhas de cola.

A linha central foi destinada à avaliação da resistência ao cisalhamento, enquanto as linhas externas contribuíram para a estabilidade do conjunto durante a fabricação e a obtenção dos corpos de prova. Os adesivos foram aplicados de acordo com as gramaturas estabelecidas para cada tratamento. Após a montagem, os conjuntos foram submetidos à pressão de prensagem de 1,31 MPa. Os conjuntos colados apresentaram dimensões aproximadas de 250 x 50 x 40 mm. Após o período de cura, os conjuntos foram seccionados para a obtenção dos corpos de prova. Foram realizados cortes transversais destinados à delimitação da região submetida ao cisalhamento, conforme os procedimentos empregados para a avaliação da qualidade da colagem em painéis de madeira sólida.

2.3 Pré-tratamentos e Ensaio de cisalhamento

A qualidade das linhas de cola foi avaliada em duas condições. Na condição seca, os corpos de prova foram ensaiados sem exposição prévia à água, permitindo a determinação da resistência das juntas após a cura dos sistemas adesivos.

Na condição úmida, os corpos de prova foram submetidos à imersão em água à temperatura aproximada de 20 °C durante 24 h. Após a retirada da água, os corpos de prova foram imediatamente submetidos ao ensaio de cisalhamento. Os procedimentos foram conduzidos considerando os critérios estabelecidos pelas normas EN 13353 e EN 13354 para a avaliação da qualidade de colagem de painéis de madeira sólida. Os ensaios foram realizados em máquina universal de ensaios, com velocidade de carregamento de 5 mm/min. A carga foi aplicada de modo a promover o cisalhamento da linha de cola central.

A tensão máxima de cisalhamento foi determinada pela Equação 1:

$$\tau = P/(b \times d)$$

Em que:

τ = tensão máxima de cisalhamento, em MPa;

P = carga máxima aplicada, em N;

b = largura da área submetida ao cisalhamento, em mm;

d = altura da área submetida ao cisalhamento, em mm.

Após a ruptura, foi determinada a porcentagem de falha na madeira por avaliação visual das superfícies fraturadas. A estimativa foi realizada considerando a área rompida no substrato lenhoso em relação à área total avaliada. Também foi determinado o quinto percentil inferior dos valores de resistência. A qualidade das juntas foi avaliada considerando o requisito mínimo de 2,5 MPa estabelecido pela EN 13354.

2.4 Análise estatística

Os resultados foram submetidos à análise estatística para verificar o efeito dos tratamentos sobre a resistência ao cisalhamento das linhas de cola. Os tratamentos foram comparados pelo teste não paramétrico de Friedman, ao nível de 5% de probabilidade. Para fins de apresentação, médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si.

3. Resultados e discussão

Os valores médios de tensão máxima de cisalhamento, porcentagem de falha na madeira e quinto percentil inferior são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 – Resistência ao cisalhamento e falha na madeira dos tratamentos avaliados

Tratamento	Condição	Tensão máxima (MPa)	Falha na madeira (%)	5º percentil (MPa)
PVA – 180 g/m²	Úmida	0,37 c	0	0,21
PVA – 200 g/m²	Úmida	0,51 c	0	0,17
EPI – 180 g/m²	Úmida	5,53 a	77	3,58
EPI – 200 g/m²	Úmida	4,88 b	80	3,74
PVA – 180 g/m²	Seca	9,69 b	97	6,85
PVA – 200 g/m²	Seca	9,46 b	94	6,29
EPI – 180 g/m²	Seca	10,65 a	31	5,56
EPI – 200 g/m²	Seca	11,21 a	31	5,27

Médias seguidas pela mesma letra, dentro de cada condição de avaliação, não diferem entre si pelo teste de Friedman a 5% de probabilidade.

Após a imersão em água, os tratamentos com EPI apresentaram desempenho significativamente superior aos tratamentos produzidos com PVA. O tratamento com EPI aplicado a 180 g/m² apresentou tensão média de 5,53 MPa, enquanto o tratamento com 200 g/m² atingiu 4,88 MPa. Ambos os valores foram superiores ao requisito mínimo de 2,5 MPa estabelecido pela EN 13354. Os valores do quinto percentil foram de 3,58 MPa para o tratamento EPI-180 e de 3,74 MPa para o tratamento EPI-200. Dessa forma, além de apresentarem elevada resistência média, os tratamentos demonstraram desempenho consistente considerando a distribuição dos resultados individuais.

A porcentagem de falha na madeira foi de 77% para o EPI aplicado a 180 g/m² e de 80% para o EPI aplicado a 200 g/m². Esses resultados indicam que, após a exposição à água, a ruptura ocorreu predominantemente no substrato lenhoso. Portanto, a interface adesiva manteve resistência suficiente para transferir os esforços para a madeira. Sikora et al. (2016), ao avaliarem a resistência e a durabilidade de juntas adesivas em painéis de madeira, destacaram que o desempenho após a exposição à umidade depende da estabilidade do sistema adesivo e de sua capacidade de manter a integridade da interface. Os resultados obtidos neste estudo apresentam comportamento compatível com essa interpretação, uma vez que os tratamentos com EPI mantiveram resistência superior ao limite normativo após a imersão.

Yau et al. (2024) também evidenciaram a importância da avaliação conjunta da resistência ao cisalhamento e da durabilidade para a caracterização do desempenho de painéis colados. Segundo os autores, a resistência inicial não é suficiente para representar o comportamento do sistema quando o produto é submetido a condições de umidade.

Em contraste, os tratamentos com PVA apresentaram resistência média de 0,37 MPa, para a gramatura de 180 g/m², e de 0,51 MPa, para 200 g/m². Os valores foram inferiores ao requisito estabelecido pela EN 13354 e não apresentaram diferença estatística. A ausência de falha na madeira indica que a ruptura ocorreu integralmente na linha de cola ou na interface adesivo-madeira. Esse comportamento demonstra que a exposição à água reduziu de forma acentuada a capacidade de transferência de esforços do sistema adesivo.

A redução da resistência do PVA pode estar relacionada à absorção de água e às alterações promovidas na estrutura do polímero. A presença de umidade pode reduzir a resistência coesiva da linha de cola e favorecer a propagação de falhas na interface. Dessa forma, embora o PVA tenha apresentado desempenho satisfatório em condição seca, sua estabilidade após a exposição direta à água foi limitada.

A variação da gramatura entre 180 e 200 g/m² não promoveu aumento consistente da resistência das linhas de cola. Para o EPI, a gramatura de 180 g/m² apresentou a maior tensão média, enquanto a gramatura de 200 g/m² apresentou maior porcentagem de falha na madeira e maior valor do quinto percentil. Esse comportamento demonstra que os parâmetros de avaliação devem ser interpretados de forma integrada.

A maior resistência média obtida com 180 g/m² sugere que essa quantidade foi suficiente para promover molhamento adequado, preenchimento das irregularidades superficiais e formação de uma interface contínua. O aumento da gramatura não resultou em ganho proporcional de resistência, indicando que a quantidade adicional de adesivo não contribuiu de forma significativa para o desempenho da junta.

Follrich et al. (2010) observaram que a quantidade de adesivo deve ser analisada conjuntamente com as características da superfície e a geometria da junta. Segundo os autores, o aumento da quantidade aplicada não produz necessariamente maior resistência, pois a eficiência da colagem depende da formação de uma interface adequada. Gavrilović-Grmuša et al. (2012) destacaram que a penetração do adesivo pode modificar a estrutura da região interfacial e influenciar o comportamento mecânico das juntas. Nesse contexto, a quantidade aplicada deve favorecer uma penetração controlada, evitando tanto a cobertura insuficiente quanto a migração excessiva do adesivo para o interior da madeira.

Para o PVA, o aumento da gramatura de 180 para 200 g/m² também não foi suficiente para evitar a redução da resistência após a imersão. Portanto, o desempenho limitado esteve relacionado principalmente à sensibilidade do sistema adesivo à água, e não à quantidade aplicada. Ferraresi et al. (2014) demonstraram que as condições de umidade podem alterar a resistência ao cisalhamento e o modo de ruptura das linhas de cola em painéis EGP. Assim, a definição da gramatura deve considerar as características da madeira e as condições ambientais às quais o produto será submetido.

Na condição seca, todos os tratamentos apresentaram valores do quinto percentil superiores a 2,5 MPa. Portanto, considerando o requisito estabelecido pela EN 13354, todos os sistemas de colagem apresentaram desempenho adequado. Os tratamentos com EPI apresentaram as maiores tensões médias, com 10,65 MPa para a gramatura de 180 g/m² e 11,21 MPa para 200 g/m². Os dois tratamentos foram estatisticamente equivalentes e apresentaram resistência superior à observada para os tratamentos com PVA. Os valores obtidos para o PVA foram de 9,69 MPa para 180 g/m² e 9,46 MPa para 200 g/m². Embora inferiores aos valores obtidos com

EPI, esses resultados demonstram que o PVA apresentou elevada capacidade de formação de juntas resistentes em condição seca.

A porcentagem de falha na madeira apresentou comportamento distinto entre os sistemas adesivos. Os tratamentos com PVA apresentaram 97% de falha na madeira para a gramatura de 180 g/m² e 94% para 200 g/m². Os tratamentos com EPI apresentaram 31% de falha na madeira nas duas gramaturas. A elevada porcentagem de falha na madeira observada para o PVA indica que, em condição seca, a interface adesiva apresentou resistência superior à do substrato. Entretanto, esse comportamento não foi mantido após a exposição à água. Dessa forma, a elevada falha na madeira em condição seca não deve ser interpretada como garantia de estabilidade em ambientes úmidos.

Le e Nairn (2014) demonstraram que as propriedades mecânicas da interface adesiva influenciam a distribuição das tensões e o comportamento da fratura em juntas de madeira. Portanto, a resistência da junta depende não apenas da capacidade de adesão, mas também da compatibilidade mecânica entre a madeira e o sistema polimérico. Bockel et al. (2020) observaram que alterações no módulo de elasticidade de adesivos podem modificar o desempenho de juntas estruturais de madeira.

Os resultados obtidos no presente estudo reforçam essa interpretação, pois os tratamentos com EPI apresentaram maior resistência ao cisalhamento, mesmo com menor porcentagem de falha na madeira. Assim, a falha na madeira não deve ser utilizada isoladamente para classificar a qualidade da colagem. A tensão máxima, o quinto percentil e o modo de ruptura devem ser analisados de forma conjunta.

Lopes et al. (2013) demonstraram que o tipo de adesivo influencia significativamente a resistência da linha de cola de painéis de *Pinus taeda*. Os resultados obtidos neste estudo confirmam essa tendência, uma vez que a diferença entre os sistemas PVA e EPI foi mais expressiva do que a variação entre as gramaturas avaliadas.

De Souza et al. (2020) destacaram que a produção de EGP com diferentes espécies depende da compatibilidade entre a madeira e o sistema adesivo. Essa compatibilidade envolve características anatômicas, físicas e químicas do substrato, além das condições de aplicação e cura. A madeira de *C. lusitanica* apresenta características que podem favorecer a formação de juntas coladas. Entretanto, o desempenho depende da capacidade do adesivo de estabelecer uma interface estável e manter sua integridade diante das condições de exposição.

Os resultados demonstram que a madeira de *C. lusitanica* apresenta potencial para a produção de painéis EGP, especialmente quando associada a sistemas adesivos capazes de

manter a resistência após a exposição à umidade. O tratamento com EPI aplicado a 180 g/m² apresentou a maior resistência média após o pré-tratamento úmido.

Além do desempenho mecânico, a utilização da menor gramatura pode contribuir para a redução do consumo de adesivo, desde que os parâmetros de fabricação sejam mantidos adequadamente. Entretanto, a definição do sistema de colagem para aplicação industrial deve considerar também fatores como custo, tempo de prensagem, condições de cura, disponibilidade do adesivo e variabilidade da matéria-prima.

4. Conclusões

O tipo de adesivo exerceu influência mais expressiva sobre a resistência ao cisalhamento das linhas de cola do que a variação de gramatura entre 180 e 200 g/m². Após o pré-tratamento em água, os tratamentos com EPI apresentaram resistência superior aos tratamentos com PVA e atenderam ao requisito mínimo estabelecido pela EN 13354.

O tratamento com EPI aplicado a 180 g/m² apresentou a maior resistência média após a exposição à água, atingindo 5,53 MPa. O tratamento com EPI aplicado a 200 g/m² apresentou maior porcentagem de falha na madeira e maior valor do quinto percentil inferior, demonstrando desempenho consistente.

Os tratamentos com PVA apresentaram elevada resistência em condição seca, porém sofreram redução acentuada após a exposição à água, apresentando ausência de falha na madeira. A aplicação de EPI a 180 g/m² apresentou o melhor desempenho global e indicou potencial para reduzir o consumo de adesivo sem comprometer a qualidade das linhas de cola.

A madeira de *Cupressus lusitanica* apresentou potencial para a produção de painéis EGP, desde que seja utilizado um sistema adesivo compatível com as condições de exposição previstas para o produto.

5. Agradecimentos

Agradecimento à Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação do Estado de Santa Catarina - FAPESC e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal da Universidade do Estado de Santa Catarina – UDESC, pelo suporte acadêmico e científico.

6. Referências bibliográficas

Bockel, S., Harling, S., Konnerth, J., Niemz, P., Weiland, G., Hogger, E., & Pichelin, F. (2020). Modifying elastic modulus of two-component polyurethane adhesive for structural hardwood bonding [Article]. *Journal of Wood Science*, 66(1). https://doi.org/10.1186/s10086-020-01917-9

de Souza, G. O., Pimenta, A. S., Trianoski, R., Rodolfo de Melo, R., Barbosa de Azevedo, T. K., & Castro, R. V. O. (2020). Production of edge-glued panels with wood from three Brazilian dry forest tree species and five types of adhesives. *International Wood Products Journal*, 11(2), 57–63. https://doi.org/10.1080/20426445.2020.1721041

e Bryan H. River, R. H. G. (n.d.). Durabilidade de adesivos em compensado: Efeitos do calor seco por meio de análise de taxa-processo. Retrieved https://api.semanticscholar.org/CorpusID:219530030

EN 13354: Solid wood panels (SWP) – bonding quality – test method. (2009). CEN.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. (2009). EN 13353: Solid wood panels (SWP) – requirements. CEN.

Ferraresi, F., Barbosa, J., Campos, C., Ferreira, B., De Araujo, V., & Gava, M. (2014). Effect of wood moisture content in edge glued panel bonding for furniture industry: Analysis of shear-stress and rupture in bondline. *Advanced Materials Research*, 1025–1026, 227–232. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.1025-1026.227

Follrich, J., Vay, O., Veigel, S., & Müller, U. (2010). Bond strength of end-grain joints and its dependence on surface roughness and adhesive spread. *Journal of Wood Science*, 56(5), 429–434. https://doi.org/10.1007/s10086-010-1118-1

Frihart, C. (2012). 9 Wood Adhesion and Adhesives. *Handbook of Wood Chemistry and Wood Composites*. https://doi.org/10.1201/b12487-13

Gadhave, R. V., Mahanwar, P. A., & Gadekar, P. T. (2017). Bio-renewable sources for synthesis of eco-friendly polyurethane adhesives—Review. *Open Journal of Polymer Chemistry*, 07(04), 57–75. https://doi.org/10.4236/ojpchem.2017.74005

Gavrilović-Grmuša, I., Dunky, M., Miljkovic, J., & Điporović-Momčilović, M. (2012). Influence of the viscosity of UF resins on the radial and tangential penetration into poplar wood and on the shear strength of adhesive joints. *Holzforschung*, 66(7), 849–856. https://doi.org/10.1515/hf-2011-0177

Gutowski, V. (1985). Physico-chemical criteria for maximum adhesion. Part I: Theoretical concepts and experimental evidence. *The Journal of Adhesion*, 19, 29–49. https://doi.org/10.1080/00218468508071212

Le, E. A., & Nairn, J. A. (2014). Measuring interfacial stiffness of adhesively bonded wood. *Wood Science and Technology*, 48(6), 1109–1121. https://doi.org/10.1007/s00226-014-0661-0

Lopes, M. de C., Muniz, G. I. B. de, Matos, J. L. M. de, Tanobe, V. O. de A., Chinasso, C. A. F., & Rosso, S. (2013). Resistência da linha de cola de painéis de *Pinus taeda* colados lateralmente com diferentes adesivos. *Cerne*, 19(4), 613–619. https://doi.org/10.1590/s0104-77602013000400011

Sikora, K., Mcpolin, D. O., & Harte, A. M. (2015). Shear strength and durability testing of adhesive bonds in cross-laminated timber. *The Journal of Adhesion*, 92, 151006112010001. https://doi.org/10.1080/00218464.2015.1094391

Yau, Y., Ocholi, A., Kaura, J., Lawan, A., & Sulaiman, T. (2024). Evaluation of shear strength and durability of adhesive bond in cross-laminated timber (CLT) panels made from Nigerian *Gmelina arborea* timber. https://doi.org/10.2139/ssrn.4939807

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Rotas de valorização para resíduos madeireiros da arborização urbana

Allana Katiussya Silva Pereira[1,2]; Paulo Renato Souza de Oliveira[3]; Iara Nobre Carmona[3]; Fabíola Martins Delatorre[3]; Juliana Terezinha Santos da Cruz[3]; Merlindo Jacinto Manjate[3,4]; Sabrina Soares da Silva[3]; Ananias Francisco Dias Júnior[3]

[1] Universidade Federal do Recôncavo da Bahia (UFRB), Centro de Ciências Agrárias, Ambientais e Biológicas (CCAAB), CEP 44.380-000, Cruz das Almas, Bahia, Brasil.
[2] Universidade de São Paulo (USP), Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", CEP 13418-900, Piracicaba, São Paulo, Brasil.
[3] Universidade Federal do Espírito Santo (UFES), Departamento de Ciências Florestais e da Madeira, CEP 29550-000, Jerônimo Monteiro, Espírito Santo, Brasil.
[4] Universidade Lúrio (UniLúrio), Faculdade de Ciências Agrárias, *campus* Unango, CEP 3300, Distrito de Sanga, Niassa, Moçambique.

Resumo: Visando orientar rotas de aproveitamento, este estudo realizou uma investigação tecnológica dos resíduos de poda de *H. impetiginosus*, *L. tomentosa* e *P. aquatica* quanto à composição química estrutural, densidade aparente, porosidade, química imediata e dureza Janka. *P. aquatica* apresentou maiores teores de extrativos (8,30 ± 0,24%), materiais voláteis (83,20 ± 0,43%) e porosidade (53,63 ± 2,73%), indicando potencial para obtenção de extratos fenólicos, resinas naturais, além da produção de painéis de baixa densidade. *H. impetiginosus* se destacou com maior teor de lignina total (30,90 ± 0,25%) e menor teor de cinzas (1,12 ± 0,07%), favorecendo a valorização na produção de adesivos e materiais à base de lignina, biocarvão e combustíveis sólidos. *L. tomentosa* apresentou maior densidade aparente (794,21 ± 29,49 kg.m^{-3}) e maior dureza Janka (79,43 ± 5,55 MPa), destacando-se para produção de produtos usinados. Os resultados evidenciam perfis tecnológicos distintos e múltiplas rotas de valorização no contexto da economia circular.

Palavras-chave: Resíduos de podas; Silvicultura urbana; Aproveitamento de resíduos.

Valorization pathways for wood waste from urban arborization

Abstract: To guide potential valorization pathways, this study conducted a technological investigation of pruning residues from *Handroanthus impetiginosus*, *Licania tomentosa*, and *Pachira aquatica* in terms of structural chemical composition, apparent density, porosity, proximate composition, and Janka hardness. *P. aquatica* exhibited the highest extractives content (8.30 ± 0.24%), volatile matter content (83.20 ± 0.43%), and porosity (53.63 ± 2.73%), indicating potential for the recovery of phenolic extracts and natural resins, as well as for the production of low-density panels. *H. impetiginosus* was distinguished by its higher total lignin content (30.90 ± 0.25%) and lower ash content (1.12 ± 0.07%), supporting its valorization in the production of adhesives, lignin-based materials, biochar, and solid fuels. *L. tomentosa* showed the highest apparent density (794.21 ± 29.49 kg.m^{-3}) and Janka hardness (79.43 ± 5.55 MPa), indicating suitability for the manufacture of machined wood products. The results demonstrate distinct technological profiles and multiple valorization pathways within a circular economy framework.

Keywords: Urban tree pruning; Urban forestry; Waste utilization.

1. Introdução

A arborização urbana desempenha funções ambientais, paisagísticas e climáticas essenciais para a qualidade de vida nas cidades (Nowak et al., 2019). Práticas de manutenção, como poda, condução e remoção de árvores, são necessárias por razões de segurança, visibilidade viária, redução de danos à infraestrutura e até mesmo por razões estéticas (Dujesiefken & Stobbe, 2002; Speak & Salbitano, 2023). Como consequência, são gerados volumes expressivos de resíduos madeireiros, frequentemente destinados à queima, decomposição natural ou usos de baixo valor agregado (Environmental Protection Agency, 2023), práticas que intensificam problemas ambientais e representam desperdício de uma matéria-prima renovável.

Devido à sua natureza lignocelulósica, os resíduos da arborização urbana apresentam potencial para obtenção de uma ampla gama de produtos valiosos (Morales et al., 2026), incluindo produtos sólidos, materiais particulados, combustíveis, biocarvões e outras alternativas associadas à economia circular e ao conceito de biorrefinaria (Morales et al., 2026; Silva et al., 2025). No entanto, sua valorização tecnológica ainda é limitada devido a heterogeneidade das espécies (Faraca et al., 2019) e escassez de informações sobre sua composição química, propriedades físicas e desempenho mecânico.

Nesse contexto, a gestão adequada e a valorização dos resíduos madeireiros provenientes da arborização urbana estão intimamente relacionadas à classificação e à investigação tecnológica da matéria-prima. A hipótese central desta pesquisa é que a espécie, isoladamente, não é um fator limitante na segregação do material para diferentes aptidões tecnológicas. Entretanto, as propriedades físico-químicas e mecânicas desempenham um papel determinante na indicação do seu uso mais eficiente. Com base nisso, este estudo teve como objetivo investigar as características chave de resíduos madeireiros de poda urbana, visando subsidiar estratégias de valorização e reaproveitamento sustentável.

2. Material e métodos

2.1 Coleta e caracterização do material

Galhos residuais de espécies comuns à arborização urbana tropical foram coletados, sendo elas *Handroanthus impetiginosus* (Mart. Ex DC.) Mattos (“Ipê Roxo”), *Licania tomentosa* (Benth.) Fritsch (“Oiti”) e *Pachira aquatica* Aubl. (“Monguba”). A coleta foi

realizada ao longo do sistema viário de Piracicaba, São Paulo, com acompanhamento da empresa responsável pela manutenção da arborização urbana. Ao total, coletou-se 25 galhos por espécie, correspondentes a cinco galhos de cinco indivíduos aleatórios, com diâmetro superior a 20 cm (Figura 1).

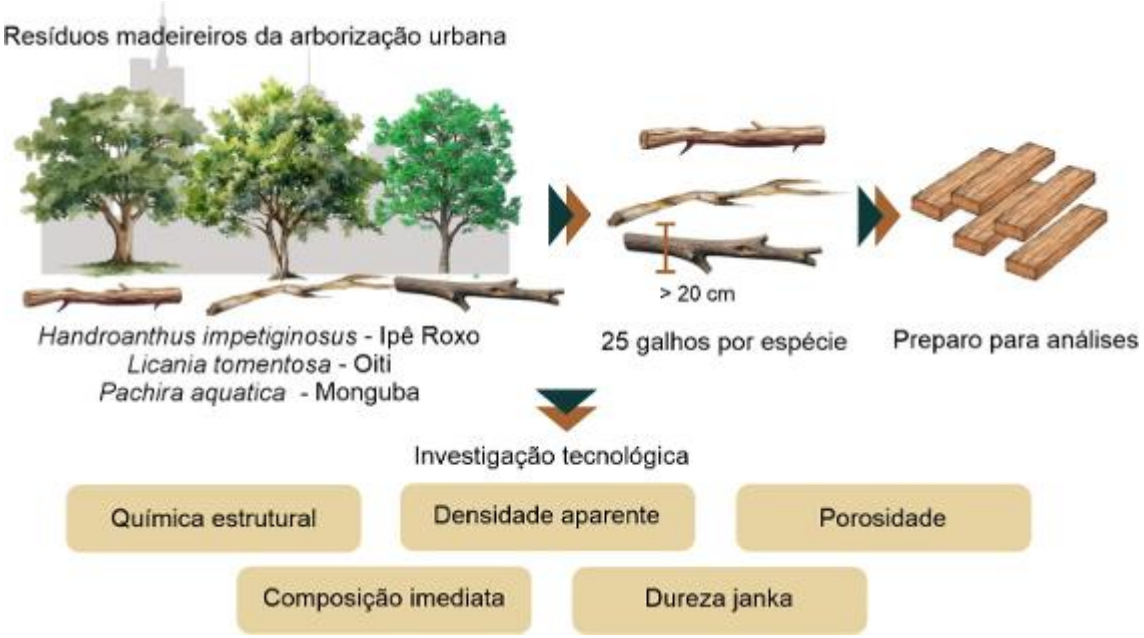


Figura 1 – Amostragem e investigação tecnológica de resíduos madeireiros da arborização urbana das espécies *Handroanthus impetiginosus*, *Licania tomentosa* e *Pachira aquatica*.

Os galhos foram armazenados ao ar livre até a umidade de equilíbrio (~12%) para posterior amostragem composta por espécie e caracterização tecnológica. A composição química estrutural foi determinada em amostras moídas e classificadas em peneiras de 40/60 *mesh*, conforme TAPPI T257 cm-85 (TAPPI, 1985). O material foi submetido à remoção dos extrativos seguindo a norma TAPPI T 264 cm-97 (TAPPI, 1997). O teor de lignina insolúvel em ácido foi determinado de acordo com a TAPPI T 222 om-02 (TAPPI, 2002), enquanto a lignina solúvel em ácido foi quantificada por espectrofotometria no ultravioleta, conforme Goldschmid (1971). O teor de lignina total foi calculado pela soma das frações insolúvel e solúvel em ácido, enquanto a holocelulose foi calculada por diferença.

A densidade aparente foi determinada em amostras com dimensões de 2 × 2 × 3 cm, a partir da relação entre massa e volume na umidade de equilíbrio. A porosidade foi determinada conforme ASTM D167-93 (ASTM, 1999). A umidade e a química imediata (teor de cinzas,

carbono fixo e materiais voláteis) foram obtidos conforme ASTM D1762 - 84 (ASTM, 2021). A dureza Janka foi avaliada em amostras de 5 x 5 x 15 cm, conforme ASTM D143-23 (ASTM, 2023) utilizando máquina universal de ensaios EMIC DL-10000, com capacidade de 100 kN.

2.2 Delineamento experimental e análise de dados

O experimento foi realizado em delineamento inteiramente casualizado considerando as espécies dos resíduos madeireiros de podas urbanas como tratamentos. Os dados foram coletados com cinco repetições e foram submetidos à verificação dos pressupostos de normalidade dos resíduos, pelo teste de Shapiro-Wilk, e homogeneidade das variâncias, pelo teste de Bartlett, para posterior análise de variância (ANOVA). Quando constatado efeito significativo das espécies, as médias foram comparadas pelo teste de Tukey a 5% de significância. Para cada variável analisada, foi apresentado o desvio-padrão para melhor interpretação dos intervalos de confiança. Todas as análises estatísticas foram conduzidas no *software* R (R CORE TEAM; COMPUTING, 2022).

3. Resultados e discussão

A composição química estrutural dos resíduos madeireiros de *Handroanthus impetiginosus*, *Licania tomentosa* e *Pachira aquatica* apresentou diferenças entre as espécies, conforme mostrado na Figura 2A.

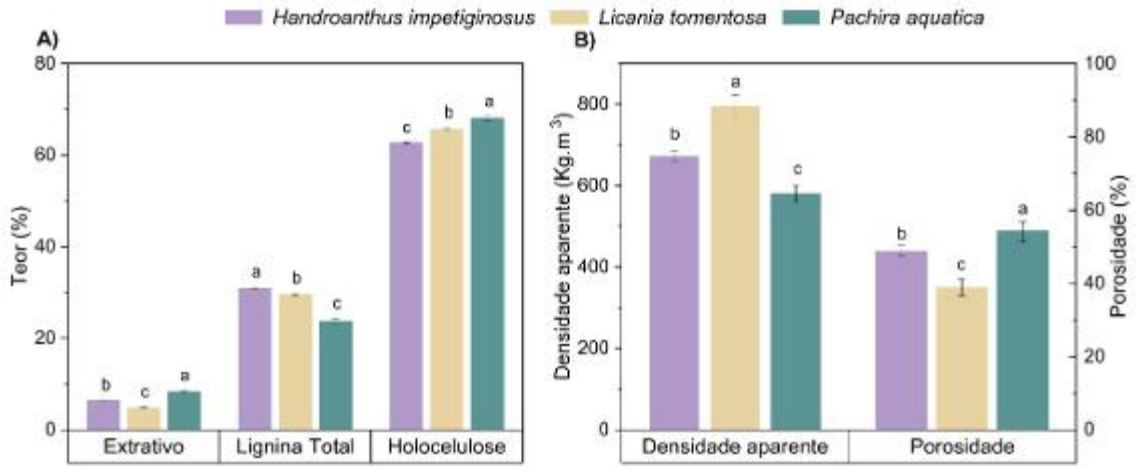


Figura 2 – Composição química estrutural (A), densidade aparente e porosidade (B) dos resíduos madeireiros de podas urbanas das espécies *Handroanthus impetiginosus*, *Licania tomentosa* e *Pachira aquatica*.

Os resíduos de *P. aquatica* apresentaram o maior teor de extrativos (8,30 ± 0,24%), seguida por *H. impetiginosus* (6,39 ± 0,18%) e *L.* tomentosa (4,81 ± 0,15%). Esse resultado sugere maior presença de compostos não estruturais, como ceras, resinas, compostos fenólicos e outros metabólitos secundários, que podem influenciar a durabilidade natural, a molhabilidade, coloração e o comportamento da madeira em processos de conversão termoquímica (Gao et al., 2024). Assim, os resíduos de *P. aquatica* apresentam potencial para rotas que explorem a fração extrativa ou a maior reatividade química em processos de fracionamento e obtenção de compostos de maior valor agregado, como extratos fenólicos, ceras e resinas naturais para formulação de revestimentos, aditivos vegetais para compósitos ou bioprodutos obtidos por conversão termoquímica.

Por outro lado, *H. impetiginosus* destacou-se pelo maior teor de lignina total (30,90 ± 0,25%), enquanto *P. aquatica* apresentou o menor valor (23,71 ± 0,51%). Como a lignina é o constituinte estrutural da parede celular mais aromático e resistente à degradação térmica (Kamdem Tamo et al., 2025; Yang et al., 2007), o maior teor observado em *H. impetiginosus* sugere aptidão para rotas que demandem maior estabilidade térmica e formação de resíduo carbonáceo. Além disso, a fração lignina pode ser explorada em rotas de maior valor agregado, incluindo adesivos, termoplásticos e fibras de carbono (Abdelaziz et al., 2016). Já *P. aquatica*, com maior teor de holocelulose (67,99 ± 0,71%), apresenta perfil mais associado à fração polissacarídica da madeira, composta por celulose e hemicelulose, o que pode favorecer rotas que valorizem carboidratos estruturais, como hidrólise, obtenção de açúcares fermentáveis, produção de biocombustíveis, e obtenção de açúcares de interesse industrial, como xilose e arabinose (Kamdem Tamo et al., 2025).

Quanto às propriedades físicas, *L. tomentosa* apresentou a maior densidade aparente (794,21 ± 29,49 $kg.m^{-3}$), seguida por *H. impetiginosus* (672,23 ± 12,35 $kg.m^{-3}$) e *P. aquatica* (580,22 ± 21,20 $kg.m^{-3}$), conforme mostrado na Figura 2B. Esse comportamento foi acompanhado por tendência inversa na porosidade, uma vez que *L. tomentosa* apresentou o menor valor (38,06 ± 2,44%), enquanto *H. impetiginosus* ocupou posição intermediária (48,14 ± 1,40%) e *P. aquatica* apresentou a maior porosidade (53,63 ± 2,73%). Essa relação indica que *L. tomentosa* possui estrutura física com maior massa por unidade de volume e menor proporção de espaços vazios. Associada ao teor relativamente elevado de lignina total (29,50 ± 0,29%), essa característica sugere maior rigidez e fortalecimento da parede celular (Pesquet et al., 2025), apontando sua aptidão para rotas que preservem a integridade física da madeira

ou demandem maior concentração de massa no produto final, como peças usinadas, artefatos de madeira, componentes decorativos e painéis.

Em contrapartida, a menor densidade aparente (580,22 ± 21,20 kg.m^{-3}) e maior porosidade (53,63 ± 2,73%) de *P. aquatica*, associadas ao maior teor de holocelulose e extrativos, indicam potencial para rotas como a produção de compósitos leves, painéis de baixa densidade, substratos lignocelulósicos e biocarvões para condicionamento de solo. Os resíduos de *H. impetiginosus* ocuparam uma posição intermediária de densidade aparente (672,23 ± 12,35 kg.m^{-3}) e porosidade (48,14 ± 1,40%). Quando associado ao maior teor de lignina total, esse comportamento reforça sua versatilidade tecnológica para rotas que combinem estabilidade estrutural e conversão termoquímica, como produção de objetos de madeira, biocarvão, carvão ativado e combustíveis sólidos densificados.

Em relação à umidade e composição imediata, *H. impetiginosus* apresentou a maior umidade (7,71 ± 0,38%), o menor teor de cinzas (1,12 ± 0,07%) e teor de carbono fixo estatisticamente semelhante ao de *L. tomentosa* (17,58 ± 0,45%) (Figura 3A). Embora a maior umidade demande atenção em processos de combustão direta devido a necessidade de secagem prévia, o baixo teor de cinzas e o elevado teor de carbono fixo são favoráveis para rotas termoquímicas. Em conjunto com o maior teor de lignina total, esses resultados reforçam a aptidão de *H. impetiginosus* para pirólise, produção de biocarvão, combustíveis sólidos e materiais carbonáceos, com menor geração de resíduo mineral após a conversão.

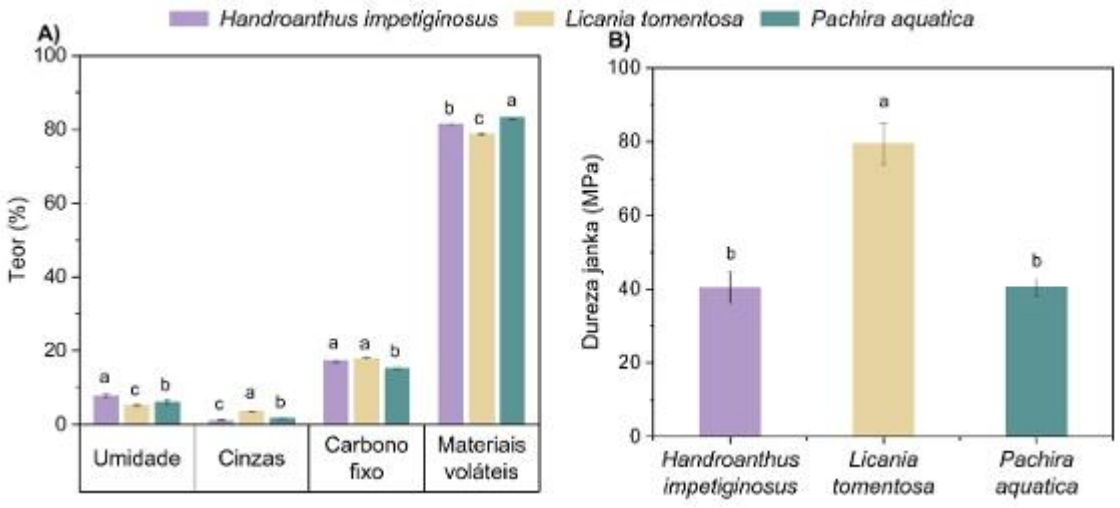


Figura 3 – Umidade, composição imediata (A) e dureza janka (B) dos resíduos madeireiros de podas urbanas das espécies *Handroanthus impetiginosus*, *Licania tomentosa* e *Pachira aquatica*.

Os resíduos de podas de *P. aquatica* apresentaram o maior teor de materiais voláteis (83,20 ± 0,43%) e menor teor de carbono fixo (15,18 ± 0,44%). Quando interpretado em conjunto com o maior teor de holocelulose, extrativos e maior porosidade, esse perfil reforça a aptidão da espécie para rotas que valorizem a liberação de frações voláteis, como em processos de pirólise rápida e gaseificação para produção de bio-óleo e de biocarvões mais porosos.

L. tomentosa, por sua vez, apresentou o maior teor de cinzas (3,52 ± 0,05%), o que pode limitar seu uso em combustão direta ou exigir maior controle operacional em sistemas energéticos, devido à maior geração de resíduo mineral. No entanto, o elevado teor de carbono fixo, a maior densidade aparente e a menor porosidade indicam potencial para rotas em que a concentração de massa e a compactação sejam desejáveis, como combustíveis densificados e materiais particulados de maior densidade, desde que o teor de cinzas seja considerado na avaliação da qualidade final.

A dureza Janka confirmou os perfis tecnológicos indicados pelas propriedades anteriores. *L. tomentosa* apresentou o maior valor (79,43 ± 5,55 MPa), reforçando o efeito combinado da maior densidade aparente e menor porosidade. Esse comportamento favorece o direcionamento de seus resíduos para rotas que preservem a forma sólida da madeira e demandem resistência superficial, como pequenos artefatos, brinquedos, peças decorativas, componentes de mobiliário e produtos usinados. Em contraste, *P. aquatica* (40,50 ± 2,28 MPa) e *H. impetiginosus* (40,44 ± 4,24 MPa), com menores valores de dureza, mantêm maior coerência com rotas que envolvam produção de partículas, compósitos, painéis, compactação ou conversão termoquímica.

4. Conclusões

As rotas de valorização e aproveitamento dos resíduos madeireiros da arborização urbana não devem ser definidas apenas pela espécie, mas pelo conjunto de propriedades químicas, físicas, energéticas e mecânicas da biomassa.

Os resíduos madeireiros de podas de *Handroanthus impetiginosus* apresentaram maior potencial para rotas associadas à valorização da lignina e à produção de materiais carbonáceos de valor agregado. *Pachira aquatica* destacou-se pelo aproveitamento da fração extrativa e dos carboidratos estruturais, com potencial para obtenção de extratos naturais e biocombustíveis. Já

Licania tomentosa mostrou maior aptidão para usos que preservem a estrutura sólida da madeira, como produtos usinados, pequenos artefatos e painéis de maior densidade.

Assim, os resultados demonstraram que os resíduos madeireiros de podas urbanas constituem uma fonte heterogênea de biomassa renovável, com potencial para múltiplas rotas de valorização. A caracterização tecnológica mostrou-se uma ferramenta essencial para orientar o reaproveitamento sustentável desses resíduos e sua inserção em estratégias de economia circular.

5. Agradecimentos

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES – Código de Financiamento 001), Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq – Chamada Universal nº. 18/2021), Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação do Espírito Santo (FAPES – Chamada Universal nº. 13/2025) e à Sociedade de Amparo ao Desenvolvimento Tecnológico e Cultural (Sadtec, Brasil).

6. Referências bibliográficas

Abdelaziz, O. Y., Brink, D. P., Prothmann, J., Ravi, K., Sun, M., García-Hidalgo, J., Sandahl, M., Hulteberg, C. P., Turner, C., Lidén, G., & Gorwa-Grauslund, M. F. (2016). Biological valorization of low molecular weight lignin. *Biotechnology Advances*, *34*(8), 1318–1346. https://doi.org/10.1016/J.BIOTECHADV.2016.10.001

ASTM, American Society for Testing and Materials. (1999). Test Method for Apparent and True Specific Gravity and Porosity of Lump Coke. Em *ASTM D167-93: Standard Test Method for Apparent and True Specific Gravity and Porosity of Lump Coke*. ASTM International. https://doi.org/10.1520/D0167-93R99E01

ASTM, American Society for Testing and Materials. (2023). *ASTM D143-23: Test Methods for Small Clear Specimens of Timber*. https://doi.org/10.1520/D0143-23

ASTM, American Society for Testing and Materials. (2021). *D1762-84: Standard Test Method for Chemical Analysis of Wood Charcoal*.

Dujesiefken, D., & Stobbe, H. (2002). The Hamburg Tree Pruning System – A framework for pruning of individual trees. *Urban Forestry & Urban Greening*, *1*(2), 75–82. https://doi.org/10.1078/1618-8667-00008

EPA, Environmental Protection Agency. (2023). *Yard Trimmings: Material-Specific Data*. https://www.epa.gov/facts-and-figures-about-materials-waste-and-recycling/yard-trimmings-material-specific-data

Faraca, G., Boldrin, A., & Astrup, T. (2019). Resource quality of wood waste: The importance of physical and chemical impurities in wood waste for recycling. *Waste Management*, *87*, 135–147. https://doi.org/10.1016/J.WASMAN.2019.02.005

Gao, C., Cui, X., & Matsumura, J. (2024). Multidimensional Exploration of Wood Extractives: A Review of Compositional Analysis, Decay Resistance, Light Stability, and Staining Applications. *Forests 2024, Vol. 15, Page 1782*, *15*(10), 1782. https://doi.org/10.3390/F15101782

Goldschmid, O. Ultraviolet spectra. In: SARKANEN, K. V.; LUDWIG, C. H. (eds.). Lignins: occurrence, formation, structure and reactions. New York: Wiley-Interscience, 1971. p. 241–266.

Kamdem Tamo, A., Doench, I., Deffo, G., Zambou Jiokeng, S. L., Doungmo, G., Fotsop, C. G., Tonleu Temgoua, R. C., Montembault, A., Serghei, A., Njanja, E., Kenfack Tonle, I., & Osorio-Madrazo, A. (2025). Lignocellulosic biomass and its main structural polymers as sustainable materials for (bio)sensing applications. *Journal of Materials Chemistry A*, *13*(30), 24185–24253. https://doi.org/10.1039/D5TA02900G

Morales, A., Hernández-Ramos, F., Perez-Arce, J., de Hoyos-Martínez, P. L., Erdocia, X., & Sillero, L. (2026). Unlocking the value of urban tree pruning waste: towards sustainable biorefinery solutions. *Cellulose 2026 33:8*, *33*(8), 4509–4525. https://doi.org/10.1007/S10570-026-07078-0

Nowak, D. J., Greenfield, E. J., & Ash, R. M. (2019). Annual biomass loss and potential value of urban tree waste in the United States. *Urban Forestry & Urban Greening*, *46*, 126469. https://doi.org/10.1016/J.UFUG.2019.126469

Pesquet, E., Cesarino, I., Kajita, S., & Pawlowski, K. (2025). Physiological roles of lignins – tuning cell wall hygroscopy and biomechanics. *New Phytologist*, *248*(6), 2674–2706. https://doi.org/10.1111/nph.70505

R Core Team, a language and environment for statiscal computing, & Computing, R. C. T. (2022). *R Foundation for Statistical Computing*.

Silva, T. C., Braz, R. L., Guaraná, E., Lins, T. R. da S., da Silva, G. A., Palha, M. de L. A. P. F., & Mascarenhas, A. R. P. (2025). Urban pruning waste has the potential to be used to produce biofuels and renewable energy in tropical regions. *Matéria (Rio de Janeiro)*, *30*, e20250458. https://doi.org/10.1590/1517-7076-RMAT-2025-0458

Speak, A. F., & Salbitano, F. (2023). The impact of pruning and mortality on urban tree canopy volume. *Urban Forestry & Urban Greening*, *79*, 127810. https://doi.org/10.1016/J.UFUG.2022.127810

TAPPI, Technical Association of the Pulp and Paper Industry. (2002). *T 222 om-02*. Acid-insoluble lignin in wood and pulp.

TAPPI, Technical Association of the Pulp and Paper Industry. (1985). *TAPPI T257 cm-85: Sampling and preparing wood for analysis*. Tappi Press.

TAPPI, Technical Association of the Pulp and Paper Industry. (1997). *T 264 cm-97*. Preparation of wood for chemical analysis.

Yang, H., Yan, R., Chen, H., Lee, D. H., & Zheng, C. (2007). Characteristics of hemicellulose, cellulose and lignin pyrolysis. *Fuel*, *86*(12–13), 1781–1788. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2006.12.013

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Secagem ao ar livre de madeira serrada de *Pinus* sp. durante o outono em Santa Maria, Rio Grande do Sul

Giovani Mateus Wermeier Weber[1], Ana Lara Mick Benedetti Rodrigues[1], Andrio Schmidt Santos[1]; Fernanda Miranda[1]; Gabriele Faverzani Fontella[1]; Josias Alves da Silva Júnior[1]; Vanessa Teixeira Dias[1]; Talita Baldin[1]

[1] Universidade Federal de Santa Maria - UFSM

Resumo: O presente trabalho objetivou analisar o processo de secagem ao ar livre de madeira serrada de *Pinus sp*. nas condições de outono no município de Santa Maria, Rio Grande do Sul. A metodologia consistiu no desdobro primário e secundário de uma tora de 1,82 m de comprimento e 0,1852 m³ de volume com casca, utilizando uma serra-fita móvel horizontal, resultando na produção de nove tábuas que foram dispostas numa pilha padrão ao ar livre para secagem. O monitoramento da umidade foi executado pelo método gravimétrico, com duas amostras-controle dispostas aleatoriamente na pilha, realizado ao longo de 57 dias de experimento. Após a secagem, foram observados defeitos de contração tangencial (4,13%), incidência de fungos manchadores em todas as peças e rachaduras de topo com índices de até 55,5%. Os resultados indicaram uma redução gradual da umidade, sendo mais intensa no período inicial até o Ponto de Saturação das Fibras (PSF), o qual foi atingido em aproximadamente 12 dias. Ao final do período, verificou-se que a umidade final da madeira permaneceu superior à umidade de equilíbrio de 15,5% recomendada para a região no outono. Concluiu-se que o período de exposição ao ar livre foi insuficiente para que a madeira atingisse a estabilidade higroscópica desejada nas condições climáticas avaliadas.

Palavras-chave: Curva de secagem; Desdobro; Serraria

Drying of Pine Wood under Autumn Conditions in Santa Maria, RS

Abstract: This study aimed to analyze the air-drying process of *Pinus sp*. sawn timber under autumn conditions in Santa Maria, Rio Grande do Sul. The methodology consisted of the primary and secondary breakdown of a log measuring 1.82 m in length and 0.1852 m³ of volume with bark, using a horizontal portable band saw, resulting in the production of nine boards, which were stacked in a standard outdoor pile for air drying. Moisture content was monitored using two control samples randomly placed within the stack over a 57-day experimental period. After drying, tangential shrinkage defects (4.13%), staining fungi on all boards, and end checks with rates of up to 55.5% were observed. The results indicated a gradual reduction in moisture content, with the most pronounced decrease occurring during the initial stage until the fiber saturation point (FSP), which was reached in approximately 12 days. At the end of the period, it was found that the final moisture content remained above the equilibrium moisture content of 15.5% recommended for the region in autumn. It was concluded that the outdoor exposure period was insufficient for the wood to reach the desired hygroscopic stability under the evaluated climatic conditions.

Keywords: Breakdown; Drying curve; Sawmill

1. Introdução

O setor florestal brasileiro apresenta expressiva relevância econômica, fundamentado no cultivo de florestas de rápido crescimento, com destaque para o gênero *Pinus*, que representa cerca de 19% das áreas plantadas no país, com maior concentração na região Sul. De acordo com os dados da Indústria Brasileira de Árvores (IBÁ, 2023), essa produção é destinada tanto para o segmento de celulose e papel (47%) quanto para o mercado de madeira sólida (53%), que engloba serrarias e painéis.

A transformação industrial da madeira tem início nas serrarias por meio do processo de desdobro, no qual as toras são processadas mecanicamente para a obtenção de peças de madeira serrada. No momento do corte, a madeira de *Pinus sp*. apresenta teores de umidade elevados, frequentemente superiores a 60%. A madeira possui natureza higroscópica, sendo capaz de absorver ou liberar água para o meio ambiente conforme as condições do local (Corradi, 2021).

Nesse cenário, a secagem é a etapa mais importante para a obtenção de material com a umidade adequada para a sua utilização final, proporcionando aumento da resistência mecânica, redução da suscetibilidade ao ataque de agentes xilófagos e melhoria da estabilidade dimensional do material (Tomio, 2020). A condução inadequada desta etapa pode acarretar defeitos tecnológicos severos, como rachaduras e empenamentos. Embora a madeira de *Pinus* sp. seja considerada de fácil secagem graças às suas características de baixa densidade, alta porosidade e abundância de alburno (Foelkel, 2017), esses fatores junto a sua coloração clara se torna um agravante na susceptibilidade à fungos manchadores, comprometendo a qualidade final do produto (Magalhães, 2005). Esse risco torna-se ainda mais relevante quando associado às condições climáticas da região Sul do Brasil, uma vez que a velocidade de secagem ao ar livre é diretamente influenciada por variáveis meteorológicas como temperatura, umidade relativa, precipitação e circulação de ventos, sendo o processo mais lento nas estações de outono e inverno (Oliveira & Branco, 2020).

A secagem ao ar livre (ou natural) destaca-se como a modalidade mais econômica para a redução da umidade, embora apresente um ritmo mais lento e dependa diretamente de variáveis climáticas locais, como temperatura, umidade relativa e velocidade do vento (Galvão & Jankowsky, 1985; Hajian et al. 2024). Para otimizar esse processo, Batista et al. (2012) ressaltam a importância de um empilhamento horizontal correto, utilizando tabiques para facilitar a circulação de ar entre as peças e garantir a homogeneidade da perda de água.

Diante desse cenário, o estudo teve como objetivo analisar o processo de secagem ao ar livre de madeira serrada de *Pinus* sp. durante o outono, buscando compreender o

comportamento da madeira sob as condições desta estação e gerar informações a fim de orientar empresas do setor madeireiro na organização de seus pátios de secagem.

2. Material e métodos

O experimento foi conduzido no pátio da serraria da Universidade Federal de Santa Maria (29° 43' 29.80" S e 53° 42' 58.01" O), localizada no município de Santa Maria, RS. O material biológico consistiu em uma tora de *Pinus* sp. com 1,82 m de comprimento e diâmetros de 35,5 cm. Os volumes encontrados foram 0,1852 m³ com casca e 0,1556 m³ sem casca.

Anterior ao desdobro da madeira avaliou-se a qualidade das toras por meio dos índices de achatamento e conicidade, classificando-as conforme os critérios de comercialização. O desdobro foi realizado em serra-fita móvel horizontal, com retirada de quatro costaneiras para formação de um bloco central, posteriormente transformado em nove tábuas. Durante o processamento, foram registrados os tempos de corte para a determinação da velocidade de alimentação (VA), calculada pela razão entre o comprimento da tora e o tempo despendido.

A eficiência operacional da serraria foi determinada em função do volume de toras processado por operador e por turno (m³/operário/turno), enquanto o rendimento em madeira serrada foi obtido pela relação percentual entre o volume serrado produzido e o volume das toras processadas.

Para o monitoramento da secagem, foram selecionadas duas tábuas representativas para servirem como amostras-controle, identificadas como T1 e T2. De cada extremidade destas peças, foram retiradas seções de 16 cm para a confecção de dois corpos de prova destinados à determinação da umidade inicial, reduzindo o comprimento final das tábuas-controle para 1,50 m. As seções foram submetidas à secagem em estufa a 103 ± 2 °C por seis dias até atingirem massa constante. O cálculo do teor de umidade inicial (TU_i) foi realizado pelo método gravimétrico, conforme preconizado pela norma NBR 14929 (2017).

As tábuas foram inspecionadas para verificação dos defeitos de desdobro e tiveram o comprimento, largura e espessura mensurados para o cálculo do coeficiente de anisotropia após secagem, posteriormente foram transportadas para o pátio da serraria e organizadas em uma área plana, visando maximizar a exposição à luz solar e à ventilação natural. A montagem da pilha de secagem seguiu o método gradeado, com a base elevada 50 cm do solo por meio de tijolos para evitar a ascensão de umidade. As peças foram dispostas horizontalmente e intercaladas por tabiques separadores, garantindo espaços para a circulação do ar entre as camadas e facilitando a evaporação da água, conforme ilustrado na Figura 1.

Figura 1 – Pilha de secagem padrão de tábuas de *Pinus* sp. montada pela equipe ao ar livre.



Fonte: Autores (2026)

O monitoramento do teor de umidade foi realizado pelo método gravimétrico ao longo de 57 dias. As duas amostras-controle foram pesadas em balança de precisão a cada dois dias, permitindo o acompanhamento sistemático da perda de massa e a posterior construção da curva de secagem. Para correlacionar a taxa de secagem com as condições ambientais, foram utilizados dados meteorológicos diários de temperatura e precipitação obtidos junto à Estação de Radiossondagem de Santa Maria/RS (Código 83937) do Instituto Nacional de Meteorologia (*INMET*). O cálculo da umidade atual *(TUa)* relacionou o peso atual com o *TUi* e o peso inicial das amostras controle.

Ao término dos 57 dias de secagem ao ar livre, procedeu-se à avaliação qualitativa de todas as tábuas da pilha para identificação de defeitos decorrentes do processo de secagem. Realizou-se inspeção visual para detecção de fungos manchadores e empenamentos, bem como a mensuração das rachaduras de topo com auxílio de régua milimetrada. O índice representativo de rachaduras (%) foi calculado pela relação entre a soma do comprimento das rachaduras e o comprimento total da peça. Adicionalmente, a estabilidade dimensional foi avaliada por meio da mensuração de todas as peças em suas dimensões de comprimento, largura e espessura utilizando paquímetro digital e trena milimetrada. Essas medições foram realizadas no início e ao final do experimento, permitindo o cálculo dos índices de contração linear (longitudinal, radial e tangencial) por meio da variação percentual entre as dimensões úmidas e secas.

Os dados obtidos durante o desdobro da madeira na serraria são apresentados por meio de valores únicos para os parâmetros velocidade de alimentação, rendimento e eficiência operacional. Na etapa de secagem, será apresentada a curva de secagem, construída a partir da

variação do teor de umidade de duas amostras-controle ao longo do tempo. Por fim, a qualidade das tábuas será avaliada individualmente, considerando-se a ocorrência e a intensidade dos defeitos observados em cada peça.

3. Resultados e discussão

A tora de *Pinus sp.* apresentou um índice de achatamento de 94,6% (classificada como superior) e conicidade de 54,95%. Esses índices são fundamentais na avaliação da qualidade da madeira, pois toras com baixo achatamento permitem um melhor posicionamento no desdobro, resultando no rendimento líquido elevado do desdobro, de 75%.

Quanto à eficiência operacional, o valor de 0,02 m³/operário/turno é significativamente inferior aos padrões de serrarias industriais. Contudo, essa baixa produtividade é intrínseca ao uso da serra-fita móvel horizontal em um contexto experimental. Diferente de sistemas industriais de alta velocidade (como *gang-saws* ou serras circulares múltiplas), a serra móvel prioriza a flexibilidade e a redução do desperdício (cortes com bitola ajustada conforme a posição do bloco na serra), o que justifica o alto rendimento em detrimento da produção em escala.

A Velocidade de Alimentação (VA) média foi de 0,0039 m/s, com variações pontuais entre 0,0271 m/s e 0,0438 m/s. Observou-se que peças com maior espessura, como a Tábua 8 (4,5 cm), tendem a exigir uma condução mais lenta para garantir a estabilidade do corte e a qualidade da superfície serrada, evidenciando a limitação de potência do equipamento móvel frente a diferentes dimensões de peças.

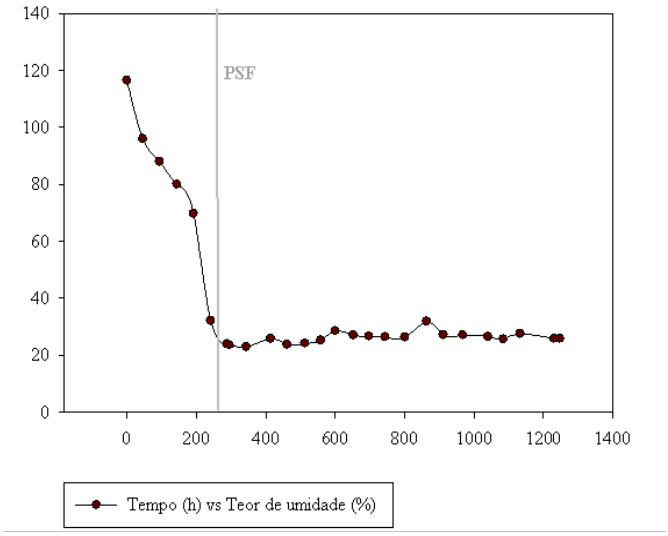
Tabela 1 – Dimensões das tábuas, tempos e velocidades de alimentação no desdobro secundário

Tábuas	**Comprimento** (m)	**Largura** (cm)	**Espessura** (cm)	**Tempo** (s)	**VA** (m/s^2)
1	1,82	28,8	2,5	41,51	0,0438
2	1,82	27,8	2,5	38,60	0,0472
3	1,82	28,8	2,5	46,52	0,0391
4	1,83	25,2	2,7	51,08	0,0358
5	1,82	28,8	2,5	53,92	0,0338
6	1,85	28,8	2,5	61,06	0,0303
7	1,83	28,7	3,0	57,99	0,0316
8	1,84	27,8	4,5	60,03	0,0307
9	1,53	20,03	1,0	56,42	0,0271

Fonte: Autores (2026)

A dinâmica de secagem foi intensamente influenciada pelas oscilações climáticas típicas do outono em Santa Maria (Figura 2). A madeira iniciou com um elevado teor de umidade de 116,47%, levando aproximadamente 12 dias para atingir o Ponto de Saturação das Fibras (PSF). Durante este intervalo inicial de 12 dias, a precipitação acumulada foi de 100,3 mm, enquanto no período subsequente (do 13º ao 57º dia) registrou-se um acumulado de 32,8 mm, totalizando 133,1 mm de chuva em todo o experimento (Figura 3).

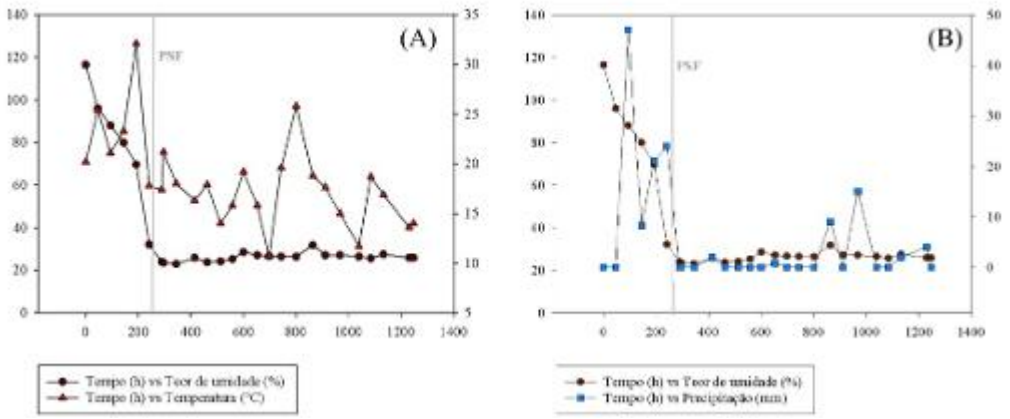
Figura 2 – Curva de secagem da madeira de *Pinus* sp. no período de outono de Santa Maria, RS



Fonte: Autores (2026)

As temperaturas variaram entre a mínima de 10,7 °C e a máxima de 32,1 °C, com uma média de 18,55 °C, condições que elevaram a umidade relativa do ar e reduziram a pressão de vapor necessária para a remoção da água (Figura 3-A). Cabe destacar que, mesmo nos dias sem precipitação, o microclima local de Santa Maria nesta estação é marcado pela forte incidência de orvalho e serração (nevoeiro), fenômenos que mantêm a superfície das peças úmidas durante as primeiras horas do dia, retardando significativamente a secagem. Essa combinação de fatores impediu que a madeira alcançasse a umidade de equilíbrio de 15,5% no prazo monitorado, evidenciando que a secagem natural no outono gaúcho é um processo lento e dependente de proteção física contra as intempéries

Figura 3 – Relação entre o teor de umidade e as variáveis meteorológicas (A: Temperatura; B: Precipitação)



Fonte: Autores (2026)

Ao final de 57 dias, a madeira não atingiu a Umidade de Equilíbrio (UE) de 15,5% recomendada para o outono-inverno na região de Santa Maria. Essa resistência à secagem final é explicada pelas condições climáticas da estação: a redução da temperatura média e os picos de precipitação registrados (Figura 3-B) elevaram a umidade relativa do ar, reduzindo a pressão de vapor necessária para a remoção da água higroscópica. Conclui-se que, para o outono gaúcho, o período de exposição deve ser superior a 60 dias ou complementado em estufa para atingir padrões de marcenaria.

A análise qualitativa da secagem revelou que 100% das peças apresentaram fungos manchadores. A proliferação foi favorecida pelo alto teor de umidade inicial do Pinus e pela ausência de cobertura na pilha, que manteve as peças expostas à umidade das chuvas e dificultou a secagem superficial rápida. Vale destacar, contudo, que a incidência destes fungos ocorreu de forma estritamente superficial, sendo possível a sua remoção por meio de simples raspagem manual. Dessa forma, para a recuperação da qualidade estética e comercial das tábuas, não seria necessária a remoção de grandes espessuras de madeira, sendo um leve processo de beneficiamento (aplainamento ou lixamento superficial) suficiente para eliminar as manchas sem comprometer as dimensões finais das peças.

A estabilidade dimensional da madeira de *Pinus sp*. foi avaliada por meio dos índices de contração após os 57 dias de secagem. Observou-se que a contração foi praticamente nula nos sentidos longitudinal e radial, entretanto, apresentou valores expressivos no sentido tangencial, atingindo o ápice de 4,13% na tábua 9. De acordo com Galvão e Jankowsky (1985), essa anisotropia é característica do gênero e ocorre devido à perda de água das paredes celulares após

o material atingir o Ponto de Saturação das Fibras (PSF), podendo resultar em empenamentos se não houver restrição mecânica na pilha.

As rachaduras de topo afetaram cinco das nove tábuas monitoradas. A Tabela 3 detalha o comprimento das fendas e os respectivos índices percentuais

Tabela 3 – Índices representativos de rachaduras de topo ao final da secagem.

Tábuas	**Comprimento** (cm)	**Índice de rachaduras** (%)
1	10	5,49
2	23	12,64
3	17	9,34
4	35	19,23
5	102,7	55,51

Fonte: Autores (2026)

A presença dessas rachaduras de topo compromete significativamente a qualidade final do material. Embora esse tipo de defeito possa ser contornado por meio do destopo das peças, processo que consiste no corte das extremidades danificadas, tal procedimento resulta na desvalorização comercial da madeira, uma vez que as tábuas não mantêm seu comprimento original e sofrem redução no seu volume útil final.

Conforme apresentado por Hajian et al. (2024) o aparecimento de deformações na madeira pode ser explicado com a remoção muito rápida da água superficial em altas temperaturas, causando tensões internas. Portanto, como a secagem das tábuas no experimento ocorreu de forma branda, colapsos, empenos e endurecimentos superficiais não foram observados.

O estudo apresentou limitações relacionadas ao reduzido número de amostras-controle, à influência das condições ambientais e às dificuldades operacionais durante a secagem, fatores que podem ter afetado a uniformidade da perda de umidade e a ocorrência de defeitos na madeira. Além disso, a ausência de cobertura e de pesos sobre a pilha favoreceu a secagem desigual. Para pesquisas futuras, recomenda-se ampliar o número de amostras, avaliar diferentes métodos de empilhamento e comparar a secagem com o uso de coberturas e

monitoramento da velocidade do vento, visando otimizar o processo de secagem e a qualidade da madeira serrada.

4. Conclusões

Diante da análise do processamento e da secagem da madeira de *Pinus sp*., conclui-se que durante 57 dias de secagem em Santa Maria/RS, durante o outono, não foram suficientes para que a madeira atingisse a Umidade de Equilíbrio (15,5%), indicando que a secagem natural, nas condições avaliadas, requer maior tempo de exposição ou complementação em estufa.

A elevada incidência de fungos manchadores e rachaduras de topo demonstrou que as peças ficaram muito úmidas por elevado período e a ausência de cobertura e de pesos sobre a pilha comprometeu a qualidade da madeira. Assim, recomenda-se a utilização de cobertura para proteção contra intempéries, a aplicação de pesos para reduzir deformações e o monitoramento de um número maior de amostras, visando aumentar a representatividade estatística e otimizar o processo de secagem.

5. Referências bibliográficas

Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2017). Madeira: Determinação do teor de umidade: Método por secagem em estufa *(NBR 14929).* ABNT.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2018). Informação e documentação: Referências: Elaboração (NBR 6023). ABNT.

Batista, D. C., Klitzke, R. J., & Rocha, M. P. (2012). Secagem de madeira serrada. Em Processamento da madeira (pp. 45–78). Editora UFPR.

Corradi, G. W. (2021). Propriedades físico-mecânicas e secagem da madeira. Editora Acadêmica.

Fioresi, T., Piroca, S., Dalla Costa, H. W., Trevisan, R., Fortes, F. O., & Gatto, D. A. (2014). Umidade de equilíbrio da madeira na região norte do Rio Grande do Sul em diferentes estações do ano. Ciência da Madeira, *5*(1), 34–41. https://doi.org/10.12953/2177-6830.v05n01a04

Foelkel, C. (2017). A água e a madeira do Pinus. PinusLetter, (49).

Galvão, A. P. M., & Jankowsky, I. P. (1985). Secagem racional da madeira. Nobel.

Hajian, E., Huber, J., Hasson, L., & Sandberg, D. (2024). High temperature drying of sawn timber—A review. Drying Technology, 42(9), 1397–1414. https://doi.org/10.1080/07373937.2024.2365858

Indústria Brasileira de Árvores. (2023). Relatório anual 2023. https://iba.org/?publications=relatorio-anual-2023

Instituto Nacional de Meteorologia. (2018). Mapa da rede de estações meteorológicas. https://mapas.inmet.gov.br/

Magalhães, W. L. E. (2005). Controle de manchadores e apodrecedores da madeira de pínus. Em II Seminário de Atualidades em Proteção Florestal: Palestras e resumos (CD-ROM). FURB.

Oliveira, L. S., & Branco, M. O. A. (2020). Secagem de madeira ao ar livre (Informe Técnico n.º 1). Laboratório de Secagem da Madeira (LASEMA), Centro de Engenharias, Universidade Federal de Pelotas. https://wp.ufpel.edu.br/lasema/files/2021/11/Informe-01-Secagem-de-madeira-ao-ar-livre.pdf

Santini, E. J., & Haselein, C. R. (2002). Efeito da temperatura e velocidade do ar sobre a taxa de secagem da madeira de *Pinus elliottii* Engelm. Ciência Florestal, 12(2), 99–106.

Simpson, W. T. (1971). Equilibrium moisture content prediction for wood. Forest Products Journal, 21(5), 48–49.

Tomio, G. F. (2020). Avaliação tecnológica da madeira de Eucalyptus benthamii Maiden et Cambage com 23 anos de idade (Dissertação de mestrado, Universidade do Estado de Santa Catarina). Repositório Institucional da UDESC. https://repositorio.udesc.br/handle/UDESC/15159

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Temperatura e tempo de pirólise influenciam as razões molares de biochar de casca de arroz

Bráulio da Silva de Oliveira[1]; Angélica de Cássia Oliveira Carneiro[1]; Cristiane Pedrazzi[2]; Paula Gabriella Surdi de Castro[1]; Edna Lopes Mendes Rosado[1]; Fernanda Jorge de Jesus[1]; Raquel Julia Cipriano dos Santos[1]; Leticia Costa Peres[1]

[1] Universidade Federal de Viçosa - UFV
[2] Universidade Federal de Santa Maria - UFSM

Resumo: A conversão de resíduos sólidos agroflorestais em biochar tem se mostrado uma alternativa eficiente para gestão desses materiais, com potencial de melhoria na qualidade do solo e estoque de carbono por longos períodos. Neste contexto, este trabalho teve como objetivo avaliar o efeito do tempo e temperatura nas razões molares H/C e O/C de biochars produzidos com casca de arroz. O experimento consistiu em pirólises com temperaturas de 450, 550 e 650 ºC e tempo de residência de 30, 45 e 60 minutos. Foram realizadas análises de cinzas, elementar e a relação molar H/C e O/C. A temperatura de pirólise aumentou os teores de carbono e cinzas e reduziu os teores de hidrogênio e oxigênio, reduzindo as razões molares H/C e O/C, atendendo as diretrizes das certificadoras de biochar. Os biochars produzidos com temperaturas de 550 e 650ºC apresentaram maiores performances para os projetos de remoção de carbono, pois tiveram suas relações H/C abaixo de 0,4.

Palavras-chave: Sustentabilidade; Remoção de carbono; Economia circular.

Pyrolysis temperature and time influence the molar ratios of rice husk biochar.

Abstract: The conversion of agroforestry solid waste into biochar has proven to be an efficient alternative for managing these materials, with potential for improving soil quality and storing carbon over long periods. In this context, this study aimed to evaluate the effect of time and temperature on the H/C and O/C molar ratios of biochars produced from rice husk. The experiment consisted of pyrolysis at temperatures of 450, 550, and 650 °C and residence times of 30, 45, and 60 minutes. Ash and elemental analyses were performed, along with the H/C and O/C molar ratios. Pyrolysis temperature increased carbon and ash contents and reduced hydrogen and oxygen contents, decreasing the H/C and O/C molar ratios, meeting biochar certification guidelines. Biochars produced at temperatures of 550 and 650 °C showed higher performance for carbon removal projects, as they had H/C ratios below 0.4

Keywords: Sustainability; Carbon removal; Circular economy.

1. Introdução

A crescente preocupação com o manejo adequado dos resíduos agroindustriais tem impulsionado estudos e iniciativas que atuam diretamente na resolução deste problema. A estimativa da geração anual global de resíduos da produção de biomassa de origem agrícola e do seu processamento é da ordem de 140 Gt, apresentando significativos problemas de manejo com a biomassa descartada com potenciais impactos ambientais negativos (Tripath et al., 2019).

Dentre esses resíduos, destaca-se a casca de arroz. O arroz está entre os principais grãos consumidos mundialmente. De acordo com o USDA (2024), o arroz ocupa a terceira colocação em termos de área cultivada utilizada entre os grãos e cereais produzidos no mundo, com 167,6 milhões de hectares, atrás apenas das áreas ocupadas por trigo e milho, com 222,1 milhões e 201,7 milhões de hectares, respectivamente.

Segundo o CEPEA (2024), o Brasil está entre os 10 maiores produtores mundiais e é o maior produtor da América Latina, possuindo uma área estimada de 1,7 milhões de hectares de plantio de arroz. O Rio Grande do Sul é a região mais representativa em relação ao cultivo do grão, sendo responsável por aproximadamente 57% do plantio nacional.

Se acordo com Singh (2022) a produção de arroz gera um alto volume de resíduos, sendo que no setor industrial, cada tonelada de arroz em casca processado produz cerca de 200 kg de casca de arroz, 140 kg de arroz quebrado e 100 kg de farelo de arroz. A partir desse cenário, formas de destinações diversas foram desenvolvidas, sendo a queima para geração de energia sua principal aplicação. Vale ressaltar que devido ao seu elevado teor de cinzas rica em sílica, também pode ser utilizado na fabricação de cimentos, concretos e cerâmicas, assim como substrato para mudas (Fernandes et al., 2014; Rodrigues, 2015; Cunha 2018; Mourão 2025).

Embora a casca de arroz apresente diversas aplicações nos setores agrícola, industrial e energético, sua conversão em biochar pode representar uma alternativa de maior valor agregado, pois promove o aproveitamento sustentável desse resíduo, contribui para o sequestro de carbono, melhora as propriedades físicas, químicas e biológicas do solo e favorece a mitigação das mudanças climáticas por meio do armazenamento de carbono em formas mais estáveis (Lehmann & Joseph, 2015).

Assim, a transformação termoquímica desse material em biochar torna-se uma alternativa atrativa. O biochar é o produto sólido obtido a partir da pirólise da biomassa em um ambiente com ausência ou restrição de oxigênio, sendo caracterizado como um material rico em carbono e de estrutura porosa. Seu uso agronômico está atrelado a diversos benefícios como condicionador de solo, tais como melhora na qualidade do solo, retenção de nutrientes, alta capacidade de retenção de água entre outros (Aisyah et al., 2025). Vale destacar, que essas

características são intimamente influenciadas tanto pela biomassa de origem quanto pelas condições do seu processo de produção.

O uso do biochar também contribui para o estoque de carbono no solo, uma vez que esse material apresenta alto teor de carbono recalcitrante, resultando em uma estrutura mais estável e resistente à degradação, podendo persistir por centenas ou até milhares de anos (Ernest, 2024).

Assim, as razões molares H/C e O/C dos biochars são importantes para estimar o potencial de degradação e o seu tempo de permanência no solo, além de constituírem uma das bases para a certificação de qualidade (Leng et al., 2019).

Certificadoras estabeleceram o limite máximo da razão H/C de 0,7 para definir o biochar como estável. Dentro dessa faixa, observa-se a presença de carbono aromático policondensado, sendo estimado que aproximadamente 50% do carbono presente no biochar permanece estável após 100 anos (Budai et al., 2013). Valores inferiores a 0,4 definem o biochar como altamente estável, ampliando o horizonte de permanência do carbono no ambiente. Deve-se ainda destacar que certificadoras como a EBC (*European Biochar Certificate*) utilizam valores inferiores a 0,7 e 0,4 de relação H/C como um dos parâmetros para definir a qualidade do biochar, classificando-os como EBC Feed e EBC FeedPlus, respectivamente (EBC, 2026).

A razão O/C também tem sua importância, pois colabora para avaliar a estabilidade do biochar no solo, uma vez, que valores mais baixos evidenciam menor presença de grupos polares e maior quantidade de anéis aromáticos estáveis (Biswal & Balasubramanian, 2025), sendo que, recomenda-se valores abaixo de 0,4 (O/C) (EBC, 2026).

Nesse contexto, este trabalho teve como objetivo avaliar os efeitos da temperatura e do tempo de pirólise sobre a composição química elementar e as razões molares H/C e O/C dos biocarvões produzidos a partir da casca de arroz, de modo a fornecer subsídios para projetos de remoção de carbono.

2. Material e métodos

A biomassa utilizada foi a casca de arroz, aproximadamente 100 quilos, doado por uma usina de beneficiamento de arroz localizada na cidade de Itaqui/RS, com umidade em base seca de aproximadamente 2%. O material foi homogeneizado e submetido ao processo de quarteamento, visando à obtenção de uma amostra representativa para sua caracterização e

produção dos biochars. Posteriormente, as cascas de arroz foram acondicionadas em sacos plásticos devidamente identificados e vedados, de modo a evitar alterações no teor de umidade até a realização das pirólises para produção dos biochars.

O biochar foi produzido por meio de pirólise em atmosfera controlada de oxigênio. Em que a biomassa de casca de arroz foi inserida em um contêiner metálico com dimensões nominais de 0,430 m × 0,160 m × 0,160 m, preenchendo aproximadamente 80% (± 750g de biomassa) de seu volume total. Em seguida, o contêiner foi inserido em um reator elétrico tipo mufla (GP-Científica 2000). Foram avaliadas nove combinações de pirólise, com três temperaturas (450, 550 e 650 °C) e três tempos de residência (30, 45 e 60 minutos) com três repetições cada combinação, totalizando 27 unidades amostrais. Após a pirólise, o contêiner foi retirado da mufla e resfriado até temperatura ambiente para posterior determinação da sua composição química elementar e teor de cinzas.

O teor de cinzas foi determinado de acordo com os procedimentos descritos na norma ASTM D1762–84 (ASTM, 2021).

A composição química elementar foi determinada em analisador CHNS (Vario Micro Cube, Elementar®). Os teores de carbono, hidrogênio e nitrogênio foram determinados conforme a ISO 16948 (2015), enquanto o teor de enxofre foi determinado de acordo com a ISO 16994 (2016). O teor de oxigênio foi obtido pela soma dos teores de carbono, nitrogênio, hidrogênio, enxofre e cinzas, subtraído de 100. As razões atômicas H/C e O/C foram calculadas a partir das massas molares dos respectivos elementos, conforme as metodologias propostas pela Puro.earth (2025).

O experimento seguiu um delineamento inteiramente casualizado (DIC) em esquema fatorial duplo (3 temperaturas × 3 tempos), em três repetições, totalizando 27 unidades amostrais.

3. Resultados e discussão

De modo geral, observou-se que uma redução no teor de oxigênio e hidrogênio, e um ligeiro aumento no teor de carbono e alto incremento no teor de cinzas (Tabela 1).

Tabela 1 – Valores médios da composição química elementar (%), cinzas e razões molares dos biochars produzidos com casca de arroz em função do tempo e temperatura de pirólise

Tratamento	C	H	N	S	O	*Cinzas (%)*	H/C	O/C
450° 30'	49,500	2,610	0,485	0,027	10,282	*37,10*	0,63	0,16
450° 45'	50,267	2,430	0,461	0,013	8,601	*38,23*	0,58	0,13
450° 60'	51,567	2,397	0,461	0,008	6,872	*38,70*	0,56	0,10
550° 30'	52,500	1,987	0,439	0,020	3,430	*41,62*	0,45	0,05
550° 45'	51,767	1,727	0,393	0,009	3,191	*42,91*	0,40	0,05
550° 60'	51,400	1,490	0,367	0,011	4,760	*41,97*	0,35	0,07
650° 30'	52,700	1,607	0,408	0,015	1,729	*43,54*	0,37	0,03
650° 45'	51,567	1,450	0,357	0,016	2,767	*43,84*	0,34	0,04
650° 60'	51,567	1,837	0,440	0,005	2,467	*43,69*	0,43	0,04

A redução dos teores de oxigênio e hidrogênio está associada à quebra de ligações mais fracas na estrutura da biomassa, principalmente das hemiceluloses e celulose, quando submetida à temperaturas elevadas durante a pirólise, ocorrendo a liberação de água, hidrocarbonetos, H_2, CO e CO_2, dentre outros compostos voláteis (Rambhatla et al., 2025). A remoção desses grupos promove aumento da fração carbonosa e intensifica a formação de estruturas aromáticas mais condensadas e recalcitrantes (Ravindiran et al., 2024).

Além disso, diferentemente de biomassas florestais, biomassas oriundas de cultivos agrícolas possuem maiores concentrações de N, S, P, K e Ca, sendo que, após a pirólise, parte desses elementos permanece no resíduo como fração mineral, resultando na redução da proporção de carbono nesses materiais (Ippolito et al., 2020). O biochar de casca de arroz é altamente alcalino, apresenta elevado teor de cinzas, altos níveis de sílica, além de sódio, ferro e magnésio em menores teores (Miranda, 2026). Esses minerais são moderadamente solúveis em água e servem como fontes de nutrientes para as plantas quando o biochar é aplicado ao solo (Prakongkep et al., 2013). Logo, o biochar de casca de arroz pode possuir relevância quanto a nutrição de culturas, devido a sua composição mineralógica, sendo necessário, porém, estudos da disponibilidade efetiva desses nutrientes.

Embora tenham menores teores de carbono elementar quando comparado a outras biomassas agroflorestais, nota-se na Figura 1 que os biochars produzidos nas temperaturas de 550 e 650ºC tiveram relações H/C baixas.

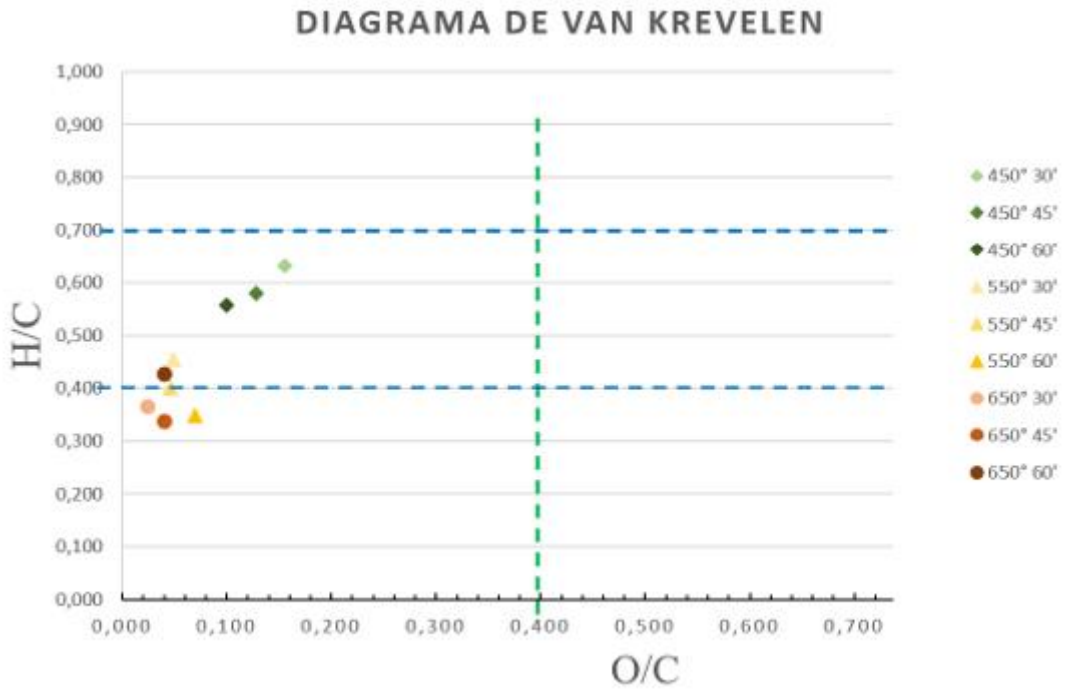


Figura 1 – Diagrama de Van Krevelen (razões atômicas H/C versus O/C) dos biochars de casca de arroz produzidos em diferentes temperaturas e tempos de pirólise.

A redução das razões H/C e O/C com o aumento da temperatura indicou a remoção de grupos funcionais oxigenados e hidrogenados por reações de desidratação e descarboxilação (Enders et al., 2012; Rambhatla et al., 2025). Entre as condições de pirólise avaliadas, a temperatura foi o principal fator responsável pelo aumento da estabilidade e do grau de condensação do biochar, enquanto o tempo de residência exerceu efeito secundário, promovendo apenas pequenas alterações nas razões atômicas, especialmente nas condições mais severas de pirólise das cascas de arroz.

As razões molares H/C apresentaram valores satisfatórios, pois todos os tratamentos ficaram abaixo do limite máximo de 0,7, indicado pelas entidades certificadoras como parâmetro de estabilidade. Os tratamentos realizados a 550 °C por 45 e 60 min e a 650 °C por 30 e 45 min apresentaram razões H/C inferiores a 0,4, indicando maior estabilidade dos biocarvões

Desse modo, ressalta que temperaturas de pirólise mais elevadas tendem a favorecer a formação de compostos aromáticos de carbono relativamente estáveis, geralmente considerados

mais recalcitrantes à oxidação microbiana (Guo e Chen, 2014), garantindo maior estabilidade e atuando assim como forma de sequestro de carbono a longo prazo.

Em relação às razões molares O/C, observou-se a mesma tendência de redução, e todos os tratamentos apresentaram valores inferiores a 0,4, considerados desejáveis. Ao avaliarem a capacidade de biochars produzidos a partir da casca de arroz para capturar amônia, Kang et al. (2024) encontraram valores de 0,4 e 0,6 para as razões H/C e O/C, respectivamente. Huang (2025), ao investigar os efeitos da temperatura de pirólise e dos métodos de modificação sobre as características de biocarvões de casca de arroz empregados na adsorção de metais pesados, encontrou valores da razão H/C entre 0,4 e 0,6 e da razão O/C entre 0,09 e 0,4.

Diante desse cenário, o tratamento realizado a 650 °C por 45 min destacou-se por apresentar os menores valores das razões molares H/C e O/C, correspondentes a 0,38 e 0,04, respectivamente.

Com base nos resultados obtidos, infere-se que o biochar produzido a partir da casca de arroz apresenta elevado potencial de persistência e estabilidade no solo, em razão da presença de carbono recalcitrante em sua estrutura. Dessa forma, esse material pode contribuir para o manejo e a valorização dos resíduos agroindustriais, o fortalecimento da economia circular e a mitigação das mudanças climáticas, ao favorecer o armazenamento de carbono no solo por longos períodos. Além disso, seu elevado teor de fração inorgânica indica potencial para contribuir com a nutrição vegetal

4. Conclusões

Conclui-se que a temperatura de pirólise influenciou as razões H/C e O/C como esperado, foi observado a redução das relações com o aumento de temperatura, demonstrando que os biochars produzidos apresentaram características associadas à estabilidade, com potencial para armazenamento de carbono no solo. Enquanto a relação O/C ficou com os melhores índices, com todos os tratamentos com razão O/C abaixo de 0,4, com destaque para os biochars produzidos na temperatura de 650ºC e tempo de residência de 45’.

Cabe ainda destacar, o possível potencial agronômico da fração inorgânica encontrada (valores acima de 37%), sendo necessário estudos a respeito da qualificação, quantificação e disponibilidade dos minerais presentes.

Assim, a produção de biochar a partir da casca de arroz representa uma alternativa sustentável para o aproveitamento de um resíduo agroindustrial que é produzido de forma abundante e sem fim adequado, possibilitando sua transformação em um material de maior

valor agregado, com potencial aplicação na melhoria da qualidade dos solos e no ciclo global do carbono.

5. Agradecimentos

Os autores agradecem ao CNPq, ao LAPEM, ao DEF, ao Programa de Pós Graduação em Ciências Florestais, à FUNARBE, à UFV, à FAPEMIG (Projetos APQ-05311-24 e APQ-04599-25) e ao CNPq (Processo nº 444395/2024-5) pelo apoio a esta pesquisa.

6. Referências bibliográficas

ASTM International. (2021). ASTM D1762-84(2021): Standard test method for chemical analysis of wood charcoal. https://doi.org/10.1520/D1762-84R21

Biswal, B. K., & Balasubramanian, R. (2025). Use of biomass-derived biochar as a sustainable material for carbon sequestration in soil: Recent advancements and future perspectives. npj Materials Sustainability, 3, Article 26. https://doi.org/10.1038/s44296-025-00066-8

Budai, A., Zimmerman, A. R., Cowie, A. L., Webber, J. B. W., Singh, B. P., Glaser, B., Masiello, C. A., Andersson, D., Shields, F., Lehmann, J., Camps Arbestain, M., Williams, M., Sohi, S., & Joseph, S. (2014). Biochar carbon stability test method: An assessment of methods to determine biochar carbon stability. International Biochar Initiative. https://doi.org/10.13140/RG.2.2.16359.42402

Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada [CEPEA]. (2024). Informações sobre o mercado de arroz brasileiro. Acessado em 19 de julho de 2026, de https://www.cepea.esalq.usp.br/

Cunha, A. L., Melo, D. A. de, & Santos, C. L. (2018). Casca de arroz como fonte de substrato para mudas de mulungu. In Anais do Congresso Nacional da Diversidade do Semiárido (CONADIS). Realize Editora. https://www.editorarealize.com.br/artigo/visualizar/50592

Deutsches Institut für Normung. (2011). *Solid biofuels — Conversion of analytical results from one basis to another* (DIN EN 15296:2011-04).

Enders, A., Hanley, K., Whitman, T., Joseph, S., & Lehmann, J. (2012). Characterization of biochars to evaluate recalcitrance and agronomic performance. *Bioresource Technology*, *114*, 644–653. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.03.022

Ernest, B., Yanda, P. Z., & Hansson, A. (2024). Long-term effects of adding biochar to soils on organic matter content, persistent carbon storage, and moisture content in Karagwe, Tanzania. *Scientific Reports*, *14*, Article 30565. http://doi.org/10.1038/s41598-024-83372-w

European Biochar Certificate [EBC]. (2025). *European Biochar Certificate – Guidelines for a sustainable production of biochar* (Version 10.5E). Recuperado em 17 de julho de 2026, de https://www.carbon-standards.com/en/standards/service-492~production-of-biochar.html

Fernandes, L., Sabino, M. G., & Rossetto, H. L. (2014). Método de extração de sílica da casca do arroz. *Cerâmica*, *60*(353), 160–163. https://doi.org/10.1590/S0366-69132014000100022

Guo, M., & Chen, Z. (2015). Characteristics and applications of biochar for environmental remediation: A review. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, *45*(9), 939–969. https://doi.org/10.1080/10643389.2014.924180

Huang, Z., Wang, Q., Zhang, Y., Du, B., Zhou, J., & Ji, D. (2025). Effects of pyrolysis temperatures and modified methods on rice husk-derived biochar characteristics and heavy metal adsorption. Molecules, 30(17), Article 3616. https://doi.org/10.3390/molecules30173616

Ippolito, J. A., Cui, L., Kammann, C., Wrage-Mönnig, N., Estavillo, J. M., Fuertes-Mendizabal, T., Cayuela, M. L., Sigua, G., Novak, J. M., Spokas, K. A., & Borchard, N. (2020). Feedstock choice, pyrolysis temperature and type influence biochar characteristics: A comprehensive meta-data analysis review. *Biochar*, *2*, 421–438. https://doi.org/10.1007/s42773-020-00067-x

International Organization for Standardization [ISO]. (2015). *Solid biofuels—Determination of total content of carbon, hydrogen and nitrogen* (ISO 16948:2015).

International Organization for Standardization [ISO]. (2016). *Solid biofuels—Determination of total content of sulfur and chlorine* (ISO 16994:2016).

Kang, Y.-G., Park, D.-G., Lee, J.-Y., Choi, J., Kim, J.-H., Kim, J.-H., Yun, Y.-U., & Oh, T.-K. (2024). Ammonium capture kinetic, capacity, and prospect of rice husk biochar produced by different pyrolysis conditions. *Scientific Reports*, *14*, Article 29910. https://doi.org/10.1038/s41598-024-80873-6

Lehmann, J., & Joseph, S. (Eds.). (2015). *Biochar for environmental management: Science, technology and implementation* (2nd ed.). Routledge.

Leng, L., Huang, H., Li, H., Li, J., & Zhou, W. (2019). Biochar stability assessment methods: A review. *Science of the Total Environment*, *647*, 210–222. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.07.402

Miranda, E. S. de, Oliveira, A. M. de, Bacarji, E., Neves Júnior, A., & Cascudo, O. (2026). *Characterization of Brazilian biochar from rice husk for application in cementitious pastes*. **Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração, 23**, e3326. https://doi.org/10.4322/2176-1523.20263326

Mourão, G. de C., Pereira, L. R. S., Mourão, A. B., Reis, E. D., & Bacelar, B. A. (2025). Utilização da cinza da casca de arroz como material pozolânico em concretos. Encontro Nacional de Aproveitamento de Resíduos na Construção, *9*(1), 1–5. https://doi.org/10.46421/enarc.v9i1.7360

Rodrigues, E. D. (2015). *Casca de arroz como alternativa energética: Um estudo de caso no município de Dom Pedrito - RS* [Trabalho de conclusão de curso, Universidade Federal do Pampa]. Repositório Institucional da UNIPAMPA. https://repositorio.unipampa.edu.br/server/api/core/bitstreams/cd0ae112-7177-493e-bd1c-d9490197b80b/content

Prakongkep, N., Gilkes, R. J., Wiriyakitnateekul, W., Duangchan, A., & Darunsontaya, T. (2013). The effects of pyrolysis conditions on the chemical and physical properties of rice husk biochar. International Journal of Material Science, 3(3), 97–103.

Puro.earth. (2025). Puro Biochar Methodology: Edition *2025* (Version 2). Puro.earth.

Rambhatla, N., Panicker, T. F., Mishra, R. K., Manjeshwar, S. K., & Sharma, A. (2025). Biomass pyrolysis for biochar production: Study of kinetics parameters and effect of temperature on biochar yield and its physicochemical properties. Results in Engineering, 25, 103679. https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.103679

Ravindiran, G., Rajamanickam, S., Janardhan, G., Hayder, G., Alagumalai, A., Mahian, O., Lam, S.-S., & Sonne, C. (2024). Production and modifications of biochar to

engineered materials and its application for environmental sustainability: A review. Biochar, 6(1), Article 62. https://doi.org/10.1007/s42773-024-00350-1

Singh, R., & Patel, M. (2022). Effective utilization of rice straw in value-added by-products: A systematic review of state of art and future perspectives. *Biomass and Bioenergy*, *159*, 106411. https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2022.106411

Tripathi, N., Hills, C. D., Singh, R. S., & Atkinson, C. J. (2019). Biomass waste utilization in low-carbon products: Harnessing a major potential resource. npj Climate and Atmospheric Science, 2, Article 35. https://doi.org/10.1038/s41612-019-0093-5

United States Department of Agriculture [USDA], Foreign Agricultural Service. (2024). Production, Supply and Distribution (PSD) Online: Custom query. Recuperado em 25 de julho de 2026, de https://apps.fas.usda.gov/psdonline/

Zhang, L., Yao, Z., Zhao, L., Fu, P., Jia, J., Yi, W., & Li, Z. (2024). Effects of various pyrolysis temperatures on the physicochemical characteristics of crop straw-derived biochars and their application in tar reforming. Catalysis Today, 433, Article 114663. https://doi.org/10.1016/j.cattod.2024.114663

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Umidade de equilíbrio de madeiras tropicais: densidade básica e equação de Simpson

Ricardo Gabriel de Almeida Mesquita[1]; Wallace Placido dos Santos[1]; Beatriz Alves Lins[1]; Mara Lucia Agostini Valle[1]; Murilo Pereira da Silva[1]; Calline Chaves de Jesus[1]; Douglas Edson Carvalho[1]; Luiz Fernando Silva Magnago[1]

[1] Universidade Federal do Sul da Bahia (UFSB), Itabuna, Bahia, Brasil

Resumo: A umidade de equilíbrio da madeira (UEM) é fundamental para programas de secagem e utilização industrial, porém informações para espécies tropicais no sul da Bahia ainda são escassas sob condições reais de exposição ambiental regional. Este trabalho objetivou determinar experimentalmente a UEM de madeiras com diferentes densidades básicas e compará-la aos valores estimados pela equação de Simpson. Foram avaliados 30 corpos de prova de *Cedrela* sp. (0,43 g·cm^{-3}), *Cordia* sp. (0,52 g·cm^{-3}) e *Manilkara* sp. (0,91 g·cm^{-3}), expostos em ambiente natural entre agosto de 2024 e agosto de 2025. As médias anuais de UEM foram de 16,23%, 13,61% e 12,35%, respectivamente, reduzindo com o aumento da densidade básica. A equação de Simpson superestimou a UEM em todas as espécies, com erro médio de aproximadamente 3,4 pontos percentuais, maior nas madeiras mais densas. Os resultados permitem propor faixas preliminares de secagem entre 12 e 16% para as condições climáticas da região.

Palavras-chave: Higroscopicidade; Sorção; Secagem.

Equilibrium moisture content of tropical woods: basic density and the Simpson equation

Abstract: Equilibrium moisture content (EMC) is essential for defining wood drying schedules and industrial utilization; however, information for tropical wood species in southern Bahia under real environmental exposure conditions remains scarce. This study aimed to experimentally determine the EMC of woods with contrasting basic densities and compare the results with values estimated by the Simpson equation. Thirty specimens of *Cedrela* sp. (0.43 g·cm^{-3}), *Cordia* sp. (0.52 g·cm^{-3}), and *Manilkara* sp. (0.91 g·cm^{-3}) were exposed under natural environmental conditions from August 2024 to August 2025. Annual mean EMC values were 16.23%, 13.61%, and 12.35%, respectively, decreasing with increasing basic density. The Simpson equation systematically overestimated EMC for all species, with an average error of approximately 3.4 percentage points, which was greater for denser woods. The results allow the proposal of preliminary regional drying ranges between 12 and 16% for the climatic conditions of southern Bahia.

Keywords: Hygroscopicity; Sorption; Drying.

1. Introdução

A madeira é um material higroscópico capaz de absorver e trocar continuamente moléculas de água com o ambiente até atingir equilíbrio com a temperatura e a umidade relativa

do ar. A presença de água nas paredes celulares e na estrutura porosa influencia diretamente propriedades físicas, mecânicas, térmicas e dimensionais, afetando rigidez, resistência mecânica, retração, inchamento, condutividade térmica, durabilidade biológica e estabilidade dimensional durante o processamento e uso estrutural (Thybring et al., 2022; Thybring, Kymäläinen e Rautkari, 2018).

Segundo Thybring, Kymäläinen e Rautkari (2018), a água absorvida nas paredes celulares modifica as ligações de hidrogênio entre os polímeros estruturais da madeira, alterando seu comportamento higroscópico. De forma complementar, Thybring et al. (2022) destacam que as interações madeira–água permanecem entre os principais temas da ciência da madeira, uma vez que a umidade influencia desde os processos de secagem até o desempenho em serviço.

Estudos recentes demonstram que a sorção de água depende não apenas das condições ambientais, mas também de características intrínsecas da madeira. Fredriksson et al. (2023) verificaram que a composição química das paredes celulares constitui um dos principais fatores associados à capacidade de sorção de água, enquanto Sun et al. (2024) observaram que os processos de adsorção e dessorção apresentam comportamento dependente da espécie e de sua estrutura anatômica.

A umidade de equilíbrio da madeira (UEM) corresponde ao estado em que o material não apresenta ganho nem perda líquida de água em relação ao ambiente. O conhecimento desse parâmetro é essencial para definição de programas de secagem, armazenamento, processamento industrial e utilização final da madeira, contribuindo para reduzir defeitos e movimentações dimensionais (Baraúna et al., 2022; Tian et al., 2024).

No Brasil, diferentes estudos têm empregado a equação de Simpson para estimativa da UEM em distintas condições climáticas. Cassiano et al. (2013) observaram aplicação satisfatória dos modelos de Simpson e Hailwood-Horrobin em Sinop (MT). Souza et al. (2016) reportaram valores de UEM entre 5,08 e 13,49% para municípios de Mato Grosso. Mais recentemente, Baraúna et al. (2022) encontraram UEM média de 12,42% para madeiras de *Eucalyptus* spp. em Montes Claros (MG), verificando maior proximidade entre valores experimentais e estimados sob condições específicas de temperatura e umidade relativa.

Apesar desses avanços, ainda são escassos estudos conduzidos em condições reais de exposição natural envolvendo espécies tropicais com densidades básicas contrastantes, especialmente em regiões de elevada umidade atmosférica, como o sul da Bahia, onde ainda são utilizados valores generalistas de teor de umidade final sem validação regional.

Partiu-se da hipótese de que espécies com diferentes densidades básicas apresentam comportamentos higroscópicos distintos sob as mesmas condições ambientais, resultando em diferenças entre os valores experimentais de UEM e aqueles estimados pela equação de Simpson. Assim, objetivou-se determinar experimentalmente a umidade de equilíbrio de madeiras tropicais com densidades contrastantes expostas às condições climáticas do sul da Bahia, comparar os valores observados com os estimados pela equação de Simpson e gerar informações técnicas para programas regionais de secagem e utilização industrial da madeira.

2. Material e métodos

2.1 Área experimental e determinação da umidade de equilíbrio

O experimento foi conduzido no campus Jorge Amado da Universidade Federal do Sul da Bahia (UFSB), localizado no município de Ilhéus, região sul do estado da Bahia, caracterizada por clima tropical úmido, com elevada umidade relativa do ar ao longo do ano. Para caracterização climática do período experimental, foram utilizados dados mensais de temperatura média do ar (T, °C) e umidade relativa média (UR, %) referentes ao período de agosto de 2024 a agosto de 2025, obtidos por meio de consulta online ao banco de dados do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), utilizando os registros da estação meteorológica automática A410, localizada no município de Ilhéus, Bahia.

Foram selecionadas três espécies florestais com densidades básicas contrastantes, visando avaliar a influência da densidade sobre o comportamento higroscópico da madeira: *Cedrela* sp. (Cedro), com densidade básica média de aproximadamente 0,43 g·cm^{-3}; *Cordia* sp. (Claraíba), com densidade básica média de aproximadamente 0,52 g·cm^{-3}; e *Manilkara* sp. (Massaranduba), com densidade básica média de aproximadamente 0,91 g·cm^{-3}. Para cada espécie foram utilizados 10 corpos de prova, totalizando 30 unidades experimentais. Os corpos de prova foram confeccionados a partir de diferentes peças de madeira disponíveis na serraria da Comissão Executiva do Plano da Lavoura Cacaueira (CEPLAC), localizada em Ilhéus, Bahia. As densidades básicas utilizadas neste estudo foram determinadas previamente por método gravimétrico em laboratório.

As amostras foram mantidas em condição natural de exposição ambiental. As massas úmidas dos corpos de prova foram determinadas quinzenalmente, em intervalos de 15 dias, por meio de pesagens sucessivas. Ao término do período experimental, todos os corpos de prova foram secos em estufa até massa constante, obtendo-se a massa seca (Ms). A partir da massa

seca final, foi calculada retroativamente a umidade de equilíbrio experimental correspondente a cada data de pesagem.

A umidade de equilíbrio experimental (UEMexp) foi determinada pela Equação (1):

$$UE\,M_{\exp} = \frac{M_u - M_s}{M_s} \times 100$$

em que *Mu* corresponde à massa úmida da amostra em cada período de avaliação (g) e *Ms* corresponde à massa seca da amostra (g).

2.2 Estimativa da umidade de equilíbrio pelo modelo de Simpson

A umidade de equilíbrio da madeira foi estimada utilizando a equação de Simpson, baseada na teoria de sorção de Hailwood-Horrobin, conforme Mendes e Arce (2003), utilizando os dados climáticos mensais obtidos para o período experimental.

A umidade de equilíbrio estimada (UEMest) foi calculada pela Equação (2):

$$EMC = \left(\frac{K_1 K_2 h}{1 + K_1 K_2 h} + \frac{K_2 h}{1 - K_2 h} \right) \frac{1800}{W}$$

em que *EMC* corresponde à umidade de equilíbrio estimada (%), *h* corresponde à umidade relativa do ar expressa em fração decimal e *T* corresponde à temperatura média do ar (°C). As constantes foram calculadas conforme Simpson:

$$K_1 = 4.737 + 0.04773\,T - 0.00050123\,T^2$$

$$K_2 = 0.705941 + 0.001698\,T - 0.000005553\,T^2$$

$$W = 223.384 + 0.6942\,T + 0.0185324\,T^2$$

2.3 Avaliação do erro de estimativa e análise estatística

O erro absoluto entre os valores experimentais e estimados foi calculado mensalmente para cada espécie por meio da Equação (3):

$$Erro = \left| UE\,M_{est} - UE\,M_{\exp} \right|$$

Posteriormente, os valores de erro foram correlacionados com a densidade básica das espécies, visando avaliar a influência dessa propriedade sobre a precisão do modelo preditivo.

Inicialmente, os dados foram submetidos à verificação dos pressupostos da análise de variância, por meio do teste de normalidade de Shapiro–Wilk e do teste de homogeneidade de variâncias de Levene. Atendidos os pressupostos, os dados experimentais foram submetidos à análise de variância (ANOVA) em delineamento inteiramente casualizado, considerando as

espécies como tratamentos. Quando identificadas diferenças significativas ($p < 0,05$), as médias foram comparadas pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Adicionalmente, foi ajustado modelo de regressão linear entre o erro de estimativa e a densidade básica das espécies, com determinação do coeficiente de determinação (R^2), visando avaliar o comportamento do erro em função da densidade da madeira. As análises estatísticas e a elaboração dos gráficos foram realizadas no software R, versão 4.3.1.

3. Resultados e discussão

A variação sazonal da umidade de equilíbrio da madeira (UEM) ao longo do período experimental evidenciou comportamento consistente com as oscilações climáticas regionais, com redução dos valores durante os meses de maior temperatura e aumento nos períodos de maior umidade atmosférica (Figura 1). Em todas as espécies avaliadas, a tendência temporal acompanhou as variações mensais de temperatura média e umidade relativa do ar, confirmando a forte dependência da UEM em relação às condições ambientais.

A equação de Simpson reproduziu adequadamente a tendência sazonal observada, porém apresentou superestimação sistemática dos valores experimentais ao longo de praticamente todo o período avaliado. A média anual estimada foi superior à média experimental para todas as espécies, indicando que o modelo generalista pode não representar integralmente as condições higroscópicas específicas do sul da Bahia.

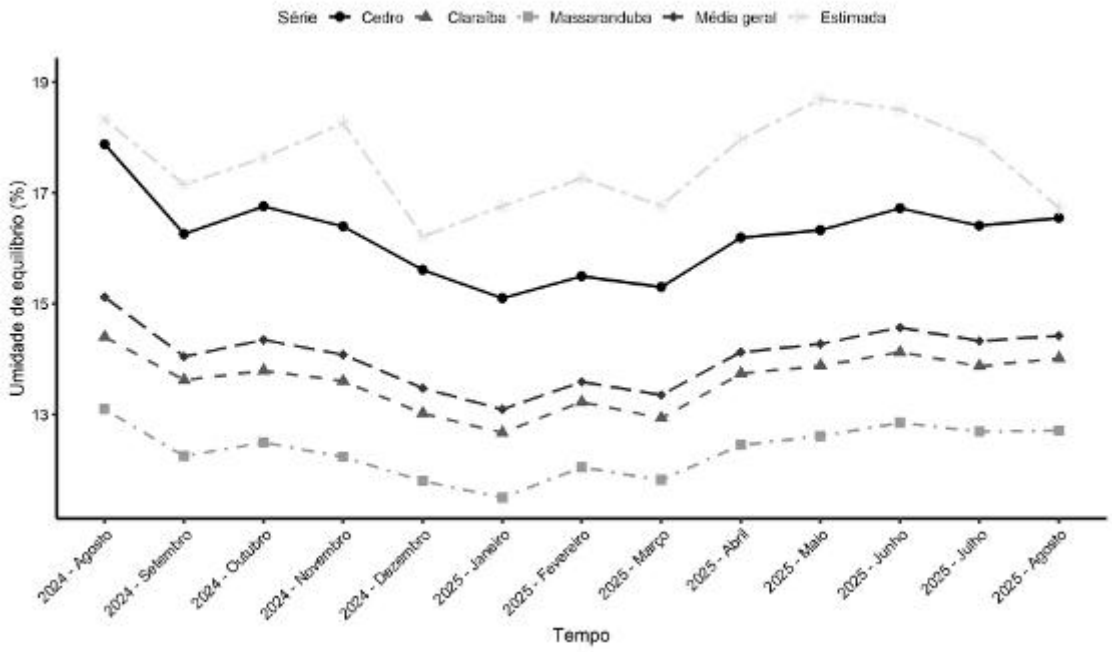


Figura 1 - Variação mensal da umidade de equilíbrio experimental das espécies avaliadas e valores estimados pela equação de Simpson entre agosto de 2024 e agosto de 2025.

Resultado semelhante foi relatado por Baraúna et al. (2022), que avaliaram a UEM de *Eucalyptus* spp. e verificaram maior proximidade entre valores experimentais e estimados apenas em determinadas condições de temperatura e umidade relativa, especialmente próximas de 30 °C e 72% de umidade relativa. Os autores reportaram UEM média de 12,42% para as condições de Montes Claros, Minas Gerais.

Considerando as médias anuais experimentais, *Cedrela* sp. apresentou o maior valor médio de UEM (16,23%), seguida por *Cordia* sp. (13,61%) e *Manilkara* sp. (12,35%). A análise estatística revelou diferenças significativas entre as espécies ($p < 0,05$), confirmadas pelo teste de Tukey (Figura 2).

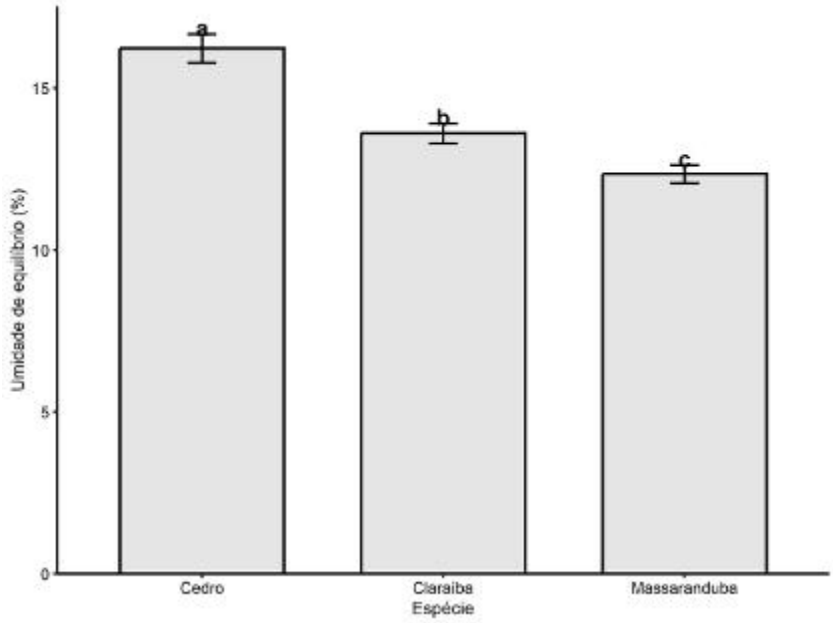


Figura 2 - Umidade média anual de equilíbrio das espécies avaliadas. Barras representam média ± intervalo de confiança de 95%. Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

As diferenças observadas sugerem influência direta da densidade básica sobre o comportamento higroscópico das espécies avaliadas. Madeiras de menor densidade tendem a apresentar maior adsorção de água sob as mesmas condições ambientais, enquanto espécies de maior densidade apresentaram menores valores médios de UEM.

Thybring et al. (2022) destacam que a água absorvida nas paredes celulares altera diretamente propriedades físicas e mecânicas da madeira, sendo esse comportamento influenciado por características anatômicas, composição química e acessibilidade dos grupos hidroxila.

Fredriksson et al. (2023) demonstraram que a composição química da parede celular representa um dos fatores mais relevantes na sorção de água, embora nenhum parâmetro isolado seja suficiente para explicar completamente o comportamento higroscópico entre espécies distintas.

A comparação entre valores experimentais e estimados mostrou superestimação sistemática da equação para todas as espécies avaliadas. Os menores desvios foram observados para *Cedrela* sp. (0,43 g cm^{-3}), enquanto *Manilkara* sp. (0,91 g cm^{-3}) apresentou os maiores erros relativos.

A análise da relação entre o erro de estimativa da equação de Simpson e a densidade básica mostrou associação positiva entre essas variáveis (Figura 3), indicando aumento progressivo da discrepância entre valores estimados e experimentais à medida que espécies de maior densidade foram consideradas.

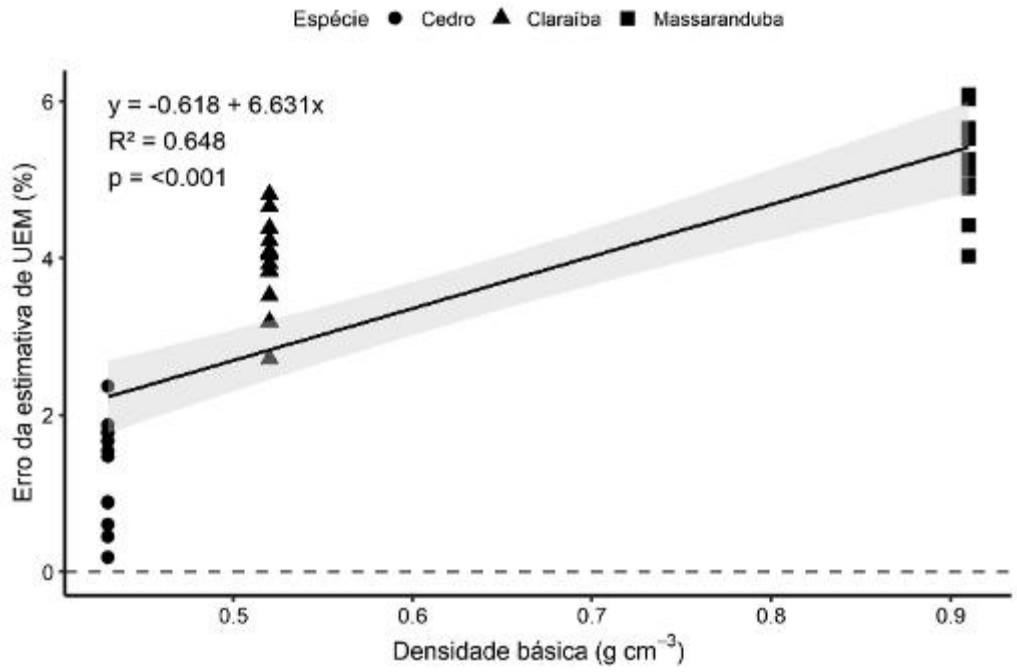


Figura 3 - Relação entre o erro de estimativa da equação de Simpson e a densidade básica das espécies avaliadas.

Esse comportamento sugere que modelos generalistas podem não captar integralmente particularidades anatômicas e físico-químicas de madeiras tropicais de alta densidade em condições ambientais específicas. A regressão linear ajustada indicou aumento significativo do erro de estimativa da equação de Simpson com o incremento da densidade básica das espécies avaliadas ($R^2 = 0,648$; $p < 0,001$), demonstrando que aproximadamente 64,8% da variação observada no erro de estimativa pode ser explicada pela densidade básica da madeira. Esses resultados indicam que madeiras mais densas tendem a apresentar maior divergência entre os valores experimentais e aqueles estimados pelo modelo, reforçando a necessidade de ajustes regionais e específicos para diferentes grupos de densidade.

Sun et al. (2024) observaram que o comportamento de sorção apresenta dependência direta da espécie e da estrutura anatômica, influenciando tanto a cinética quanto os estados de equilíbrio da água durante os processos de adsorção e dessorção.

Do ponto de vista aplicado, os resultados obtidos indicam potencial para desenvolvimento de equações regionais de predição da UEM incorporando simultaneamente variáveis climáticas locais e propriedades intrínsecas da madeira, especialmente densidade básica. Tian et al. (2024) destacaram que modelos específicos podem aumentar significativamente a precisão preditiva da distribuição de umidade em componentes estruturais de madeira submetidos a condições ambientais variáveis.

Para as condições climáticas avaliadas no sul da Bahia, os resultados sugerem que a madeira serrada destinada ao armazenamento e uso regional deve ser seca para faixas entre 12 e 16%, dependendo da densidade básica da espécie, sendo aproximadamente 15–16% para madeiras leves, 13–14% para madeiras de densidade intermediária e 12–13% para madeiras densas. Caso as madeiras, após secagem, tenham destinos diferentes ao local de secagem original, recomenda-se que a secagem seja realizada até umidade de equilíbrio mais baixa, ou seja 12%. Assim, minimiza-se o risco de problemas como empenamento, rachaduras e busca-se maior estabilidade em usos finais.

4. Conclusões

A equação de Simpson superestimou a umidade de equilíbrio da madeira nas condições climáticas do sul da Bahia, sendo sua precisão influenciada pela densidade básica das espécies. Os resultados permitiram estabelecer faixas regionais preliminares de umidade de equilíbrio para madeiras de baixa, média e alta densidade, fornecendo subsídios para o planejamento da secagem e da utilização industrial da madeira na região. Essas informações podem contribuir

para a adoção de programas de secagem mais compatíveis com as condições ambientais locais e servir como base para o desenvolvimento de modelos regionais de estimativa da umidade de equilíbrio.

5. Agradecimentos

À Universidade Federal do Sul da Bahia (UFSB) pelo suporte e infraestrutura disponibilizada, bem como ao Laboratório Central de Tecnologias de Produtos Florestais.

6. Referências

Baraúna, E. E. P., Nunes, S. M. V., Nunes, R. F., Dias, T. L., Baldin, T., Arantes, M. D. C., Monteiro, T. C., & Goulart, S. L. (2022). Umidade de equilíbrio da madeira de *Eucalyptus* spp. para o município de Montes Claros, Minas Gerais. *Research, Society and Development, 11*(9), e15711931160. https://doi.org/10.33448/rsd-v11i9.31160

Cassiano, C., Souza, A. P., Stangerlin, D. M., Paulino, J., & Melo, R. R. (2013). Sazonalidade e estimativas da umidade de equilíbrio de madeiras amazônicas em Sinop, Estado do Mato Grosso. *Scientia Forestalis, 41*(100), 457–468.

Fredriksson, M., Rüggeberg, M., Nord-Larsen, T., Beck, G., & Thybring, E. E. (2023). Water sorption in wood cell walls: Data exploration of the influential physicochemical characteristics. *Cellulose, 30*, 1857–1871. https://doi.org/10.1007/s10570-022-05076-4

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA (INMET). (2026). Dados meteorológicos: estação automática A410 – Ilhéus, BA. Recuperado de https://tempo.inmet.gov.br/TabelaEstacoes/A410. Acesso em 15 abr. 2026.

Mendes, L. M., & Arce, J. E. (2003). Análise comparativa das equações utilizadas para estimar a umidade de equilíbrio da madeira. *CERNE, 9*(2), 141–152.

Souza, A. P., Mota, L. L., Casavecchia, B. H., Stangerlin, D. M., & Melo, R. R. (2016). Sazonalidade da umidade de equilíbrio da madeira para o estado de Mato Grosso. *Pesquisa Florestal Brasileira, 36*(88), 423–433. https://doi.org/10.4336/2016.pfb.36.88.1152

Sun, F., Chen, K., Tan, Y., Peng, H., Zhan, T., Cai, L., & Lyu, J. (2024). Characterization of stable and unstable states of moisture in wood during sorption by low-field NMR. *Industrial Crops and Products, 210*, 118109. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2024.118109

Thybring, E. E., Kymäläinen, M., & Rautkari, L. (2018). Experimental techniques for characterising water in wood covering the range from dry to fully water-saturated. *Wood Science and Technology, 52*(2), 297–329. https://doi.org/10.1007/s00226-017-0977-7

Thybring, E. E., Fredriksson, M., Zelinka, S. L., & Glass, S. V. (2022). Water in wood: A review of current understanding and knowledge gaps. *Forests, 13*(12), 2051. https://doi.org/10.3390/f13122051

Tian, P., Han, J., Guo, S., Di, J., & Han, X. (2024). Prediction distribution model of moisture content in laminated wood components. *Polymers, 16*(10), 1453. https://doi.org/10.3390/polym16101453

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Uso da madeira da *Bauhinia forficata* como matriz para biomonitoramento de metais pesados

Íris Rodrigues Malheiros[1]; Rickson Alves Marques de Oliveira[1]; Mariane da Silva Moreira[1]; Vanessa Kunz de Azevedo Corrêa[2]; Glaycianne Christine Vieira dos Santos Ataide[1]; João Vicente de Figueiredo Latorraca[1]; Natália Dias de Souza[1].

[1] Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro
[2] Secretaria Municipal do Ambiente e Licenciamento Ambiental e Urbanismo e Fiscalização da Prefeitura Municipal de Armação de Búzios

Resumo: A crescente urbanização intensifica a emissão de poluentes atmosféricos e favorece a deposição de metais potencialmente tóxicos na vegetação, tornando necessário o monitoramento da qualidade ambiental. Este estudo avaliou o potencial da madeira de *Bauhinia forficata* Link (pata-de-vaca) como biomonitora de metais em ambiente urbano. Amostras de madeira de quatro indivíduos do município do Rio de Janeiro (RJ) foram submetidas a testes histoquímicos para detecção de cádmio (Cd) e/ou chumbo (Pb) e níquel (Ni). Os resultados indicaram reações positivas para ocorrência desses metais, distribuídos ao longo do perfil radial da madeira, com marcações predominantes nos raios. Conclui-se que a madeira de pata-de-vaca apresenta potencial para o biomonitoramento da poluição por metais em áreas urbanas, podendo contribuir para a avaliação da qualidade ambiental e para o planejamento da arborização urbana.

Palavras-chave: Poluição ambiental; Lenho; Arborização urbana.

Use of *Bauhinia forficata* wood as a matrix for heavy metal biomonitoring

Abstract: Increasing urbanization intensifies the emission of atmospheric pollutants and promotes the deposition of potentially toxic metals in vegetation, making environmental quality monitoring necessary. This study evaluated the potential of *Bauhinia forficata* Link (pata-de-vaca) wood as a biomonitor of metals in an urban environment. Wood samples from four individuals in the municipality of Rio de Janeiro (RJ), Brazil, were subjected to histochemical tests to detect cadmium (Cd) and/or lead (Pb) and nickel (Ni). The results indicated positive reactions for the occurrence of these metals, which were distributed along the radial profile of the wood, with predominant staining in the rays. It is concluded that pata-de-vaca wood shows potential for biomonitoring metal pollution in urban areas and may contribute to environmental quality assessment and urban forestry planning.

Keywords: Environmental pollution; Wood; Urban arborization.

1. Introdução

As árvores presentes nas áreas urbanas desempenham importante função ambiental, contribuindo para amenizar a temperatura, reter partículas em suspensão, melhorar a qualidade

do ar, favorecer a biodiversidade local e proporcionar melhores condições de bem-estar à população (Pataki *et al.*, 2021; Vasconcellos, 2024). Além de desempenharem funções ecológicas e paisagísticas, podem ser empregadas no monitoramento da qualidade ambiental devido à exposição contínua aos poluentes gerados pelas atividades humanas. (Martins *et al.*, 2021).

Entre as espécies utilizadas na arborização urbana brasileira, *Bauhinia forficata* Link (Fabaceae), conhecida popularmente como pata-de-vaca, destaca-se pelo valor ornamental, devido à floração branca, pela boa adaptação às condições urbanas e pelo emprego frequente na arborização de ruas, praças e parques. Além disso, trata-se de uma espécie nativa da flora brasileira, amplamente recomendada para projetos de arborização por apresentar porte compatível com redes de distribuição elétrica e contribuir para a valorização paisagística dos espaços urbanos (Carvalho, 2003; Muller, Lehn, 2019).

Apesar da contribuição da arborização urbana para a melhoria da qualidade ambiental, as cidades ainda sofrem com a emissão de poluentes decorrentes do intenso tráfego de veículos, das atividades industriais, da construção civil e da queima de combustíveis fósseis. Como consequência, ocorre a liberação de metais potencialmente tóxicos, entre eles chumbo (Pb), cádmio (Cd), níquel (Ni), cobre (Cu) e zinco (Zn) (Borges, 2025; Drumm et al., 2014). Esses contaminantes podem se depositar sobre a superfície das plantas ou ser absorvidos pelas raízes, sendo posteriormente transportados pelo sistema vascular e acumulados em diferentes tecidos vegetais, incluindo a madeira (Chaves, 2008; Clemens, 2001).

Diante desse contexto, o presente trabalho teve como objetivo investigar o potencial da madeira de *Bauhinia forficata* como matriz complementar de biomonitoramento de poluentes metálicos em ambiente urbano.

2. Material e métodos

2.1. Local de coleta

A coleta do material foi realizada na zona norte do município do Rio de Janeiro, estado do Rio de Janeiro, localizado nas coordenadas 22º45'05"–23º04'10" S e 43º06'30"–43º47'40" W (Figura 1). O município possui área territorial de aproximadamente 1.200,33 km², onde cerca de 640,34 km² correspondem à área urbanizada (IBGE, 2024). Foram definidos quatro pontos de coleta na cidade (Figura 1), em locais onde a espécie pata-de-vaca (*Bauhinia forficata*) é utilizada na arborização urbana.

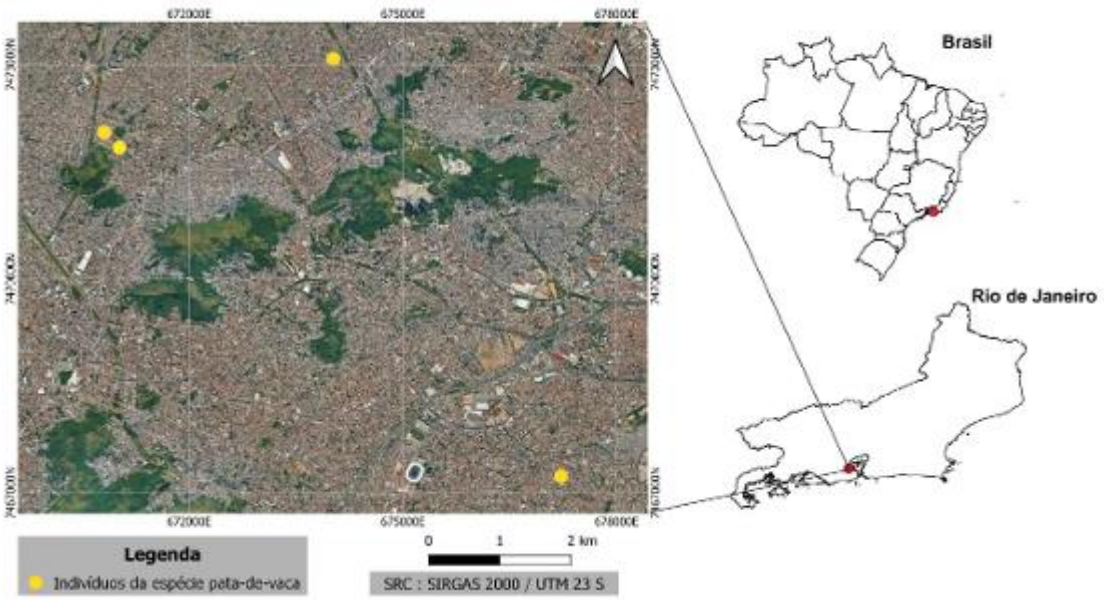


Figura 1 – Localização dos indivíduos da espécie pata-de-vaca no município do Rio de Janeiro.

2.2. Coleta do material

Foram selecionados quatro indivíduos de pata-de-vaca (*B. forficata*) localizados no município do Rio de Janeiro, RJ, priorizando-se árvores com aparência sadia e sem danos estruturais aparentes. A espécie foi escolhida por ser amplamente utilizada na arborização urbana, nativa da flora brasileira e apresentar madeira de densidade média (0,66 g/cm³), característica que facilita a obtenção de amostras. A coleta da madeira foi realizada com o auxílio de um trado de incremento, sendo retirada uma amostra de cada indivíduo à altura do diâmetro à altura do peito (1,30 m do nível do solo). Após a coleta, as amostras foram devidamente identificadas, acondicionadas e encaminhadas para as análises laboratoriais.

2.3. Preparo das amostras

As amostras de madeira foram acondicionadas em estufa a 40 °C até atingirem peso constante, garantindo estabilidade dimensional para a preparação dos cortes. Posteriormente, as amostras foram seccionadas em intervalos de 3,5 cm a partir da medula e, de cada segmento obtido, foi retirado um fragmento de aproximadamente 1 cm de comprimento, destinado à preparação dos cortes histológicos.

As amostras foram orientadas no plano transversal e seccionadas com espessura de 20 µm no micrótomo de deslizamento MICRON HM 450. Foram selecionados cortes transversais representativos em três posições distintas ao longo do perfil radial da madeira: próximo à medula, em região intermediária e próximo ao câmbio.

2.4. Preparo dos reagentes

2.4.1. Detecção de cádmio e/ou chumbo

Inicialmente, preparou-se o reagente de ditizona pela dissolução de 0,004 g do composto em uma mistura de 6 ml de acetona e 2 ml de água destilada. Em seguida, 6 ml da solução obtida foram transferidos para um béquer limpo, ao qual se adicionaram 2 gotas de ácido acético. A solução foi utilizada imediatamente após o preparo.

2.4.2. Detecção de níquel

Inicialmente, foi preparada a solução de dimetilglicoxima a 1% pela transferência de 5 ml da solução para um tubo de ensaio ou béquer limpo. Em seguida, foram adicionados 0,075 g de hidróxido de sódio (NaOH) e 0,095 g de bórax decahidratado (Na2B4O7·10H2O), agitando-se a mistura até a completa dissolução dos sólidos.

2.5. Procedimento do teste histoquímico

Os testes histoquímicos foram realizados com adaptações da metodologia proposta por Seregin e Kozhevnikova (2011), com o objetivo de identificar a presença de metais pesados nos tecidos da madeira. As análises consistiram na aplicação de reagentes específicos sobre os cortes histológicos, os quais reagem com os elementos de interesse, formando compostos insolúveis e coloridos, indicados na Tabela 1 abaixo.

Tabela 1 – Relação dos metais com a cor do complexo produzido

Metal	Cor do complexo produzido
Cádmio e/ou chumbo	Vermelho
Níquel	Vermelho

Após a obtenção dos cortes histológicos, estes foram posicionados em lâminas de vidro devidamente identificadas e observados em microscópio óptico *Biofocus*, sendo registradas imagens iniciais antes da aplicação dos reagentes. Em seguida, adicionaram-se quatro gotas do reagente específico sobre cada corte, permanecendo em contato com o tecido por 6 minutos.

Ao término do período de reação, as lâminas foram novamente analisadas ao microscópio para verificar a ocorrência de alterações de coloração resultantes da formação de complexos entre os reagentes e os metais de interesse. As imagens foram registradas por meio de uma câmera de 50 MP acoplada ao microscópio, utilizando ampliações de 10x e 100x, permitindo a comparação entre o antes e após a aplicação do reagente. Cada lâmina foi analisada individualmente para registrar a presença ou ausência de metais pesados com base na reação histoquímica, permitindo identificar os metais investigados ao longo do perfil radial da madeira (próximo a medula, região intermediária e próximo ao câmbio), a fim de comparar a distribuição dos elementos ao longo do crescimento da árvore.

3. Resultados e discussão

Os testes histoquímicos realizados na madeira de indivíduos de pata-de-vaca permitiram indicar reações positivas para metais investigados das amostras coletadas no município do Rio de Janeiro.

A detecção de chumbo (Pb) e/ou cádmio (Cd) nos indivíduos de pata-de-vaca provenientes do município do Rio de Janeiro evidencia a capacidade da espécie em absorver e reter esses metais em seus tecidos, podendo ser influenciada pelas fontes de poluição presentes no ambiente urbano (Tabela 2 e Figura 2). Souza *et al.* (2019) identificaram chumbo (Pb) e cádmio (Cd) na casca de *Poincianella pluviosa*, reforçando o potencial de espécies da família Fabaceae para o acúmulo de metais potencialmente tóxicos.

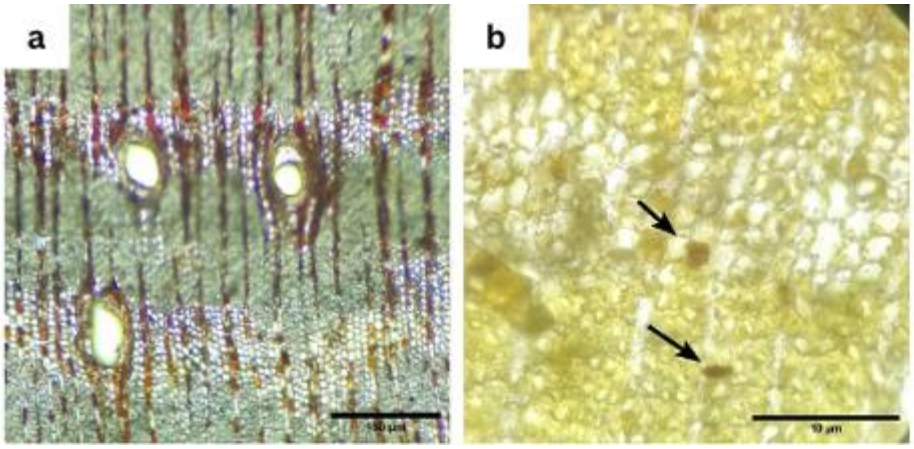


Figura 2 – Reação histoquímica de chumbo e/ou cádmio em madeira de pata-de-vaca. (a) indivíduo em 10x; (b) indivíduo em 100x.

Tabela 2 – Resultados dos testes histoquímicos para detecção de cádmio e/ou chumbo na madeira de pata-de-vaca, no município do Rio de Janeiro.

		Próxima à medula	Região intermediária	Próxima ao câmbio
AMOSTRAS	1	+	+	+
	2	-	-	-
	3	-	+	+
	4	-	+	+

Legenda: (+) positivo, (-) negativo.

A distribuição de Pb e/ou Cd ao longo do perfil radial da madeira pode indicar que esses metais foram incorporados em diferentes fases do desenvolvimento da árvore. A ocorrência tanto na região da medula, correspondente à porção mais antiga da madeira, quanto nas porções intermediárias e próximas ao câmbio, formadas mais recentemente, sugere uma exposição

contínua ou recorrente da espécie aos contaminantes ao longo do tempo (Tabela 2). Esse comportamento está de acordo com estudos dendroquímicos que demonstram a capacidade da madeira de registrar a exposição ambiental durante o crescimento da árvore (Locosselli *et al.*, 2018).

A marcação histoquímica concentrou-se predominantemente nos raios da madeira (Figura 2), indicando que essas estruturas podem desempenhar papel importante na retenção dos metais. Como os raios são responsáveis pelo transporte radial e pelo armazenamento de água, nutrientes e outras substâncias, a predominância da marcação nessas estruturas pode estar relacionada à dinâmica de distribuição e acúmulo desses elementos nos tecidos lenhosos (Hoadley, 1990).

A detecção de níquel (Ni) na madeira de pata-de-vaca apresentou reações positivas em 4 dos 4 indivíduos analisados no município do Rio de Janeiro (Tabela 3 e Figura 3). Embora todos os indivíduos tenham apresentado pelo menos uma reação positiva para Ni, observou-se variação na distribuição radial do elemento, uma vez que o indivíduo 1 apresentou resultado negativo na região próxima à medula. Dessa forma, os resultados indicam a presença de Ni nos indivíduos avaliados, sem que seja possível generalizar sua ocorrência para toda a área de estudo, considerando o número reduzido de indivíduos amostrados. Esse resultado reforça a capacidade da espécie em absorver e reter níquel, evidenciando seu potencial para o biomonitoramento da qualidade ambiental. Sedano *et al.* (2023) identificaram níquel na casca de *Senna multiglandulosa*, espécie da família Fabaceae. Fleck *et al.* (2017), ao utilizarem cascas de outra espécie do gênero *Bauhinia* no monitoramento de áreas urbanas, também registraram a presença desse metal nos tecidos vegetais.

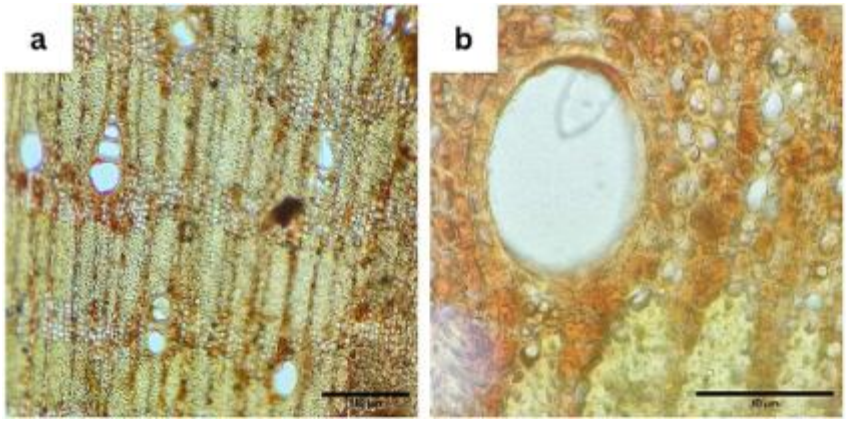


Figura 3 – Reação histoquímica níquel em madeira de pata-de-vaca. (a) indivíduo em 10x; (b) indivíduo em 100x.

Tabela 3 – Resultados dos testes histoquímicos para detecção de níquel na madeira de pata-de-vaca, no município do Rio de Janeiro.

		Próxima à medula	Região intermediária	Próxima ao câmbio
AMOSTRAS	1	-	+	+
	2	+	+	+
	3	+	+	+
	4	+	+	+

Legenda: (+) positivo, (-) negativo.

A detecção de Ni pode estar associada às diversas fontes de emissão presentes no ambiente urbano, como atividades industriais, queima de combustíveis fósseis, emissões veiculares e deposição de partículas metálicas, além da possível contribuição de fontes naturais do solo (Pacheco, 2015; Santana, 2021). Entretanto, essas fontes são discutidas como possíveis explicações para a ocorrência do elemento, uma vez que a origem do Ni não foi avaliada diretamente neste estudo. A distribuição do metal ao longo do perfil radial da madeira, com ocorrência desde as regiões próximas à medula até as camadas mais externas, próxima ao câmbio, sugere que a exposição ocorreu em diferentes fases do desenvolvimento das árvores. Esse padrão pode estar relacionado à disponibilidade do elemento no ambiente, às condições do solo e às características fisiológicas da espécie, que influenciam a absorção, o transporte e o acúmulo de metais nos tecidos lenhosos.

4. Conclusões

A madeira de pata-de-vaca demonstrou potencial como matriz complementar para a avaliação da retenção de metais em ambientes urbanos. Esse potencial foi evidenciado pelas análises histoquímicas, que apresentaram reações positivas para cádmio (Cd) e/ou chumbo (Pb) e níquel (Ni), demonstrando a presença desses elementos nos tecidos lenhosos dos indivíduos avaliados.

A ocorrência dos metais, entretanto, não foi uniforme, sendo observadas variações entre os indivíduos e ao longo do perfil radial da madeira. Essa distribuição diferenciada pode evidenciar que a retenção dos elementos pode variar entre os indivíduos e entre as regiões do lenho, reforçando a importância da análise espacial dos tecidos na avaliação da presença de contaminantes metálicos.

Diante desses resultados, a pata-de-vaca apresenta-se como uma espécie com potencial para atuar como biomonitora da qualidade ambiental, podendo constituir uma ferramenta

complementar aos métodos de monitoramento da poluição por metais em ambientes urbanos. Essa aplicação pode ser particularmente relevante em locais sob maior influência de fontes de poluição. Contudo, os resultados devem ser interpretados considerando o número de indivíduos avaliados, sendo necessários estudos com maior número de amostras, diferentes locais e condições ambientais para ampliar a compreensão da capacidade da espécie em indicar a presença e a distribuição de metais no ambiente urbano.

5. Agradecimentos

Os autores agradecem ao Laboratório de Química da Madeira (LQM) e ao Núcleo de Pesquisa da Qualidade da Árvore e da Madeira (NPQAM), da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (UFRRJ), pelo apoio técnico e pela infraestrutura disponibilizada para a realização deste trabalho. Agradecem também à Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (UFRRJ) pelo suporte institucional.

6. Referências bibliográficas

Carvalho, P. E. R. (2003). Espécies Arbóreas Brasileiras. Embrapa.

Chaves, E. V. (2008). Absorção de metais pesados de solos contaminados do aterro sanitário e pólo industrial de Manaus pelas espécies de planta *Senna multijuga*, *Schizolobium amazonicum* e *Caesalpinia enchinata* (Tese de doutorado). Universidade Federal do Amazonas.

Clemens, S. (2001). Molecular mechanisms of plant metal tolerance and homeostasis. Planta, 212(4). https://doi.org/10.1007/s004250000458.

Fleck, A. S., Carneiro, M. F. H., Barbosa Jr, F., Amantea, S. L., & Rhoden, C. R. (2017). The use of tree barks and human fingernails for monitoring metal levels in urban areas of different population densities of Porto Alegre, Brazil. *Environmental Science and Pollution Research*, *24*(3). https://doi.org/10.1007/s11356-016-7832-5.

Hoadley, R. B. (1990). Identifying wood: accurate results with simple tools. The Taunton Press.

IBGE (2024). Cidades e Estados. https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados.

Locosselli, G. M., Chacón-Madrid, K., Arruda, M. A. Z., de Camargo, E. P., Moreira, T. C. L., de André, C. D. S., de André, P. A., Singer, J. M., Saldiva, P. H. N. & Buckeridge, M. S. (2018). Tree rings reveal the reduction of Cd, Cu, Ni and Pb pollution in the central region of São Paulo, Brazil. Environmental Pollution, 242. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.06.098.

Martins, A. P. G., Ribeiro, A. P., Ferreira, M. L., Martins, M. A. G., Negri, E. M., Scapin, M. A., Oliveira, M., Saiki, M. & Lafortezza, R. (2021). Infraestrutura verde para monitorar e minimizar os impactos da poluição atmosférica. Estudos Avançados, 35 (102). https://doi.org/10.1590/s0103-4014.2021.35102.003.

Moreira, A.; Salvador, J. O., Moraes, L. A. C. (2024). Manual prático de agronomia. Londrina: Edição dos Autores.

Muller, G. A. & Lehn, C. R. (2019). First report of the use of extrafloral nectaries of *Bauhinia forficata* Link (Fabales: Fabaceae) by *Tetragonisca angustula* Latreille (Hymenoptera: Apidae). Revista Chilena de Entomología, 45(4). ISSN 0718-8994.

Neto, T. C. C. (2022). Sensibilidade da espécie Terminalia catappa L. desenvolvida em ambiente urbano de intensa atividade siderúrgica (Tese de doutorado). Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro.

Pacheco, J. M. A. S. (2015). *Concentração de metais pesados em espécies hortícolas em agricultura urbana* (Dissertação de mestrado). Universidade de Lisboa.

Pataki, D. E., Alberti, M., Cadenasso, M. L., Felson, A. J., McDonnell, M. J., Pincetl, S., Pouyat, R. V., Setala, H. & Whitlow, T. H. (2021). The benefits and limits of urban tree planting for environmental and human health. Frontiers in Ecology and Evolution, 9. https://doi.org/10.3389/fevp.2021.603757.

Santana, F. D. F. V. (2021). Toxicologia do arsenato, arsenito, cádmio, chumbo, cromo e níquel em testículos de camundongos Swiss adultos após exposição crônica por via intraperitoneal (Dissertação de mestrado). Universidade Federal de Viçosa.

Sedano, N. M. B., Schwartz Valverde, A. J., Guerreros Chiri, A. J., & Camargo Hinostroza, S. D. (2022). Tree Bark as a Bioindicator of Atmospheric Contamination by Heavy Metals According to Vehicular Traffic Intensity in El Tambo, Huancayo, Peru. Advances in Environment Research. https://doi.org/10.1007/978-3-031-26365-1_1.

Seregin, I. V., & Kozhevnikova, A. D. (2011). Histochemical methods for detection of heavy metals and strontium in the tissues of higher plants. Russian Journal of Plant Physiology, 58(4). https://doi.org/10.1134/S1021443711040133.

Souza, M. S. D., Santos, F. S. D., Magalhães, L. M., Freitas, W. K. D., Gois, G. D., & Oliveira, J. F. D. (2019*). Poincianella pluviosa* as biomonitor of heavy metals in the municipality of Volta Redonda, RJ, Brazil. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, 23(1), https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v23n1p71-76.

Vasconcellos, B. N. (2024). Arborização Urbana: Essencial para a qualidade de vida da população.Em M. B. Goés (org.), Pensando sustentável: reflexões interdisciplinares para um futuro resiliente (pp. 33-43). Editora Científica Digital.

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Uso da madeira da *Clitoria fairchildiana* como matriz para biomonitoramento de metais pesados

Íris Rodrigues Malheiros[1]; Rickson Alves Marques de Oliveira[1]; Mariane da Silva Moreira[1]; Vanessa Kunz de Azevedo Corrêa[2]; Glaycianne Christine Vieira dos Santos Ataide[1]; João Vicente de Figueiredo Latorraca[1]; Natália Dias de Souza[1].

[1] Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro
[2] Secretaria Municipal do Ambiente e Licenciamento Ambiental e Urbanismo e Fiscalização da Prefeitura Municipal de Armação de Búzios

Resumo: A poluição atmosférica em ambientes urbanos favorece a deposição de metais potencialmente tóxicos na vegetação, tornando as árvores importantes ferramentas para o biomonitoramento ambiental. Este estudo avaliou o potencial da madeira de *Clitoria fairchildiana* Howard (sombreiro) como biomonitora de metais pesados. Amostras de madeira de quatro indivíduos do município do Rio de Janeiro (RJ) foram submetidas a testes histoquímicos para detecção de cádmio (Cd) e/ou chumbo (Pb) e níquel (Ni). Os resultados apresentaram reações positivas para Cd e/ou Pb na maioria dos indivíduos, enquanto o Ni foi detectado em parte das amostras. A distribuição dos metais no perfil radial da madeira pode indicar exposição aos contaminantes durante o crescimento da árvore, com marcações predominantes nos raios e nas células de parênquima. Conclui-se que a madeira de sombreiro indica potencial como matriz complementar para o biomonitoramento da poluição por metais, o que pode contribuir para a avaliação da qualidade ambiental e planejamento da arborização urbana.

Palavras-chave: Poluição ambiental; Lenho; Arborização urbana.

Use of *Clitoria fairchildiana* wood as a matrix for heavy metal biomonitoring

Abstract: Atmospheric pollution in urban environments promotes the deposition of potentially toxic metals on vegetation, making trees important tools for environmental biomonitoring. This study evaluated the potential of *Clitoria fairchildiana* Howard (sombreiro) wood as a biomonitor of heavy metals. Wood samples from four individuals in the municipality of Rio de Janeiro (RJ), Brazil, were subjected to histochemical tests to detect cadmium (Cd) and/or lead (Pb) and nickel (Ni). The results showed positive reactions for Cd and/or Pb in most individuals, whereas Ni was detected in some of the samples. The distribution of metals along the radial profile of the wood may indicate exposure to contaminants during tree growth, with predominant staining in the rays and parenchyma cells. It is concluded that sombreiro wood shows potential as a complementary matrix for biomonitoring metal pollution, which may contribute to environmental quality assessment and urban forestry planning.

Keywords: environmental pollution; wood; urban arborization.

1. Introdução

A arborização urbana desempenha papel fundamental na melhoria da qualidade ambiental das cidades, oferecendo diversos benefícios como redução da temperatura, retenção de partículas em suspensão, melhoria da qualidade do ar, aumento da biodiversidade local e promoção do bem-estar da população (Vasconcellos, 2024). Além de sua função ecológica e paisagística, as árvores podem atuar como ferramentas para o monitoramento da qualidade ambiental, pois estão continuamente expostas aos poluentes emitidos pelas atividades antrópicas (Martins *et al*., 2021).

Entre as espécies utilizadas na arborização urbana brasileira, *Clitoria fairchildiana* Howard (Fabaceae), conhecida popularmente como sombreiro, destaca-se por seu rápido crescimento, ampla copa, elevada capacidade de adaptação às condições urbanas e frequente utilização em ruas, avenidas, parques e áreas verdes (Lorenzi, 2008).

Apesar dos benefícios ambientais e sociais proporcionados pela arborização urbana, os centros urbanos continuam sujeitos à emissão de poluentes provenientes de diversas atividades antrópicas. O aumento do tráfego de veículos, das atividades industriais, da construção civil e da queima de combustíveis fósseis intensifica a emissão de elementos potencialmente tóxicos, como chumbo (Pb), cádmio (Cd), níquel (Ni), cobre (Cu) e zinco (Zn) (Borges, 2025; Drumm *et al.*, 2014). Esses contaminantes podem ser depositados sobre as folhas ou absorvidos pelas raízes, sendo posteriormente transportados pelo sistema vascular e acumulados em diferentes tecidos vegetais, incluindo a madeira (Chaves, 2008; Clemens 2001).

A madeira pode reter esses elementos por longos períodos, funcionando como um registro da exposição da árvore aos contaminantes presentes no ambiente ao longo de seu crescimento (Moreira, Salvador, Moraes, 2018; Neto, 2022). Essa característica torna o lenho um material eficiente para estudos de biomonitoramento ambiental, permitindo identificar a presença de contaminantes e avaliar a qualidade ambiental em diferentes locais.

Diante desse contexto, o presente trabalho teve como objetivo investigar o potencial da madeira de sombreiro como biomonitora de poluentes metálicos em ambiente urbano, contribuindo para a avaliação da qualidade ambiental e para a ampliação do conhecimento sobre o uso da madeira em estudos de biomonitoramento.

2. Material e métodos

2.1. Local de coleta

A coleta do material foi realizada na zona norte do município do Rio de Janeiro, estado do Rio de Janeiro, localizado nas coordenadas 22º45'05"–23º04'10" S e 43º06'30"–43º47'40" W (Figura 1), a área territorial é de aproximadamente 1.200,33 km², onde cerca de 640,34 km²

correspondem à área urbanizada (IBGE, 2024). Foram definidos quatro pontos de coleta na cidade (Figura 1), em locais onde a espécie sombreiro (*C. fairchildiana*) é utilizada na arborização urbana.

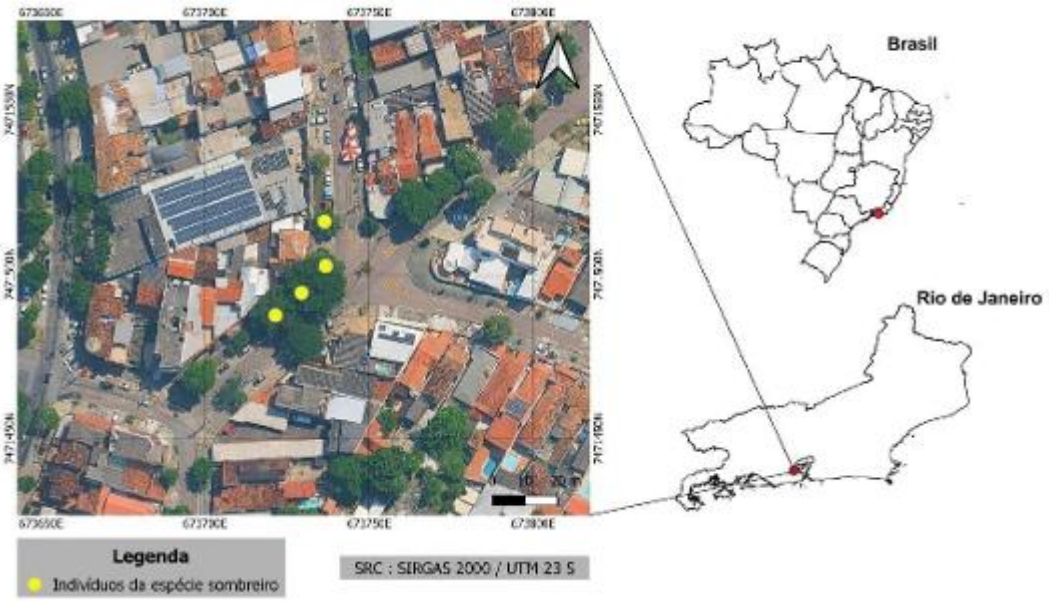


Figura 1 – Localização dos indivíduos da espécie *Clitoria fairchildiana* coletados no município do Rio de Janeiro.

2.2. Coleta do material

Foram selecionados quatro indivíduos de sombreiro (*C. fairchildiana*) localizados no município do Rio de Janeiro, RJ, priorizando-se árvores com aparência sadia e sem danos estruturais aparentes. A espécie foi escolhida por ser amplamente utilizada na arborização urbana, nativa da flora brasileira e apresentar madeira de densidade média (0,68 g/cm³), característica que facilita a obtenção de amostras. A coleta da madeira foi realizada com o auxílio de um trado de incremento, sendo retirada uma amostra de cada indivíduo à altura do diâmetro à altura do peito (1,30 m do nível do solo). Após a coleta, as amostras foram devidamente identificadas, acondicionadas e encaminhadas para as análises laboratoriais.

2.3. Preparo das amostras

As amostras de madeira foram acondicionadas em estufa a 40 °C até atingirem peso constante, garantindo estabilidade dimensional para a preparação dos cortes. Posteriormente, as amostras foram seccionadas em intervalos de 3,5 cm a partir da medula e, de cada segmento obtido, foi retirado um fragmento de aproximadamente 1 cm de comprimento, destinado à preparação dos cortes histológicos.

As amostras foram orientadas no plano transversal e seccionadas com espessura de 20 µm no micrótomo de deslizamento MICRON HM 450. Foram selecionados cortes transversais

representativos em três posições distintas ao longo do perfil radial da madeira: próximo à medula, em região intermediária e próximo ao câmbio.

2.4. Preparo dos reagentes

2.4.1. Detecção de cádmio e/ou chumbo

Inicialmente, preparou-se o reagente de ditizona pela dissolução de 0,004 g do composto em uma mistura de 6 ml de acetona e 2 ml de água destilada. Em seguida, 6 ml da solução obtida foram transferidos para um béquer limpo, ao qual se adicionaram 2 gotas de ácido acético. A solução foi utilizada imediatamente após o preparo.

2.4.2. Detecção de níquel

Inicialmente, foi preparada a solução de dimetilglicoxima a 1% pela transferência de 5 ml da solução para um tubo de ensaio ou béquer limpo. Em seguida, foram adicionados 0,075 g de hidróxido de sódio (NaOH) e 0,095 g de bórax decahidratado (Na2B4O7·10H2O), agitando-se a mistura até a completa dissolução dos sólidos.

2.5. Procedimento do teste histoquímico

Os testes histoquímicos foram realizados com adaptações da metodologia proposta por Seregin e Kozhevnikova (2011), com o objetivo de identificar a presença de metais pesados nos tecidos da madeira. As análises consistiram na aplicação de reagentes específicos sobre os cortes histológicos, os quais reagem com os elementos de interesse, formando compostos insolúveis e coloridos, indicados na Tabela 1 abaixo.

Tabela 1 – Relação dos metais com a cor do complexo produzido.

Metal	Cor do complexo produzido
Cádmio e/ou chumbo	Vermelho
Níquel	Vermelho

Após a obtenção dos cortes histológicos, estes foram posicionados em lâminas de vidro devidamente identificadas e observados em microscópio óptico *Biofocus*, sendo registradas imagens iniciais antes da aplicação dos reagentes. Em seguida, adicionaram-se quatro gotas do reagente específico sobre cada corte, permanecendo em contato com o tecido por 6 minutos.

Ao término do período de reação, as lâminas foram novamente analisadas ao microscópio para verificar a ocorrência de alterações de coloração resultantes da formação de complexos entre os reagentes e os metais de interesse. As imagens foram registradas por meio de uma câmera de 50 MP acoplada ao microscópio, utilizando ampliações de 10x e 100x, permitindo a comparação entre o antes e após a aplicação do reagente. Cada lâmina foi analisada individualmente para registrar a presença ou ausência de metais pesados com base na reação

histoquímica, permitindo identificar os metais investigados ao longo do perfil radial da madeira (próximo a medula, região intermediária e próximo ao câmbio), a fim de comparar a distribuição dos elementos ao longo do crescimento da árvore.

3. Resultados e discussão

Os testes histoquímicos realizados na madeira de indivíduos de sombreiro permitiram identificar a presença de determinados metais nas amostras coletadas no município do Rio de Janeiro.

A detecção de chumbo (Pb) e/ou cádmio (Cd) nos indivíduos provenientes do município do Rio de Janeiro evidencia que a espécie analisada foi capaz de reter esses metais em seus tecidos, podendo refletir a influência das fontes de poluição presentes no ambiente urbano (Figura 2). A ocorrência de reações positivas 3 dos 4 indivíduos analisados (75%) (Tabela 2) pode indicar a exposição a esses elementos é recorrente na área de estudo, sugerindo uma distribuição relativamente ampla desses contaminantes. Chagas (2013), ao analisar cascas de *Caesalpinia pluviosa*, identificou a presença de cádmio (Cd), demonstrando a capacidade de retenção e acúmulo desse metal nas cascas dessa família botânica. Santos *et al.* (2021) detectaram cádmio (Cd) e chumbo (Pb) em cascas da família Fabaceae utilizada no monitoramento da poluição atmosférica, fortalecendo a evidência de que espécies dessa família apresentam eficiência na retenção desses elementos.

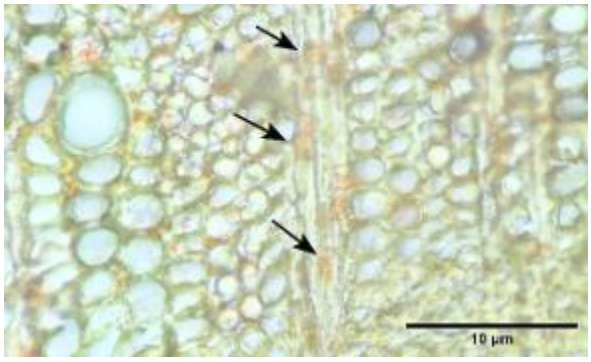


Figura 2 – Reação histoquímica de cádmio e/ou chumbo em madeira de sombreiro em 100x.

Tabela 2 – Resultados dos testes histoquímicos para detecção de cádmio e/ou chumbo na madeira de sombreiro, no município do Rio de Janeiro.

		Próxima à medula	Região intermediária	Próxima ao câmbio
AMOSTRAS	1	+	+	+
	2	-	-	-

3	+	+	+
4	-	+	+

Legenda: (+) positivo, (-) negativo

A distribuição de cádmio (Cd) e/ou chumbo (Pb) ao longo do perfil radial da madeira sugere que esses elementos foram incorporados progressivamente durante o crescimento da árvore, conforme observado em estudos dendroquímicos (Locosselli *et al.*, 2018). A detecção nas regiões próximas à medula, intermediária e próxima ao câmbio (Tabela 2) pode indicar que a planta esteve exposta a esses contaminantes em diferentes fases de seu desenvolvimento.

A marcação histoquímica foi observada predominantemente nos raios da madeira (Figura 2), o que pode estar relacionado às funções desempenhadas por esse tecido no transporte radial e no armazenamento de água, nutrientes e outras substâncias. Essas características favorecem a retenção de elementos químicos, incluindo metais potencialmente tóxicos (Hoadley, 1990).

Após serem incorporados aos tecidos lenhosos, esses elementos tendem a permanecer por longos períodos, uma vez que a madeira não é rapidamente renovada (Taiz *et al.*, 2017). Essa característica permite que a madeira funcione como um registro cronológico da poluição ambiental. Assim, a detecção de Cd e/ou Pb em todas as regiões analisadas nos indivíduos provenientes do município do Rio de Janeiro sugere que a exposição a esses metais ocorreu de forma persistente ao longo do desenvolvimento das árvores, o que pode indicar que a contaminação atmosférica já estava presente desde os estágios iniciais de crescimento e permaneceu ao longo dos anos.

O teste histoquímico para detecção de níquel (Ni) apresentou resultados positivos em parte dos indivíduos analisados (Tabela 3 e Figura 3). Esse resultado demonstra a capacidade da espécie em absorver e reter esse elemento, reforçando seu potencial como biomonitor da contaminação ambiental. Jáuregui *et al.* (2015), ao avaliarem cascas de *Prosopis laevigata*, espécie pertencente à família Fabaceae, identificaram concentrações de níquel (Ni), evidenciando a aptidão dessa família botânica para acumular esse metal em ambientes sujeitos à poluição atmosférica.

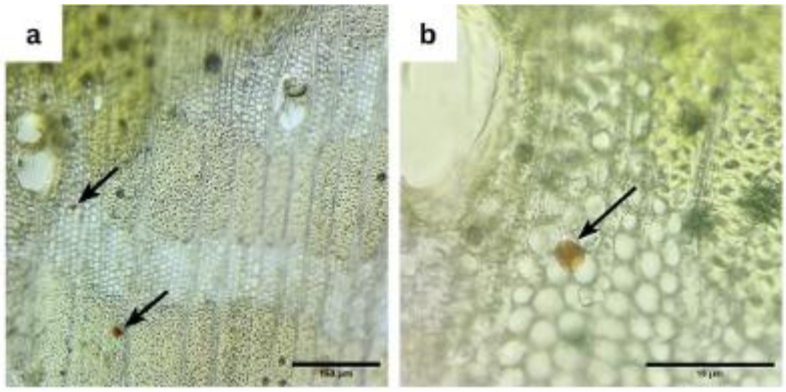


Figura 3 – Reação histoquímica de níquel em madeira de sombreiro. (a) indivíduo em 10x; (b) indivíduo em 100x.

Tabela 3 – Resultados dos testes histoquímicos para detecção de níquel na madeira de sombreiro, no município do Rio de Janeiro.

		Próxima à medula	Região intermediária	Próxima ao câmbio
AMOSTRAS	1	-	-	-
	2	-	+	+
	3	-	+	+
	4	-	-	-

Legenda: (+) positivo, (-) negativo.

A avaliação da distribuição radial revelou que as reações positivas para níquel concentraram-se nas regiões intermediária e próxima ao câmbio (Tabela 3 e Figura 3). Esse padrão pode estar associado à presença do elemento nos tecidos formados mais recentemente, embora a distribuição radial, isoladamente, não permita determinar com precisão o período de incorporação do Ni.

A marcação histoquímica foi observada principalmente nas células de parênquima. Essas células desempenham funções relacionadas ao armazenamento de reservas e apresentam elevada atividade metabólica, podendo atuar como importantes compartimentos de retenção de diferentes substâncias, incluindo metais (Taiz *et al.*, 2017). Dessa forma, a localização do níquel nesses tecidos está provavelmente associada à dinâmica de transporte, redistribuição e armazenamento de elementos no interior da madeira.

Mohamed (2025) destaca que o acúmulo de metais nos tecidos vegetais depende de fatores como a mobilidade do elemento, as características fisiológicas da espécie e as condições ambientais, não ocorrendo de maneira uniforme nos tecidos vegetais. Chagas (2013) ressalta que, em áreas urbanas, a deposição atmosférica constitui uma das principais vias de entrada de metais nos vegetais, favorecendo o acúmulo desses elementos nas porções mais externas dos

tecidos. Esse processo pode explicar a maior ocorrência de reações positivas nas regiões mais próximas ao câmbio, uma vez que essas representam as últimas camadas formadas durante o crescimento da árvore, refletindo melhor as condições ambientais atuais.

De modo geral, a ocorrência de cádmio (Cd) e/ou chumbo (Pb) e níquel (Ni) nos indivíduos provenientes do município do Rio de Janeiro pode estar relacionada ao elevado grau de urbanização e à intensa atividade antrópica da região. Emissões veiculares, processos industriais, queima de combustíveis fósseis, deposição de partículas atmosféricas e a geração de resíduos urbanos e industriais constituem as principais fontes desses metais no ambiente (Santana, 2021; Andrade, 2023).

4. Conclusões

A madeira de sombreiro demonstrou potencial como matriz complementar para a avaliação da retenção de metais em ambientes urbanos. Esse potencial está relacionado à capacidade dos tecidos lenhosos de apresentar reações positivas para cádmio (Cd) e/ou chumbo (Pb) e níquel (Ni) nos indivíduos avaliados. Entretanto, a distribuição desses elementos não foi uniforme, apresentando variações tanto entre os indivíduos quanto ao longo do perfil radial da madeira.

Dessa forma, os resultados obtidos reforçam o potencial do sombreiro como biomonitor da qualidade ambiental, podendo atuar como uma ferramenta complementar aos métodos convencionais de monitoramento da poluição por metais em áreas urbanas. Sua utilização pode ser relevante em locais submetidos a maior influência de fontes de poluição, contribuindo para a identificação da presença desses elementos nos tecidos vegetais e para uma avaliação complementar das condições ambientais.

5. Agradecimentos

Os autores agradecem ao Laboratório de Química da Madeira (LQM) e ao Núcleo de Pesquisa da Qualidade da Árvore e da Madeira (NPQAM), da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (UFRRJ), pelo apoio técnico e pela infraestrutura disponibilizada para a realização deste trabalho. Agradecem também à Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (UFRRJ) pelo suporte institucional.

6. Referências bibliográficas

Andrade, J. L. S. D. (2023). Contribuição de silício e micorrizas arbusculares para atenuação da toxidez por cádmio em *Mimosa caesalpiniaefolia* Benth. (Dissertação de mestrado). Universidade Federal do Ceará.

Borges, R. S. (2025). Estimativa de poluentes atmosféricos emitidos pela frota de veículos da cidade de Uberlândia/MG, no período de 2022-2023 (Dissertação de mestrado). Universidade Federal de Uberlândia.

Chagas, M. P. (2013). Anéis de crescimento do lenho de árvores como monitores ambientais: avaliação temporal e espacial da poluição atmosférica na cidade de Paulínia, São Paulo (Tese de doutorado). Universidade de São Paulo.

Chaves, E. V. (2008). Absorção de metais pesados de solos contaminados do aterro sanitário e pólo industrial de Manaus pelas espécies de planta *Senna multijuga*, *Schizolobium amazonicum* e *Caesalpinia enchinata* (Tese de doutorado). Universidade Federal do Amazonas.

Clemens, S. (2001). Molecular mechanisms of plant metal tolerance and homeostasis. Planta, 212(4). https://doi.org/10.1007/s004250000458.

Drumm, F. C., Gerhardt, A. E., Fernandes, G. D. A., Chagas, P., Sucolotti, M. S., & Kemerich, P. D. C. (2014). Poluição atmosférica proveniente da queima de combustíveis derivados do petróleo em veículos automotores. Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental, 18(1). http://doi.org/10.5902/2236117010537.

Hoadley, R. B. (1990). Identifying wood: accurate results with simple tools. The Taunton Press.

IBGE (2024). Cidades e Estados. https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados.

Jáuregui, J. A., Rodríguez Ortíz, J. C., Hernández Montoya, A., Diaz Flores, P. E., Filippini, M. F., & Martínez Carretero, E. (2015). Cortezas de *Prosopis laevigata* (Fabaceae) y *Schinus molle* (Anacardiaceae) como bioindicadoras de contaminación por metales pesados. Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias, 47(2). ISSN 1853-8665.

Locosselli, G. M., Chacón-Madrid, K., Arruda, M. A. Z., de Camargo, E. P., Moreira, T. C. L., de André, C. D. S., de André, P. A., Singer, J. M., Saldiva, P. H. N. & Buckeridge, M. S. (2018). Tree rings reveal the reduction of Cd, Cu, Ni and Pb pollution in the central region of São Paulo, Brazil. Environmental Pollution, 242. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.06.098.

Lorenzi, H. (2008). Árvores brasileiras: manual de identificação e cultivo de plantas arbóreas nativas do Brasil. Nova Odessa: Platarum.

Mohamed, H. I., Ullah, I., Toor, M. D., Tanveer, N. A., Din, M. M. U., Basit, A., Sultan, Y., Muhammad, M. & Rehman, M. U. (2025). Heavy metals toxicity in plants: Understanding

mechanisms and developing coping strategies for remediation: A review. Bioresources and Bioprocessing, 12(1). https://doi.org/10.1186/s40643-025-00930-4

Martins, A. P. G., Ribeiro, A. P., Ferreira, M. L., Martins, M. A. G., Negri, E. M., Scapin, M. A., Oliveira, M., Saiki, M. & Lafortezza, R. (2021). Infraestrutura verde para monitorar e minimizar os impactos da poluição atmosférica. Estudos Avançados, 35 (102). https://doi.org/10.1590/s0103-4014.2021.35102.003.

Moreira, A.; Salvador, J. O., Moraes, L. A. C. (2024). Manual prático de agronomia. Londrina: Edição dos Autores.

Neto, T. C. C. (2022). Sensibilidade da espécie Terminalia catappa L. desenvolvida em ambiente urbano de intensa atividade siderúrgica (Tese de doutorado). Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro.

Santana, F. D. F. V. (2021). Toxicologia do arsenato, arsenito, cádmio, chumbo, cromo e níquel em testículos de camundongos Swiss adultos após exposição crônica por via intraperitoneal (Dissertação de mestrado). Universidade Federal de Viçosa.

Santos, E. C., Maihara, V. A., Genezine, F. A., & Saiki, M. (2021). A study on tree bark samples for atmospheric pollution monitoring. Brazilian Journal of Radiation Sciences, 9(1A). https://doi.org/10.15392/bjrs.v9i1A.1293.

Seregin, I. V., & Kozhevnikova, A. D. (2011). Histochemical methods for detection of heavy metals and strontium in the tissues of higher plants. Russian Journal of Plant Physiology, 58(4). https://doi.org/10.1134/S1021443711040133.

Taiz, L., Zeiger, E., Moller, I. M., Murphy, A. (2017). Fisiologia e Desenvolvimento Vegetal. Artmed.

Vasconcellos, B. N. (2024). Arborização Urbana: Essencial para a qualidade de vida da população.Em M. B. Goés (org.), Pensando sustentável: reflexões interdisciplinares para um futuro resiliente (pp. 33-43). Editora Científica Digital.

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Uso de imagens para determinação da qualidade da superfície da madeira

Jorge Artur Santos[1]; Mariane Silva[1]; Márcia Rodrigues de Moura Fernandes[2]; Antônio Américo Cardoso Júnior[2]; José Reinaldo Moreira da Silva[1]; Anna Carolina de Almeida Andrade[2].

[1] Universidade Federal de Lavras
[2] Universidade Federal de Sergipe

Resumo: O setor moveleiro sofre da necessidade em estabelecer um controle de qualidade, porém, o alto custo de equipamentos que avaliam a qualidade da madeira é uma barreira para a cadeira produtiva de micro e pequenas indústrias. Assim, objetivou-se implementar uma técnica de baixo custo capaz de avaliar e qualificar a superfície da madeira usinada. Utilizou-se imagens em alta definição que geraram dados de histograma do software ImageJ e os dados foram comparados com técnicas de rugosidade e análise visual. A rugosidade média total classificou a madeira de Muiracatiara com melhor qualidade (5,182 µm) e a madeira de Pinus apresentou a pior qualidade (7,538 µm). A análise visual confirmou o resultado, classificando as madeiras como qualidade satisfatória, exceto o Pinus. O histograma classificou a madeira de Muiracatiara como a melhor qualidade (97,105) e a pior qualidade para a madeira de Pinus (166,910). A correlação de Pearson apresentou valor de 0,892, classificado como forte correlação positiva e os valores de RMSE variaram entre 0,003 e 0,284, apresentando um bom potencial preditivo. Concluiu-se que o histograma pode ser utilizado como alternativa a análise visual, com uma boa reprodutividade para micro e pequenas empresas moveleiras.

Palavras-chave: Qualidade da superfície usinada; Setor moveleiro; Metodologia não destrutiva.

Use of images for wood surface quality determination

Abstract: The furniture sector suffers from the need to establish quality control; however, the high cost of equipment that evaluates wood quality acts as a barrier for the production chain of micro and small industries. Thus, the objective was to implement a low-cost technique capable of evaluating and qualifying the surface of machined wood. High-definition images were used to generate histogram data in ImageJ software, and the data were compared with roughness techniques and visual analysis. The total average roughness classified Muiracatiara wood as having the best quality (5.182 µm) and Pinus wood as having the worst quality (7.538 µm). The visual analysis confirmed the result, classifying the woods as having satisfactory quality, except for Pinus. The histogram classified Muiracatiara wood as having the best quality (97.105) and Pinus wood as having the worst quality (166.910). The Pearson correlation yielded a value of 0.892, classified as a strong positive correlation, and the RMSE values ranged between 0.003 and 0.284, demonstrating good predictive potential. It was concluded that the histogram can be used as an alternative to visual analysis, with good reproducibility for micro and small furniture companies.

Keywords: Machined surface quality; Furniture sector; Non-destructive methodology.

1. Introdução

Entre os diversos usos da madeira, o setor moveleiro desempenha papel de destaque na cadeia produtiva da madeira serrada. De acordo com os dados do Relatório Setorial da Indústria de Móveis no Brasil (Abimóvel, 2025), no ano de 2025 foram produzidas mais de 434,7 milhões de peças de móveis no país, com exportações que totalizaram US$769,3 milhões, gerando 287,2 mil trabalhadores envolvidos direta e indiretamente na cadeia produtiva e um faturamento de R$92,1 bilhões.

O conhecimento das propriedades da madeira é fundamental para se obter produtos com parâmetros adequados e para previsão do seu comportamento durante o processamento garantindo maior controle no processo de usinagem e processos produtivos para a obtenção de um produto com padrão de qualidade adequada (Pereira, 2017).

A qualidade da superfície da madeira representa um fator crucial para sua aplicação industrial, especialmente no uso da madeira sólida, exercendo influências em etapas como revestimento, adesivagem e usinagem. Propriedades como rugosidade, estabilidade dimensional e presença de defeitos superficiais interferem diretamente na performance do material, sendo determinantes para sua viabilidade em diferentes finalidades, desde o uso estrutural até a fabricação de produtos acabados (Andrade *et al*., 2016).

A avaliação da qualidade superficial da madeira pode ser realizada por diferentes métodos, como a análise visual e a medição da rugosidade. No entanto, durante o processo de caracterização da superfície usinada, o uso de metodologias empíricas de baixa precisão, ao exemplo da análise visual, pode acarretar problemas devido à falta de padronização entre avaliadores (Minini *et al*., 2021). Embora, a avaliação da rugosidade seja utilizada e funcional para o estudo da superfície da madeira após seu processamento mecânico, o elevado custo dos equipamentos pode ser um entrave à sua implementação em micro e pequenas indústrias moveleiras.

Assim, o estudo teve como objetivo implementar e avaliar uma tecnologia inovadora, de baixo custo e capaz de avaliar e qualificar a superfície da madeira usinada, visando seu emprego em micro e pequenas indústrias do setor moveleiro.

2. Material e métodos

O experimento foi realizado no Laboratório de Usinagem e Produção de Móveis (LUPM) e no Laboratório de Análise Qualitativa da Madeira (LAQM), vinculados ao Departamento de Ciências Florestais da Universidade Federal de Sergipe (DCF/UFS). Foram utilizados nove corpos de prova, distribuídos em três diferentes espécies de madeira: *Pinus* spp.,

Astronium lecointei (Muiracatiara) e *Eucalyptus* spp., resultando em três amostras para cada espécie, totalizando nove corpos de prova.

Os corpos de prova foram submetidos a três diferentes condições de umidade: absolutamente seca (AS), úmida (U) e submersa (SUB). As condições úmida e submersa foram conduzidas em ambiente controlado, para isso foi utilizado uma caixa plástica fechada, em que foi adicionada água até a metade, garantindo a total imersão de um corpo de prova de cada espécie. A substituição da água foi realizada semanalmente para manter a uniformidade das condições experimentais. Os corpos de prova submetidos a condição U, foram acondicionados na parte superior da caixa, sem contato direto com a água, porém expostos a umidade. Dessa forma, essas amostras permaneceram em condição de alta umidade devido ao ambiente saturado, conforme Figura 1.

Por sua vez, os corpos de prova correspondentes à condição absolutamente seca foram secos em estufa de ventilação forçada em condições controladas com temperatura fixada em 103±2°C.

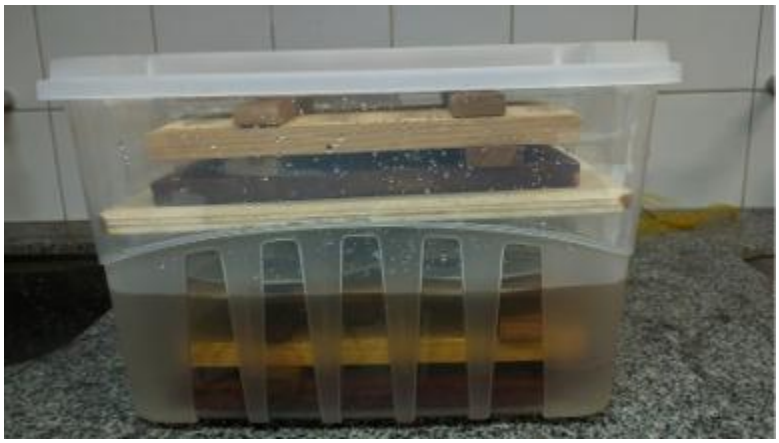


Figura 1 – Recipiente para ambientação das madeiras nas condições úmida e submersa.

Após ambientação dos corpos de prova nas três condições de umidade, estes foram processados mecanicamente em plaina desempenadeira, equipada com cabeçote de 10 cm de diâmetro, contendo duas facas novas, operando a uma velocidade de corte 18,2m.s^{-1}. As avaliações foram realizadas imediatamente após o aplainamento, de modo a preservar as condições de umidade das amostras.

A rugosidade superficial da madeira foi avaliada por meio dos parâmetros Ra (rugosidade média), Rq (rugosidade quadrática média) e Rz (altura máxima de rugosidade), os quais são amplamente utilizados para a caracterização de materiais biológicos, como a madeira, em função da sua eficiência na descrição das irregularidades superficiais (ASME, 2019). As

medições foram realizadas com um rugosímetro de arraste, modelo SURFTEST SJ-210 (Mitutoyo), com comprimento de amostragem de 0,8mm, posicionado paralelamente às fibras da madeira, contemplando 100 pontos por corpo de prova.

O procedimento foi conduzido conforme a metodologia descrita nas diretrizes da NBR ISO 4287 (ABNT, 2002) e NBR ISO 4288 (ABNT, 2008), que definem os princípios e parâmetros para a medição da rugosidade em superfícies.

A análise visual da superfície da madeira foi conduzida de acordo com os critérios da norma ASTM D1666-22 (ASTM, 2022), sendo uma forma de classificar as madeiras usinadas e auxiliar na compreensão de sua adequação para diferentes usos após o processamento. A classificação da qualidade da superfície usinada é realizada de modo a atribuir notas para a superfície usinada, classificando-as quanto aos defeitos visíveis a olho nu, que varia entre nota 1 (excelente) para superfície isenta de quaisquer defeitos, até nota 5 (muito ruim) para presença de arrancamento forte, independente da presença de arrepiamento. A avaliação foi realizada por três observadores treinados. As notas atribuídas foram comparadas inicialmente duas a duas, e posteriormente, confrontadas com a nota do terceiro avaliador. Quando não houve concordância entre as notas propostas, adotou-se a média aritmética das três notas para definição do resultado.

A proposta desta nova metodologia consiste na obtenção de imagens em alta definição da superfície da madeira, seguida do processamento dessas imagens no software ImageJ, visando a comparação dos resultados com aqueles obtidos por outros métodos de avaliação da qualidade superficial.

Para o trabalho, as imagens foram digitalizadas no Laboratório de Análise de Sementes (LABSEM) da UFS, utilizando-se o equipamento GroundEye, que permite a geração de imagens em alta definição para análises detalhadas da superfície de madeira.

Os dados foram gerados com a ferramenta histograma, utilizada para calcular a distribuição dos níveis de cinza presentes na imagem, fornecendo informações como as dimensões da imagem em pixels, o número total de pixels analisados, média dos valores de intensidade, o desvio padrão entre outras métricas (Schneider *et al*., 2012). As imagens obtidas foram convertidas para o padrão digital 8 bits. A conversão da imagem para 8 bits segue a metodologia descrita por Andrade et al. (2016).

Após a obtenção e conversão das imagens, utilizou-se a ferramenta de seleção por polígonos, a qual permite a delimitação de toda a superfície analisada. A Figura 2 ilustra um exemplo da área selecionada para a análise no presente trabalho.

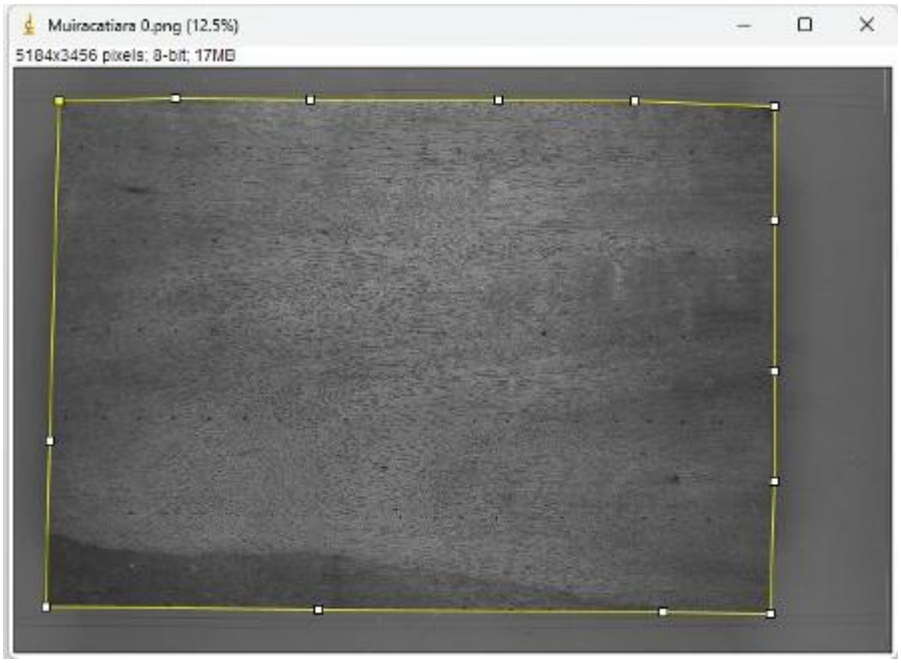


Figura 2 – Uso da ferramenta para seleção de polígono em imagem 8-bit.

Em seguida, utilizou-se da função de histograma. Essa ferramenta permite a análise estatística da distribuição dos níveis de cinza da imagem previamente selecionada, que variam de 0 a 255 no formato 8-bit. Para o presente estudo, os parâmetros de maior interesse na análise do histograma são: média (Mean) e desvio padrão (StdDev), usadas para comparação de médias e estimativa de erro, respectivamente. Por serem métricas diretamente relacionadas à uniformidade e à variabilidade da superfície da madeira, possibilitam a comparação com os resultados obtidos pelo método de análise visual.

3. Resultados e discussão

A madeira de Muiracatiara apresentou a melhor qualidade superficial de acordo com os parâmetros de rugosidade, enquanto a madeira de Pinus apresentou os piores valores para todas as condições de umidade testadas. No que se refere à rugosidade superficial, é necessário considerar fatores como a constituição anatômica, composição química e processamento, que podem exercer influência significativa na qualidade da superfície das madeiras analisadas (Cunha *et al.*, 2023). Pesquisadores como Pereira et al. (2000) ressaltam em sua pesquisa que madeiras com superfícies lisas e pouco rugosas são objeto de interesse do setor moveleiro, uma vez que apresentam melhor aderência de revestimentos. As diferenças entre as espécies foram confirmadas pelos testes estatísticos, conforme apresentado na Tabela 1.

Tabela 1 – Valores médios das diferentes condições analisadas relativos aos parâmetros de rugosidade

Condição	Espécie	Ra (µm)	Rq (µm)	Rz (µm)
AS	Pinus	2,739 a3	3,420 a3	14,766 a3
	Eucalipto	2,183 a2	2,743 a2	12,009 a2
	Muiracatiara	1,646 a1	2,116 a1	9,843 a1
U	Pinus	2,809 a3	3,537 a3	15,488 a3
	Eucalipto	2,321 a2	2,911 a2	12,692 a2
	Muiracatiara	2,289 a2	2,924 a2	12,996 a2
SUB	Pinus	3.264 a4	4,105 a4	17,719 a4
	Eucalipto	2,413 a2	3,135 a3	13,332 a2
	Muiracatiara	1,842 a1	2,328 a1	10,654 a1

Legenda: AS- absolutamente seca; U- úmida; SUB- submersa. Médias seguidas dos mesmos números na mesma coluna são estatisticamente iguais e médias seguidas de números diferentes na mesma coluna são estatisticamente diferentes. Não foi avaliada a diferença entre linhas.

Com o objetivo de estabelecer um comparativo entre os métodos testados, a Tabela 2 apresenta a relação entre as médias de pixels obtidas por meio da análise do histograma e os resultados das análises qualitativas realizadas no experimento.

De acordo com Silva et al. (2009), para a classificação da superfície usinada em madeiras deve-se utilizar apenas duas categorias: satisfatória e não satisfatória. Com base nesse critério, verificou-se que oito corpos de prova apresentaram qualidade satisfatória (notas entre 1 e 3) e somente a madeira de Pinus na condição de alta umidade apresentou qualidade não satisfatória (notas entre 4 e 5).

Para o histograma, quando comparado aos resultados da análise visual e rugosidade, observa-se uma tendência que se repete entre as espécies avaliadas. A madeira de Muiracatiara apresentou as menores notas nas duas metodologias, indicando melhor qualidade da madeira. Na análise visual, esse desempenho está associado à menor presença de defeitos visíveis, enquanto, na análise do histograma, relaciona-se à menor variação nos níveis de cinza próximos ao valor máximo (255), resultando em superfícies mais homogêneas e com menos defeitos visíveis. Do mesmo modo ocorre nas madeiras de Eucalipto e Pinus, que apresentam valores mais elevados nas duas metodologias. Esses resultados indicam maior presença de defeitos visíveis na análise visual e maior variação nos níveis de cinza na análise por histograma, refletindo superfícies mais heterogêneas e com maior ocorrência de áreas defeituosas.

Tabela 2 – Relação das análises qualitativas e histograma

Madeiras		**Análise qualitativa**	**Histograma (8-bit/median)**
Espécie	Condição	Análise Visual	Média de pixels (desvio padrão)
Eucalipto	AS	3	138,327 (23,630)
Eucalipto	U	3	163,968 (22,072)
Eucalipto	SUB	3	144,109 (28,336)
Pinus	AS	3	168,089 (13,903)
Pinus	U	4	168,951 (17,549)
Pinus	SUB	3	163,690 (18,863)

Muiracatiara	AS	2	96,614 (15,959)
Muiracatiara	U	2	98,549 (17,724)
Muiracatiara	SUB	2	96,153 (17,459)

Não é possível comparar diretamente o histograma com os parâmetros de rugosidade, uma vez que as metodologias são coletadas utilizando escalas de tamanho diferente, sendo macroscópica e microscópica, respectivamente. Para comparação do histograma com a análise visual, utilizou-se o coeficiente de correlação de Pearson, que mede a força e a direção da relação linear entre duas variáveis, assumindo valores entre -1, que indica correlação negativa perfeita, e +1, que representa correlação positiva perfeita. A aplicação do coeficiente de correlação de Pearson entre os resultados do histograma e a metodologia de análise visual resultou no valor de 0,892 indicando correlação forte entre a média de pixels do histograma, indicando que menores valores atribuídos na análise visual (melhores notas), estão associados a menores médias de pixels na imagem. Esse comportamento reflete uma menor variação nos níveis de cinza, resultando em imagens mais suaves e homogêneas, e consequentemente, em superfícies usinadas de melhor qualidade.

Yorulmaz (2025) descreve que altos valores de variação dos pixels na escala de cinza estão associados a superfícies mais complexas e heterogêneas, enquanto menores variações indicam superfícies mais organizadas e homogêneas. Dessa forma, regiões da madeira que apresentam maior variação nos níveis de cinza tendem a corresponder a superfícies irregulares, com ocorrência de arrepiamento ou arrancamento de fibras, evidenciadas por picos mais acentuados no histograma.

A observação de correlações forte sugere a metodologia do histograma como uma possibilidade viável, de baixo custo e assertividade nas classificações da madeira quanto sua qualidade superficial.

Embora outros parâmetros estatísticos do histograma possam fornecer informações complementares, a média mostrou-se adequada para avaliar o potencial preditivo do método proposto. No caso, o histograma passa a ser a variável explicativa (x), e os métodos consolidados passam a ser a variável resposta (y).

A regressão linear simples indicou relação diretamente proporcional entre a média de pixels do histograma e as notas atribuídas na análise visual. O coeficiente de determinação (R^2) evidenciou que grande parte da variação observada na avaliação visual da superfície da madeira pode ser explicada pela variação da média dos níveis de cinza obtidos por imagens digitalizadas.

O modelo apresentou $R^2 = 0,796$, indicando que aproximadamente 80% da variação das notas da análise visual pode ser explicada pela média de pixels do histograma.

Para determinar a precisão do modelo de regressão, utilizou o RMSE, que encontrou valores que variaram entre 0,003 e 0,284, considerados baixos. Valores reduzidos de RMSE indicam maior capacidade do modelo em estimar a qualidade superficial da madeira a partir do histograma. A Tabela 3 mostra um resumo da análise de regressão linear simples entre os dados de médias de pixels do histograma e as notas da análise visual.

Tabela 3 – Resumo da regressão linear simples entre histograma e análise visual

Intercepto (β0)	Coeficiente angular (β1)	Coeficiente de determinação (R^2)	Valores estimados	RMSE
0,230	0,019	0,796	2,791	0,284
			3,266	0,275
			2,898	0,261
			3,342	0,258
			3,358	0,232
			3,261	0,089
			2,019	0,020
			2,055	0,018
			2,010	0,003

4. Conclusões

- A metologia baseada em histograma de níveis de cinza classificou a madeira de Pinus com maior variação média de pixels (166,910), seguida da madeira de Eucalipto (148,801), enquanto a madeira de Muiracatiara apresentou a menor variação média (97,105). Esses resultados são consistentes com as metodologias consolidadas de avaliação da qualidade superficial da madeira, classificando, respectivamente, as madeiras de Muiracatiara, Eucalipto e Pinus, como de melhor, intermediária e pior qualidade superficial.
- A metodologia do histograma pode ser empregada como metodologia alternativa à análise visual, em função da forte correlação positiva observada entre ambas (r = 0,892).
- A regressão linear simples demonstra que o histograma de níveis de cinza não apenas se correlaciona, mas possui potencial preditivo na estimativa da qualidade superficial da madeira, reforçando sua aplicabilidade como ferramenta objetiva e de baixo custo, possibilitando melhores condições de reprodutividade entre as micro e pequenas indústrias do setor moveleiro.

5. Agradecimentos

Agradecemos a CAPES e FAPEMIG pelo incentivo educacional para desenvolvimento de pesquisas, ao LUPM-UFS, LABSEM-UFS e todos os técnicos dos respectivos laboratórios por toda a ajuda na coleta de dados para realização da pesquisa.

6. Referências bibliográficas

Abimóvel – Associação Brasileira das Indústrias do Mobiliário. (2026). Relatório Setorial da Indústria de Móveis no Brasil. Brasil Móveis. https://abimovel.com/capa/dados-do-setor/.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2002). Especificações geométricas do produto (GPS) — Rugosidade: Método do perfil — Termos, definições e parâmetros da rugosidade (Norma ABNT NBR ISO 4287:2002). ABNT.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2008). Especificações geométricas de produto (GPS) — Rugosidade: Método do perfil — Regras e procedimentos para avaliação de rugosidade (Norma ABNT NBR ISO 4288:2008). ABNT.

American Society for Testing and Materials – ASTM. (2022). Standard test methods for conducting machining tests of wood and wood-base panel materials (ASTM D1666-22). https://www.doi.org/10.1520/D1666-87R99.

Andrade, A. C. de A.; Silva, J. R. M. da.; Braga Junior, R. A.; Moulin, J. C. (2016). Utilização da Técnica Sunset Laser para Distinguir Superfícies Usinadas de Madeira com Qualidades Similares. Cerne, 22(2), 159–162. https://doi.org/10.1590/01047760201622022025.

ASME - American Society of Mechanical Engineers. (2019). Surface texture: Surface roughness, waviness, and lay (ASME B46.1-2019). https://www.asme.org/getmedia/f22128e5-acad-429d-bc75-0ac4bdffdf44/b46-1-2019-11x17-poster.pdf.

Cunha, S. C. A.; Rocha, A. L. M.; Silva, M.; Andrade, A. C. de A; Junior, A. A. C. (2023). Qualidade superficial e custo-benefício de madeiras utilizadas na fabricação de móveis em Aracaju/SE. Research, Society and Development, 12(6). https://doi.org/10.33448/rsd-v12i13.44430.

Minini, D.; Braga, B. de A.; Maria, D. de M. B.; Gmach, F.; Albuês, T. A. S.; Jesus, W. S.; Monteiro, T. C. (2021). Qualidade e Processamento da Madeira Serrada no Brasil: Estado da Arte. Em W. V. Vangelista (Ed.), Madeiras Nativas e Plantadas do Brasil: Qualidade, Pesquisas e Atualidades (pp. 401-409). Editora Científica.

Pereira, J.C.D.; Sturion, J.A.; Higa, A.R.; Higa, R.C.V.; Shimizu, J.Y. (2000). Características da madeira de algumas espécies de eucalipto plantadas no Brasil. Colombo: Embrapa Florestas.

Pereira, K. do N.; Gonçalez, J. C.; Raabe, J.; Costa, A. F. da. (2017). Calidad de la superficie de chapas de madera de Ficus sp. sometidas a tratamientos de acabado. Madera Y Bosques, 23(2), 181–191. https://doi.org/10.21829/myb.2017.2321224.

Schneider, C.; Rasband, W.; Eliceiri, K. (2012). NIH Image to ImageJ: 25 years of image analysis. Nat Methods, 9, 671–675. https://doi.org/10.1038/nmeth.2089.

Silva, J. R. M; Martins, M.; Oliveira, G. M. V.; Braga, P. P. B. (2009). Parâmetros de qualidade da usinagem para determinação dos diferentes usos da madeira de Eucalyptus. Cerne, Lavras, v. 15, n. 1, p. 75-83. https://repositorio.ufla.br/handle/1/14363.

Yorulmaz, T. E. (2025). Decoding Image Secrets: A Hands-On Guide to GLCM Texture Analysis in Google Earth Engine. Medium. https://medium.com/@taremyor/decoding-image-secrets-a-hands-on-guide-to-glcm-texture-analysis-in-google-earth-engine-8788dbcac976.

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Utilização de estufa solar para secagem da madeira de *Acacia mangium* Willd.

Pedro Lucas de Andrade Silva[1]; Tatiane Kelly Barbosa de Azevedo[1]; Elaine Cristina Alves da Silva[1]; Denys Santos de Souza[1]

[1] Universidade Federal do Rio Grande do Norte

Resumo: O estudo teve como objetivo avaliar o desempenho da secagem de toras de *Acacia mangium*, para fins comerciais, em estufa solar. A espécie, nativa da Austrália, possui grande valor econômico e é bastante utilizada na recuperação de áreas degradadas e uso madeireiro. O experimento foi conduzido na região Nordeste do Brasil, utilizando árvores selecionadas aleatoriamente, com altura média de 11 m. A estufa solar, pertence ao Campus Universitário da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, e é formada por uma estrutura metálica e telhado transparente de polietileno. A toras utilizadas foram classificadas em três classes diamétricas (C1, que varia de 1 a 10cm, C2 de 11 a 20cm e C3 que tem variância de 21 a 30cm), sendo analisado o teor de umidade com relação ao tempo. As três classes chegaram a um baixo percentual de umidade em 60 dias. Os resultados permitiram concluir que a estufa solar é sugerida, em características climáticas favoráveis, como alternativa para secagem de madeira da Acácia e que há aspectos que podem influenciar de maneira mais dominante no processo de secagem do que a classe diâmetrica.

Palavras-chave: Teor de Umidade; Propriedades da madeira; Espécie exótica.

Use of a solar dryer to dry *Acacia mangium* Willd. wood.

Abstract: The study aimed to evaluate the performance of drying Acacia mangium logs for commercial purposes in a solar greenhouse. This species, native to Australia, has great economic value and is widely used in the restoration of degraded areas and for timber production. The experiment was conducted in the Northeast region of Brazil, using randomly selected trees with an average height of 11 m. The solar greenhouse is located on the campus of the Federal University of Rio Grande do Norte and consists of a metal frame and a transparent polyethylene roof. The logs used were classified into three diameter classes (C1, ranging from 1 to 10 cm; C2, from 11 to 20 cm; and C3, ranging from 21 to 30 cm), and their moisture content was analyzed over time. All three classes reached a low moisture content within 60 days. The results led to the conclusion that the solar greenhouse is recommended, under favorable climatic conditions, as an alternative for drying Acacia wood, and that there are factors that may have a more significant influence on the drying process than the diameter class.

Keywords: Moisture Content; Properties of Wood; Exotic Species.

1. Introdução

A *Acacia mangium* Willd. é uma espécie arbórea exótica, natural da região noroeste da Austrália, Papua Nova Guiné e leste da Indonésia e foi implantada no Brasil por meio de plantios experimentais realizados pela Embrapa Florestas em 1979. Em 1985 plantios para teste

de procedência foram estabelecidos em Minas Gerais (Tonini et al., 2010; Santos & Silva, 2020). Em 1998 a espécie foi introduzida em Roraima pela empresa Ouro Verde Agrossilvipastoril Ltda. (OVA), inicialmente como plantio experimental, com o objetivo de avaliar o crescimento da mesma em condições edafoclimáticas da savana. Os resultados indicaram a viabilidade do plantio e incentivaram o investimento na monocultura na região de Boa Vista (RR), a partir de 1999. No ano de 2007, 80.866 ha de savana foram ocupados pelas atividades da OVA, sendo 26.757 ha ocupados por plantios. A capacidade de produção de madeira serrada de A. mangium foi estimada em 10.000 m3 /ano (Plano de manejo florestal - Projeto Ouro Verde, 2007). No contexto global, a espécie é produzida principalmente no sudeste asiático, na Indonésia no ano de 2020 ela representou a maior produção madeireira, totalizando 32 milhões de m³ (Statistics Indonesia, 2021).

A espécie é perenifólia, pioneira, de rápido crescimento e apresenta boa adaptação a diferentes ambientes, além de baixa exigência quanto às condições do solo. Essas características favorecem a remoção de carbono atmosférico, o armazenamento de carbono no solo e sua utilização na recuperação de áreas degradadas (Rossi et al., 2003; Vélez & Del Valle, 2007). Esse desempenho está relacionado à simbiose com bactérias do gênero *Rhizobium*, responsáveis pela fixação biológica de nitrogênio (National Research Council, 1983; Souza et al., 2004). Sua madeira, de baixa a média densidade (Vale et al., 1999; Gonçalves & Lelis, 2012), possui ampla aplicação na serraria, movelaria, produção de adesivos, papel e celulose e como fonte de energia. Além disso, a espécie é indicada para paisagismo, arborização urbana, quebra-vento, contrafogo e apresenta potencial melífero (Lorenzi et al., 2003; Souza et al., 2004).

Diante das características favoráveis da espécie quanto ao rápido crescimento em diferentes ambientes, possuindo grande adaptabilidade, é importante que haja manutenção e monitoramento em seus plantios, visto que estas condições podem potencializar a característica de espécie invasora e influenciar em ecossistemas vizinhos e na sobrevivência de espécies nativas do ambiente. Attias (2013) sugere estratégias de “cercamento” dos plantios comerciais por espécies nativas da região, de crescimento rápido e com grande capacidade de sombreamento, que poderia inibir a germinação das sementes exóticas dispersadas nas áreas adjacentes.

Uma das operações mais importantes dentro da indústria de transformação da madeira é a secagem, a mesma pode ser definida como o processo da redução de seu teor de umidade, com o objetivo de levá-la a um teor de umidade definido, otimizando tempo e integrando uma estratégia economicamente viável, para o uso a que a madeira se destina (Martins, 1988). Esse

processo agrega valor ao produto pois garante ao mercado consumidor um material livre de defeitos, agregando resistência biológica, elevada resistência mecânica e melhor estabilidade dimensional (Talgatti et al., 2020).

O processo de secagem pode garantir diversos benefícios, como: aumento da estabilidade dimensional; redução de peso, riscos de manchas e apodrecimento; melhor tratabilidade e trabalhabilidade; aumento da resistência mecânica e propriedade de pega; melhora na fixação de pregos e parafusos e nas propriedades de isolamento (Martins, 1988). Sendo a *Acacia mangium* uma espécie com potencial madeireiro, é necessária a secagem para assegurar que a madeira se torne dimensionalmente estável para o uso ou, dependendo da finalidade, isenta de água.

Severo (2000), afirma que, a secagem da madeira é reconhecida como um procedimento importantíssimo, o qual agrega melhoria da qualidade da madeira e sua conservação, aumentando a sua durabilidade. Para que se adquira produtos de grande valor agregado, a mesma deve ser adequada, com distribuição uniforme da umidade, e livre de irregularidades (Dittmann et al., 2017). De acordo com o uso final da madeira, o tipo e tempo de secagem podem ser diferentes. Um exemplo é o uso como lenha, no qual é preferível que a madeira esteja com umidade baixa. Como exposto por Cardoso (2020), quanto mais seca ela estiver, maior será o seu rendimento energético.

Os métodos de secagem podem influenciar no tempo de secagem, na qualidade do material seco, e na obtenção do teor de umidade desejado para determinada finalidade, a escolha adequada do método pode definir a qualidade do material final, reduzindo a incidência de defeitos e o tempo do processo (Susin et al., 2014). A compreensão quanto as técnicas que possibilitem diminuir o tempo de secagem, e melhorar a qualidade da madeira são a chave para reduzir o consumo de energia no processo, diminuindo custos, e alavancando lucros (Santini et al., 2016).

Uma das formas de secagem da madeira é a partir do uso de estufas solares. Estrutura construída de metais (ou outros materiais, como por exemplo canos, madeira,) e material transparente (plástico/filme agrícola de estufa) que utiliza a luz solar para secagem. É uma alternativa excelente para regiões de clima tropical, como é o caso do Brasil, especialmente na região Nordeste. Esse método tem sido indicado por muitos autores (Bauer, 2003; Haque, 2002) por se tratar de uma técnica eficiente e de baixo custo, reduzindo gastos com manutenção equipamentos mais caros, e energia. Inúmeros trabalhos realizados nessa região (Barros et al., 2018; Pereira et al., 2006) tem mostrado resultados positivos acerca da utilização da energia

solar. O Brasil é disposto de um elevado potencial de aproveitamento da energia solar. Diante disso, este trabalho tem como objetivo avaliar o comportamento da secagem da madeira em toras de *Acacia mangium* em função do seu diâmetro, em uma estufa solar no município de Macaíba-RN.

2. Material e métodos

O estudo foi realizado na Unidade Acadêmica Especializada em Ciências Agrárias da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN) situada no município de Macaíba/ RN.

As toras utilizadas como amostras foram retiradas de árvores abatidas em um plantio experimental de Acacia mangium na Área de Experimentação Florestal da UFRN, localizada em Macaíba-RN. A área tem uma altitude média de 11 metros e segundo a classificação de Koppen, possui clima do tipo tropical chuvoso, com precipitação pluviométrica anual em torno de 800mm e temperaturas médias anuais de 21,7ºC. A região apresenta solos do tipo Podzólico Vermelho Amarelo e Latossolo Vermelho Amarelo Distrófico (Idema Instituto de Desenvolvimento Econômico e Meio Ambiente [IDEMA], 2013).

Foram escolhidas, de modo aleatório, 10 Árvores com 11 metros de altura em média. Após o abate, foram mensurados os valores de CAP (circunferência à altura do peito), altura total, e altura comercial. Os troncos principais dos indivíduos foram cortados em toras com aproximadamente 1,5 m de comprimento, cada indivíduo obteve em torno de 5/6 toras, totalizando um número de 53 toras. Elas foram divididas em três classes diamétricas, classificação C1 (que varia de 1 a 10 cm), classificação C2 (que varia de 11 a 20 cm) e a classificação C3 (que varia de 21 a 30 cm). Foram escolhidas oito toras para a retirada de discos de 3 cm de espessura aproximadamente, de cada uma das extremidades, obtendo-se um total de 16 discos (Figura 1).

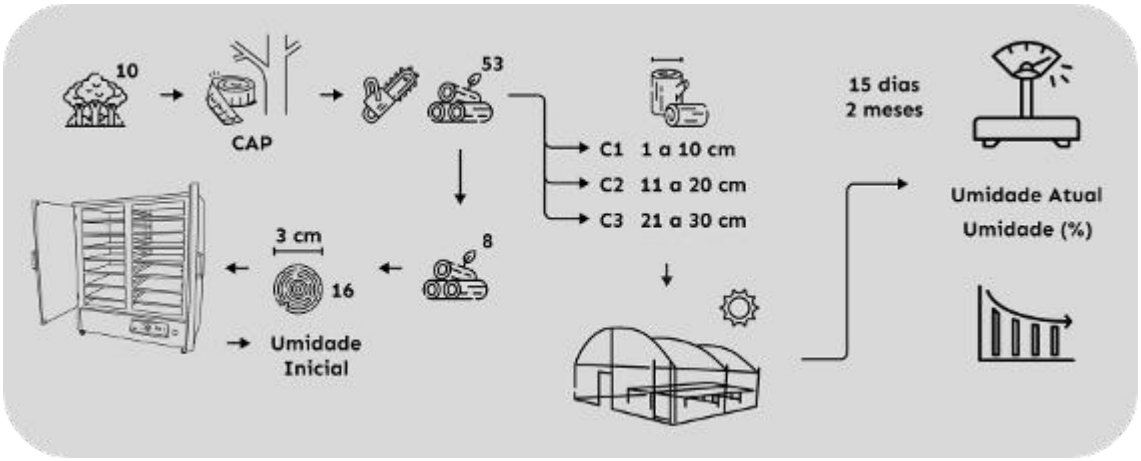


Figura 1 - Fluxograma do experimento, com preparo das amostras, secagem e determinação da umidade da madeira.

As toras foram levadas até a estufa, identificadas e acondicionadas em uma pilha, sem a separação por classes de diâmetro. A estufa solar possuía uma estrutura metálica e teto de polietileno, permitindo a entrada dos raios solares com facilidade. As pesagens das toras foram feitas a cada 15 dias, durante 2 meses, sendo utilizada, para isso, uma balança com precisão de 0,2 kg.

Os discos retirados de 8 toras, com diâmetros diversificados, foram identificados e dispostos numa estufa de circulação forçada em temperatura a 63º± 2ºC para serem secos até massa constante. A partir disso foi possível determinar a umidade inicial segundo a Norma NBR11941/2003, da (Associação Brasileira de Normas Técnicas [ABNT], 2003), a partir da Equação 1.

Ui = (Mu - Ms)Ms *100

Em que: Ui: umidade inicial (%); Mu: massa úmida (g); Ms: massa anidra (g). Após a obtenção da umidade inicial, foi possível determinar a massa inicial das toras através de pesagens individuais de uma delas.

Com os dados das pesagens feitas, foi estabelecida a variação da umidade das toras até todas as classes terem atingido o ponto de saturação das fibras (30%), conforme a Equação 2.

Ua = Ma *(Ui + 100) Mu - 100

Em que: Ua: umidade atual (%); Ma: massa atual da tora (kg); Ui: umidade inicial média estimada a partir dos discos (%); Mu: massa úmida inicial da tora (kg).

Os dados obtidos foram submetidos à análise de regressão utilizando o pacote estatístico (Statistical Analysis System [SAS], 1993), no qual foi aplicado o procedimento de seleção de variáveis - Stepwise. O modelo foi definido pela umidade (U), em porcentagem, em função do tempo de secagem (t), em dias, pela Equação 3.

$$U = f(t; 1/t; t^2; 1/t^2; \ln t; t)$$

3. Resultados e discussão

No período do experimento, foi observado que a cada 15 dias houve uma expressiva redução da umidade, provavelmente associada à remoção da água livre presente nos vasos e espaços celulares da madeira. Valores alcançados mediante o clima da região Nordeste, favorável ao método utilizado, sendo predominantemente quente e possuindo temperaturas médias anuais acima de 24ºC (Araújo, 2011).

A figura 1, demonstra que aos 15 primeiros dias, a classificação C2 teve uma maior queda de percentual de umidade, seguido das classificações C3 e C1.

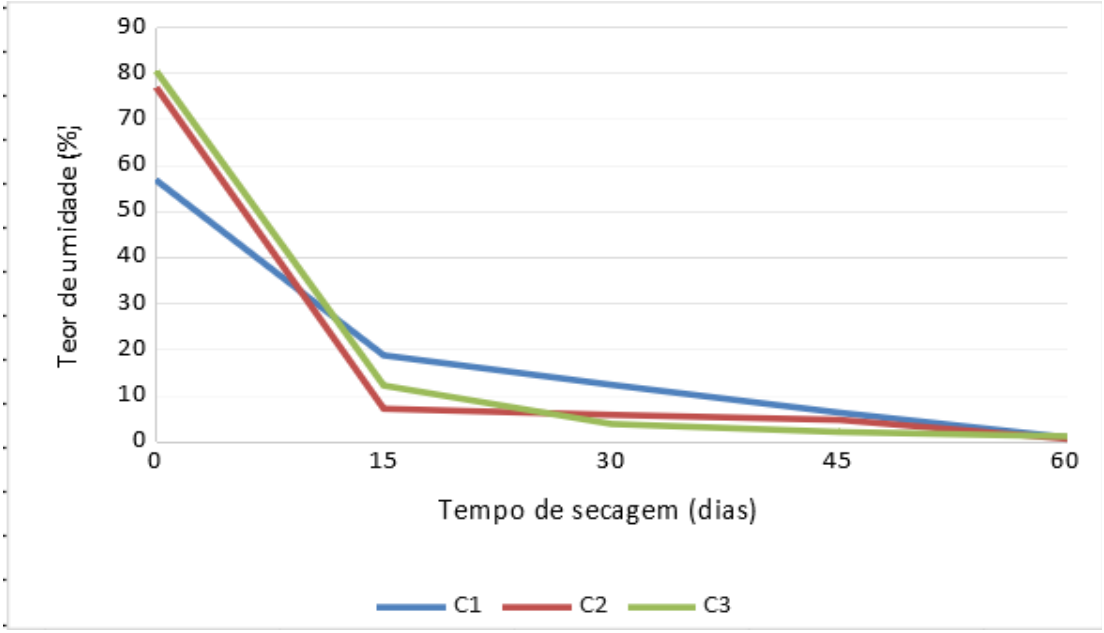


Figura 2 - Relação entre teor de umidade (%) e o tempo de secagem (dias) por classe diamétrica das toras, C1 (1 a 10 cm), C2 (11 a 20 cm) e C3(21 a 30 cm).

Nos 15 primeiros dias, a queda no valor é bastante significativa. As três classificações diamétricas tiveram resultados positivos, apresentando reduções no teor de umidade, entretanto, a classificação C2 mostrou uma maior e mais rápida redução na umidade, conseguindo chegar, no 15º dia a 7,23% de umidade. Ao 30º dia, as três classificações apresentaram o teor de umidade inferior a 13%.

O percentual do teor de umidade foi mais baixo quando comparando aos resultados encontrados por Souza et al. (2015), quando avaliou o teor de umidade utilizando estufa solar para secagem de madeira de *Eucalyptus dunnii* e *Pinus elliottii*, o *P. elliotti* alcançou em 15 dias o valor de 12,04%, já o *E. dunni* chegou a 12,84%, apenas após 30 dias de secagem. Os teores de umidade alcançados se mostraram positivos em comparação a análises realizadas por Susin et al. (2016), que avaliaram dois métodos de secagem para *Hovenia dulcis* Thunb. (uva-do-japão) e concluíram que a secagem em estufa solar foi mais eficiente que a secagem ao ar livre, alcançando teor de umidade final médio de 9,90% após 13 dias de secagem.

Os resultados da secagem em estufa solar para a espécie quando comparados aos do método de secagem ao ar livre foram satisfatórios, Braz et al. (2015), realizaram no estado do Espírito Santo, experimento avaliando o método de secagem ao ar livre das espécies *Tectona grandis* e *Acacia mangium* e a Acácia apresentou um teor de 21,4 apenas no dia 102 de secagem.

4. Conclusões

As toras de *Acacia mangium* atingiram teor de umidade satisfatório quando submetidas a utilização de estufa solar, na região Nordeste, para secagem de madeira. A classe C2, de diâmetro intermediário, possuiu o menor teor de umidade após os 15 dias de secagem, indicando que há a influência de outros aspectos mais significativos do que o diâmetro das toras no processo de secagem.

O experimento teve resultado positivo em comparação a valores observados em trabalhos realizados adotando a metologia de secagem ao ar livre. Com base na comparação feita, é recomendado o uso da estufa solar no processo de secagem de madeira desta espécie.

5. Agradecimentos

Agradeço à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio concedido ao desenvolvimento deste trabalho e aos envolvidos.

6. Referências bibliográficas

Araújo, S. M. S. de. (2011). A região semiárida do Nordeste do Brasil: Questões ambientais e possibilidades de uso sustentável dos recursos. Rios Eletrônica – Revista Científica da FASETE, 5(5), 88–98.

Attias, N., Siqueira, M. F., & Bergallo, H. G. (2014). Acácias australianas no Brasil: Histórico, formas de uso e potencial de invasão. Biodiversidade Brasileira, 3(2), 74–96. https://doi.org/10.37002/biodiversidadebrasileira.v3i2.321

Barros, H. F., Vilela, O. C., Sabino, E. R. C., & Brennand, L. J. P. (2018). Obtenção de dados de radiação solar para simulação de central fotovoltaica em Petrolina a partir de dados terrestres, irradiação global diária média e estimativas de imagens de satélite. In Anais do VII Congresso Brasileiro de Energia Solar. https://doi.org/10.59627/cbens.2018.711

Bauer, K. (2003). Development and optimisation of a low-temperature drying schedule for Eucalyptus grandis (Hill) ex Maiden in a solar-assisted timber dryer (Doctoral dissertation). Universität Hohenheim, Stuttgart, Germany.

Braz, R. L., Duarte, A. P. C., Oliveira, J. T. S., Motta, J. P., & Rosado, A. M. (2015). Curva característica de secagem da madeira de Tectona grandis e Acacia mangium ao ar livre. Floresta e Ambiente, 22(1), 117–123. https://doi.org/10.1590/2179-8087.078213

Dittmann, R. L., Souza, J. T., Talgatti, M., Baldin, T., & Menezes, W. M. (2017). Métodos de empilhamento e qualidade da madeira serrada de Eucalyptus dunnii e Araucaria angustifolia após secagem ao ar livre. Scientia Agraria Paranaensis, 16(2), 260–264. https://doi.org/10.18188/1983-1471/sap.v16n2p260-264

Gonçalves, F. G., & Lelis, R. C. C. (2012). Caracterização tecnológica da madeira de Acacia mangium Willd. em plantio consorciado com eucalipto. Floresta e Ambiente, 19(3), 286–295. https://doi.org/10.4322/floram.2012.034

Haque, M. N. (2002). Modelling of solar kilns and the development of an optimized schedule for drying hardwood timber (Doctoral dissertation). University of Sydney, Sydney, Australia.

Instituto de Desenvolvimento Sustentável e Meio Ambiente do Rio Grande do Norte. (2013). Perfil do município de Macaíba – RN. Governo do Estado do Rio Grande do Norte. http://adcon.rn.gov.br/ACERVO/idema/DOC/DOC000000000016679.PDF

Lorenzi, H., Souza, H. M., Torres, M. A. V., & Bacher, L. B. (2003). Árvores exóticas no Brasil: Madeireiras, ornamentais e aromáticas. Instituto Plantarum.

Martins, V. A. (1988). Secagem de madeira serrada. Instituto Brasileiro de Desenvolvimento Florestal, Laboratório de Produtos Florestais.

National Research Council. (1983). Mangium and other fast-growing acacias for the humid tropics. National Academies Press. https://doi.org/10.17226/1983

Pereira, E. B., Martins, F. R., Abreu, S. L., & Rüther, R. (2006). Atlas brasileiro de energia solar. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE).

Rossi, L. M. B., Azevedo, C. P., & Souza, C. R. (2003). Acacia mangium. Embrapa Amazônia Ocidental. https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/46463/1/Doc-28.pdf

Santini, E. J., Talgatti, M., Silveira, A. G., Haselein, C. R., & Azambuja, R. R. (2016). Secagem e qualidade da madeira serrada de Hovenia dulcis. Scientia Agraria Paranaensis, 15(4), 460–463. https://doi.org/10.18188/1983-1471/sap.v15n4p460-463

Santos, J. F., & Silva, J. V. (2020). Dispersão, distribuição espacial e potencial de dominância da Acacia mangium Willd. em remanescente de Mata Atlântica no distrito de Helvécia, Bahia. Revista Mosaicum, 16(31), 81–95.

SAS Institute Inc. (1993). *SAS* (Version 6.0) [Computer software]. SAS Institute Inc.

Severo, E. T. D. (2000). Qualidade da secagem de madeira serrada de Eucalyptus dunnii. Ciência Florestal, 10(1), 109–124.

Souza, C. R., Rossi, L. M. B., Azevedo, C. P., & Lima, R. M. B. (2004). Comportamento da Acacia mangium e de clones de Eucalyptus grandis × Eucalyptus urophylla em plantios experimentais da Amazônia Central. Scientia Forestalis, 65, 95–101.

Souza, J. T., Lima, E., Silva, G. L., Baldin, T., & Menezes, W. M. (2015). Avaliação da secagem em estufa solar de madeiras de Eucalyptus dunnii Maiden e Pinus elliottii Engelm. Enciclopédia Biosfera, 11(21), 277–290.

Statistics Indonesia. (2021). Statistics of forestry production 2020. Statistics Indonesia.

Susin, F., Santini, E. J., Stangerlin, D. M., Morais, W. W. C., & Melo, R. R. (2014). Drying rate and quality of Hovenia dulcis sawn wood submitted to two drying methods. Floresta e Ambiente, 21(2), 243–250. https://doi.org/10.4322/floram.2014.016

Talgatti, M., Baldin, T., Santini, E. J., Rosso, S., Oliveira, L. H., & Valcorte, G. (2020). Secagem da madeira de Hovenia dulcis e Eucalyptus tereticornis em forno micro-ondas com

diferentes potências de temperatura. Advances in Forestry Science, 7(3), 1121–1128. https://doi.org/10.34062/afs.v7i3.10153

Tonini, H., Angelo, D. H., Conceição, J. S., & Herzog, F. (2010). A silvicultura da Acacia mangium em Roraima. In H. Tonini, B. A. Halfeld-Vieira, & S. J. R. Silva (Eds.), Acacia mangium: Características e seu cultivo em Roraima (pp. 76–99). Embrapa Informação Tecnológica.

Vale, A. T., Brasil, M. A. M., & Martins, I. S. (1999). Variação axial da densidade básica da madeira de Acacia mangium Willd. aos sete anos de idade. Ciência Florestal, 9(2), 85–92.

Vélez, D. A. T., & Del Valle, J. I. (2007). Growth and yield modelling of Acacia mangium in Colombia. New Forests, 34, 293–305. https://doi.org/10.1007/s11056-007-9056-5

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Variação anatômica dos elementos de vaso em espécies nativas da Mata Atlântica de reflorestamento comercial

Benício Ambrósio Ávila[1]; Vinícius Resende de Castro[1]; Angelica de Cassia Oliveira Carneiro[1]; Evanderson Luis Capelete Evangelista[1]; Wanessa Kethelen Patricio Costa[1]; Leila Aparecida Lopes[1]; Isabelle Silveira Martins Honorato[1]

Universidade Federal de Viçosa[1]

Resumo: A utilização de espécies nativas da Mata Atlântica em plantios comerciais representa uma alternativa para conciliar restauração florestal, conservação ambiental e produção de madeira de maior valor agregado. Entretanto, a ausência de informações sobre a qualidade da madeira dessas espécies limita sua aplicação tecnológica. Neste contexto, o presente estudo teve como objetivo caracterizar de forma quantitativa os elementos de vaso de cinco espécies nativas provenientes de reflorestamento comercial: boleira (*Joannesia princeps*), jenipapo (*Genipa americana*), jacarandá-da-bahia (*Dalbergia nigra*), jequitibá-rosa (*Cariniana legalis*) e ipê-felpudo (*Zeyheria tuberculosa*). As análises foram realizadas por meio de dissociação celular, sendo determinados o diâmetro médio e a frequência dos elementos de vaso conforme as recomendações do IAWA Committee. Os resultados evidenciaram uma relação inversa entre o diâmetro e a frequência dos vasos. O ipê-felpudo e o jenipapo apresentaram maiores frequências vasculares (26,32 e 17,11 vasos mm^{-2}) associadas aos menores diâmetros médios (92,23 e 85,89 µm), indicando uma estratégia anatômica voltada à segurança hidráulica. Em contraste, o jacarandá-da-bahia e a boleira apresentaram vasos maiores e menos frequentes, caracterizando maior eficiência potencial de condução. O jequitibá-rosa apresentou comportamento intermediário. As diferenças anatômicas observadas demonstram a diversidade estrutural entre as espécies avaliadas e fornecem informações relevantes para a compreensão do comportamento funcional e tecnológico das madeiras nativas provenientes de reflorestamentos comerciais.

Palavras-chave: Xilema; Anatomia da madeira; Tecnologia da madeira.

Anatomical variation of vessel elements in native Atlantic Forest species from commercial reforestation

Abstract: The use of native Atlantic Forest species in commercial plantations represents an alternative for reconciling forest restoration, environmental conservation, and the production of high-value timber. However, the lack of information regarding the wood quality of these species limits their technological application. Therefore, this study aimed to quantitatively and characterize the vessel elements of five native species from commercial reforestation: *Joannesia princeps*, *Genipa americana*, *Dalbergia nigra*, *Cariniana legalis*, and *Zeyheria tuberculosa*. The analyses were performed through cell dissociation, and the mean vessel diameter and vessel frequency were determined according to the recommendations of the IAWA Committee. The results showed an inverse relationship between vessel diameter and frequency. *Zeyheria tuberculosa* and *Genipa americana* exhibited higher vessel frequencies (26.32 and 17.11 vessels mm^{-2}, respectively) associated with smaller mean diameters (92.23 and 85.89 µm), indicating an anatomical strategy related to hydraulic safety. In contrast, *Dalbergia nigra* and *Joannesia princeps* presented larger and less frequent vessels, characterizing a greater potential for hydraulic efficiency. *Cariniana legalis* showed an intermediate behavior. The anatomical differences observed demonstrate the structural diversity among the evaluated species and provide relevant information for understanding the functional and technological behavior of native woods from commercial reforestation.

Keywords: Xylem; Wood anatomy; Wood technology.

1. Introdução

A crescente demanda por recursos renováveis e produzidos de forma sustentável tornou o reflorestamento comercial com espécies nativas da Mata Atlântica um pilar estratégico para modelos de restauração produtiva de longo prazo (Rodrigues et al., 2009). Esse modelo de negócio une a conservação ambiental à valoração de produtos madeireiros de alto valor agregado, com foco no estoque de carbono da biomassa plantada, sendo complementado pelo aproveitamento tecnológico do lenho ao final do ciclo de manejo, quando o crescimento do estoque de carbono se estabiliza (Junqueira, 2018; Crouzeilles et al., 2017).

Considerando que as propriedades da madeira sofrem influência direta do sítio de plantio e das condições de crescimento, torna-se essencial avaliar a qualidade do lenho produzido em áreas de reflorestamento, de modo a guiar a escolha de espécies que atendam às demandas do mercado madeireiro (Souza et al., 2019; Nascimento, 2013). Embora existam

amplas informações sobre o comportamento de espécies exóticas, como *Eucalyptus* e *Pinus*, ainda há uma lacuna técnica significativa quanto às espécies nativas brasileiras cultivadas sob regime de plantio comercial (Figueirôa et al., 2005; Hoffmann et al., 2026). Essa escassez de parâmetros dificulta a orientação da utilização industrial e limita a agregação de valor econômico à madeira (Castro et al., 2023).

Nesse cenário, a caracterização anatômica de vasos apresenta-se como uma ferramenta indispensável para a tecnologia da madeira (Hoffmann et al., 2025). A estrutura anatômica não apenas auxilia na identificação taxonômica das espécies, mas também influencia diretamente o comportamento físico-mecânico, a usinagem e a permeabilidade do material (Carlquist, 2001; IAWA Committee, 1989). A disposição, o diâmetro e a frequência desses elementos influenciam ainda processos críticos, como a secagem e a penetração de compostos preservativos (Leggate et al., 2019).

Diante disso, este estudo teve como objetivo caracterizar quantitativamente os vasos de espécies nativas da Mata Atlântica provenientes de reflorestamento, buscando preencher a lacuna técnica existente e fornecer dados anatômicos que permitam correlacionar a estrutura do xilema com o potencial de uso industrial das madeiras selecionadas.

2. Material e métodos

As análises para a caracterização anatômica foram realizadas no Laboratório de Propriedades da Madeira (LPM) da Universidade Federal de Viçosa, com amostras de madeira de cinco espécies nativas da Mata Atlântica com potencial madeireiro: Boleira (*Joannesia princeps*), Jenipapo (*Genipa americana*), Jacarandá-da-Bahia (*Dalbergia nigra*), Jequitibá-rosa (*Cariniana legalis*) e Ipê-Felpudo (*Zeyheria tuberculosa*). As amostras fornecidas pela empresa Symbiosis Investimentos, provenientes de diferentes plantios comerciais de reflorestamento nas cidades de Porto Seguro e Trancoso, Bahia, Brasil. Todas as amostras foram retiradas de árvores com aproximadamente 14 anos de idade, conduzidas sob o mesmo sistema de manejo florestal. Foram selecionadas dez árvores por espécie, resultando em um total de 50 indivíduos. Foi retirado,

2.1 Dissociação Celular (Macerado)

Para a individualização e mensuração dos elementos de vaso, foi utilizado o método de Nicholls e Dadswell (1962). Fragmentos de madeira foram submetidos à maceração em solução

de ácido acético glacial e peróxido de hidrogênio (1:1), sob aquecimento a 60 °C por aproximadamente 48 horas. Após a dissociação celular, o material foi lavado, corado com azul de astra e montado em lâminas temporárias para posterior visualização e captura de imagens em microscópio óptico de luz (Figura 1).



Figura 1. Representação esquemática das etapas de dissociação celular da madeira pelo método de Nicholls e Dadswell (1962).

2.2 Caracterização Anatômica e Mensurações

A descrição qualitativa e quantitativa dos vasos seguiu as recomendações do IAWA Committee (1989). Foram realizadas medições do diâmetro transversal e da frequência dos elementos de vaso (número de vasos por mm²), utilizando softwares de análise de imagem acoplados ao sistema de microscopia.

3. Resultados e discussão

A caracterização anatômica do xilema secundário das cinco espécies nativas evidenciou variações na frequência e no diâmetro dos elementos de vaso (Tabela 1).

Tabela 1. Caracterização quantitativa dos elementos de vaso do xilema secundário das espécies avaliadas

Espécie	Nome Científico	Frequência média de Vaso	Diâmetro médio de	Classificação e Tendências

		(nº/mm²)	Vaso (µm)	(Comparação relativa entre as espécies)
Jenipapo	*Genipa americana*	17,11	85,89	Vasos menores e alta frequência
Ipê-felpudo	*Zeyheria tuberculosa*	26,32	92,23	Vasos menores e alta frequência
Jequitibá-rosa	*Cariniana legalis*	8,55	119,87	Situação intermediária
Jacarandá-da-bahia	*Dalbergia nigra*	4,69	158,15	Vasos grandes e baixa frequência
Boleira	*Joannesia princeps*	4,41	147,74	Vasos grandes e baixa frequência

Os resultados obtidos revelam uma tendência de relação inversa entre o diâmetro médio e a frequência dos vasos nas espécies analisadas. Esse comportamento reflete o trade-off (compensação) entre eficiência e segurança hidráulica, no qual as plantas ajustam sua estrutura vascular para equilibrar as demandas de transpiração e a estabilidade mecânica (Zanne et al., 2010; Lachenbruch & McCulloh, 2014). As espécies ipê-felpudo (*Z. tuberculosa*) e jenipapo (*G. americana*) exemplificam a estratégia de segurança, apresentando as maiores frequências vasculares (26,32 e 17,11 vasos/mm²) e os menores diâmetros médios (92,23 e 85,89 µm). Condutos mais numerosos e estreitos oferecem maior resistência à propagação de bolhas de ar (cavitação) e garantem redundância ao sistema, caso um vaso sofra embolia, o impacto na condutividade total é minimizado (Lachenbruch & McCulloh, 2014). Sob a perspectiva tecnológica, essa configuração reduz a proporção de espaços vazios (lumes), o que pode favorecer em maiores valores de densidade da madeira (Monteiro et al., 2026).

No extremo oposto do espectro funcional, o jacarandá-da-bahia (*D. nigra*) e a boleira (*J. princeps*) exibiram vasos de grandes dimensões (158,15 e 147,74 µm) e baixas frequências (inferiores a 5 vasos/mm²). Essa organização anatômica privilegia a eficiência na condução, visto que a capacidade de transporte de fluidos é extremamente sensível ao aumento do diâmetro dos condutos (Zanne et al., 2010). No entanto, elementos vasculares de maior calibre podem aumentar a vulnerabilidade estrutural do lenho, tornando a madeira mais propensa a defeitos de secagem, como colapso celular e empenamento, devido à fragilidade dos grandes lumes sob tensão (Moya et al., 2012).

Por fim, o jequitibá-rosa (*C. legalis*) posicionou-se em uma estratégia intermediária (8,55 vasos/mm² e 119,87 µm). Essa configuração sugere um equilíbrio funcional que busca conciliar a capacidade de transporte hídrico com a manutenção da integridade mecânica (Lachenbruch & McCulloh, 2014). Em termos de processamento, espécies com vasos maiores tendem a apresentar maior permeabilidade, facilitando a movimentação de água e a impregnação de produtos preservativos, embora exijam maior rigor técnico para evitar defeitos estruturais severos (Leggate et al., 2019; Moya et al., 2012).

De modo geral, as diferenças observadas na frequência e no diâmetro dos vasos evidenciam estratégias anatômicas distintas entre as espécies avaliadas, refletindo diferentes balanços entre eficiência na condução de água e segurança hidráulica. Esses resultados reforçam a importância da caracterização dos elementos de vaso como ferramenta para a compreensão da organização anatômica e do potencial comportamento tecnológico das madeiras estudadas.

4. Conclusões

A caracterização anatômica dos vasos evidenciou diferenças marcantes entre as espécies nativas da Mata Atlântica avaliadas, refletidas principalmente na relação inversa entre a frequência e o diâmetro dos elementos vasculares. O ipê-felpudo (*Z. tuberculosa*) e o jenipapo (*G. americana*) apresentaram vasos menores e mais numerosos, enquanto o jacarandá-da-bahia (*D. nigra*) e a boleira (*J. princeps*) apresentaram vasos maiores e menos frequentes, indicando diferentes estratégias anatômicas relacionadas ao equilíbrio entre eficiência e segurança hidráulica. O jequitibá-rosa (*C. legalis*) apresentou comportamento intermediário entre esses dois padrões.

Os resultados obtidos ampliam o conhecimento sobre a anatomia da madeira de espécies nativas provenientes de reflorestamentos comerciais e fornecem informações que podem subsidiar estudos futuros voltados à relação entre a estrutura anatômica, as propriedades físico-mecânicas e o potencial de utilização tecnológica dessas madeiras.

5. Agradecimentos

Agradeço a EMBRAPII (Empresa Brasileira de Pesquisa e Inovação Industrial) pela oportunidade e a empresa Symbiosis Investimentos e Participações S.A. pelo fornecimento das amostras analisadas.

6. Referências bibliográficas

Carlquist, S. (2001). *Comparative wood anatomy: Systematic, ecological, and evolutionary aspects of dicotyledon wood*. Springer-Verlag.

Castro, M. C. M., Fernandes, A. A., Barbosa, A. V. X., Costa, L. G., Mafra, E. de S., & Brocco, V. F. (2023). Propriedades tecnológicas das madeiras de *Diplotropis purpurea* (Rich.) Amshoff e *Andira parviflora* Ducke. *Revista Delos, 16*(47), 2782–2801. https://doi.org/10.55905/rdelosv16.n47-016

Crouzeilles, R., Ferreira, M. S., Chazdon, R. L., Lindenmayer, D. B., Sansevero, J. B. B., Monteiro, L., Iribarrem, A., Latawiec, A. E., & Strassburg, B. B. N. (2017). Ecological restoration success is higher for natural regeneration than for active restoration in tropical systems. *Science Advances, 3*(11), e1701345. https://doi.org/10.1126/sciadv.1701345

Figueirôa, J. M., Pareyn, F. G. C., Drumond, M., & Araújo, E. L. (2005). Madeireiras. In *Espécies da flora nordestina de importância econômica potencial* (pp. 101–133). Associação Plantas do Nordeste.

Hoffmann, W. R., Campos, C. M., Pereira, B. L. C., & Oliveira, A. C. (2026). Properties of *Eucalyptus* clonal wood from a tropical region for application in civil construction. *Discover Civil Engineering, 3*, Article 77. https://doi.org/10.1007/s44290-026-00469-z

Hoffmann, W. R., Campos, C. M., Stragliotto, M. C., Oliveira, A. C., & Pereira, B. L. C. (2025). Macroscopic anatomy as a strategy for recognizing commercial wood from the Brazilian Amazon. *BioResources, 20*(4), 10300–10327. https://doi.org/10.15376/biores.20.4.10300-10327

IAWA Committee. (1989). IAWA list of microscopic features for hardwood identification. *IAWA Bulletin, 10*(3), 219–332.

Junqueira, A. A. (2018). *Potencial madeireiro de espécies nativas utilizadas em restauração ecológica* (Dissertação de mestrado). Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro.

Lachenbruch, B., & McCulloh, K. A. (2014). Traits, properties, and performance: How woody plants combine hydraulic and mechanical functions in a cell, tissue, or whole plant. *New Phytologist, 204*(3), 747–764. https://doi.org/10.1111/nph.13035

Leggate, W., Redman, A., Wood, J., Bailleres, H., & Lee, D. J. (2019). Radial permeability of the hybrid pine (*Pinus elliottii* × *Pinus caribaea*) in Australia. *BioResources, 14*(2), 4358–4372. https://doi.org/10.15376/biores.14.2.4358-4372

Monteiro, R. de O., Dória, L. C., Ribeiro, E. S., Gonçalez, J. C., & Sonsin-Oliveira, J. (2026). Wood anatomy and its effects on physical properties in nineteen commercial species. *Brazilian Journal of Botany, 49*, Article 13. https://doi.org/10.1007/s40415-026-01136-4

Moya, R., Tenorio, C., & Meyer, Í. (2012). Influence of wood anatomy on moisture content, shrinkage and drying defects in *Vochysia guatemalensis* Donn Sm. *Scientia Forestalis, 40*(94), 249–258.

Nascimento, M. B. F. (2013). *Anéis de crescimento, incremento em circunferência do tronco e anatomia da madeira de espécies arbóreas da Floresta Estacional Semidecidual do sul do Brasil* (Dissertação de mestrado). Universidade Estadual de Londrina.

Nicholls, J. W. P., & Dadswell, H. E. (1962). *Tracheid length in Pinus radiata D. Don*. Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization.

Rodrigues, R. R., Lima, R. A. F., Gandolfi, S., & Nave, A. G. (2009). On the restoration of high diversity forests: 30 years of experience in the Brazilian Atlantic Forest. *Biological Conservation, 142*(6), 1242–1251. https://doi.org/10.1016/j.biocon.2008.12.008

Souza, R. S., Gonçalez, J. C., Ribeiro, E. S., & Gontijo, A. B. (2019). Características anatômicas de *Tectona grandis* L.f. de sítios distintos do estado do Mato Grosso. *Ciência Florestal, 29*(4), 1528–1537. https://doi.org/10.5902/1980509834563

Zanne, A. E., Westoby, M., Falster, D. S., Ackerly, D. D., Loarie, S. R., Arnold, S. E. J., & Coomes, D. A. (2010). Angiosperm wood structure: Global patterns in vessel anatomy and their relation to wood density and potential conductivity. *American Journal of Botany, 97*(2), 207–215. https://doi.org/10.3732/ajb.0900178

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Variação axial da densidade básica em clones de *Eucalyptus* spp. para produção de carvão vegetal

Beatriz Santos Neves[1]; Yasmin Araújo dos Santos[1]; Karolayne Oliveira da Silva[1]; Maria Eduarda Silva Pereira[1]; Amanda Carvalho de Melo[1]; Lidiane Pereira Ferreira[1]; Luiz Fernandes Silva Dionisio[2]; Luiz Eduardo de Lima Melo[1]

[1] Universidade do Estado do Pará, Campus VIII, Centro de Ciências Naturais e Tecnologia, Xiloteca Joaquim Ivanir Gomes (JIGw)
[2] Universidade do Estado do Pará, Campus XX, Centro de Ciências Naturais e Tecnologia

Resumo: A densidade básica é propriedade-chave na avaliação da madeira para carvão vegetal, variando significativamente ao longo do fuste. Objetivou-se avaliar a variação axial da densidade básica da madeira de clones comerciais de *Eucalyptus* spp. cultivados no norte do Tocantins, visando subsidiar a seleção de materiais genéticos para produção de carvão vegetal. Em blocos casualizados, com duas árvores por clone, coletaram-se amostras na base, meio e topo do fuste, determinando-se a densidade básica pelo método de saturação em água, com dados analisados em esquema fatorial 6×3 e médias comparadas pelo teste de Tukey (5%). A densidade básica média variou de 0,489 a 0,531 g cm^{-3}, com maior valor no clone CL-742. Os clones CL-057, CL-085 e CL-742 apresentaram maior densidade na base; 1250, CL-167 e CL-407 mostraram distribuição uniforme entre posições. A variação axial se configura, assim, como um critério complementar relevante na seleção de materiais genéticos para produção de carvão vegetal.

Palavras-chave: Seleção Clonal; Homogeneidade; Material Genético.

Axial Variation of Basic Wood Density in *Eucalyptus* spp. Clones for Charcoal Production

Abstract: Basic density is a key property in the evaluation of wood for charcoal production, varying significantly along the stem. This study aimed to evaluate the axial variation of wood basic density in commercial *Eucalyptus* spp. clones grown in northern Tocantins, aiming to support the selection of genetic materials for charcoal production. In a randomized block design, with two trees per clone, samples were collected at the base, middle, and top of the stem, with basic density determined by the water saturation method, and data analyzed in a 6×3 factorial scheme with means compared by Tukey's test (5%). Mean basic density ranged from 0.489 to 0.531 g cm^{-3}, with the highest value observed in clone CL-742. Clones CL-057, CL-085, and CL-742 showed higher density at the base; 1250, CL-167, and CL-407 showed uniform distribution among positions. Axial variation is thus established as a relevant complementary criterion in the selection of genetic materials for charcoal production.

Keywords: Clonal Selection; Homogeneity; Genetic Material.

1. Introdução

O Brasil encontra-se entre os maiores produtores mundiais de carvão vegetal, com cerca de 6,6 milhões de toneladas anuais destinadas principalmente ao mercado interno (IBA, 2025). Nesse contexto, o gênero *Eucalyptus* sp. assume destaque na produção de carvão vegetal, sendo amplamente empregado devido ao rápido crescimento, formação de copa vigorosa, madeira densa, expressiva habilidade de rebrota e biomassa versátil, com qualidade para diferentes usos (Magalhães *et al*., 2020).

O direcionamento da madeira para diferentes usos é condicionado pelo conjunto de suas características e propriedades, que definem diretamente sua qualidade (Boschetti, Vidaurre & Silva 2020). No setor energético, a densidade básica figura entre as principais propriedades avaliadas, por estar associada a diversos atributos físico-mecânicos e energéticos da madeira, além de apresentar a vantagem de ser facilmente determinada tanto em laboratório quanto em campo (Santos *et al*., 2023; Lima *et al*., 2020).

A variabilidade da madeira decorre de múltiplos fatores, como o material genético, as condições climáticas, o tipo de solo, o espaçamento entre plantas e as práticas de manejo silvicultural, que influenciam a atividade cambial responsável pela formação celular (Boschetti, Vidaurre & Silva, 2020). Como as demais propriedades da madeira, a densidade apresenta variações em função de diferentes fatores, internos e externos à árvore, podendo variar entre espécies distintas, entre indivíduos de uma mesma espécie, entre clones de um mesmo material genético e até mesmo em diferentes posições dentro de uma única árvore (Lima *et al*., 2020). A variação axial ao longo da altura do fuste é um bom exemplo da heterogeneidade natural dessa propriedade. No gênero *Eucalyptus* spp., amplamente utilizado na produção de carvão vegetal, essa variabilidade é acentuada pelo rápido crescimento, podendo impactar diretamente o uso industrial e a qualidade do produto final (Melo *et al*., 2016; Lima *et al*., 2011 *apud* Custodio *et al*., 2020).

Nesse sentido, segundo Boschetti, Vidaurre e Silva (2020), os estudos sobre a variação axial da densidade básica voltados à seleção de clones apresentam elevada complexidade, uma vez que exigem o controle de múltiplas variáveis para alcançar resultados consistentes e produtivos, capazes de garantir maior homogeneidade no material genético. Dessa forma, torna-se fundamental investigar esse aspecto, considerando que a seleção de clones mais estáveis nesse atributo pode representar ganhos significativos para a indústria energética, ao garantir maior previsibilidade, eficiência e produtividade na produção de carvão vegetal.

Diante do exposto, objetivou-se avaliar a variação axial da densidade básica da madeira de clones comerciais de *Eucalyptus* spp. cultivados em plantios comerciais no norte do

Tocantins, visando fornecer subsídios para a seleção de materiais genéticos para a produção de carvão vegetal.

2. Material e métodos

2.1 Amostragem

O estudo foi conduzido com madeira de seis clones comerciais do gênero *Eucalyptus* spp., com nove anos de idade, provenientes de plantios comerciais da empresa Siderúrgica Norte Brasil S.A. (SINOBRAS), localizada no município de Marabá, Pará, Brasil. Os clones são provenientes de plantio comercial na Fazenda Santa Lúcia, no município de São Bento do Tocantins, Tocantins. A área pertence ao Bioma Cerrado, com clima úmido tropical, em espaçamento 3,50 x 3,50 m, sobre Neossolo Quartzarênico Órtico, Latossolo Vermelho Distrófico e Plintossolo Pétrico Concrecionário.

Os seis clones avaliados, seus respectivos materiais genéticos e as variáveis dendrométricas (DAP e altura média) estão descritos na Tabela 1.

Tabela 1 – Material genético, diâmetro à altura do peito (DAP) médio e altura média dos clones de *Eucalyptus* spp. avaliados aos nove anos de idade

Clone	Material genético	DAP (cm)	Altura (m)
CL-057	*Eucalyptus urophylla*	11,06	18,20
CL-085	*Eucalyptus urophylla*	14,24	25,90
CL-167	*Eucalyptus pellita*	12,01	21,76
1250	*Eucalyptus urophylla x Eucalyptus grandis*	14,11	22,66
CL-742	*Eucalyptus pellita*	12,35	18,43
CL-407	*Eucalyptus platyphylla*	13,40	21,70

Para a amostragem da madeira, foram selecionadas duas árvores-amostra por clone, totalizando doze árvores-amostra distribuídas entre os seis clones avaliados. As árvores foram abatidas e, ao longo do fuste, foram retirados discos com aproximadamente 5 cm de espessura, correspondentes às posições axiais de 0%, 50% e 100% da altura comercial de cada indivíduo (base, meio e topo, respectivamente), totalizando três discos por árvore. Ao todo, foram obtidos 36 discos, dos quais foram extraídas duas cunhas opostas para a determinação da densidade básica da madeira.

2.2 Densidade Básica

A determinação da densidade básica da madeira foi realizada em conformidade com as diretrizes da norma NBR 11941 (ABNT, 2003). Para a determinação do volume saturado, as cunhas foram submetidas à saturação em água por um período de sete dias. Em seguida, o volume saturado foi determinado pelo método de imersão. Posteriormente, as amostras foram transferidas para uma estufa com circulação forçada de ar à temperatura de 103 ± 2 °C, onde permaneceram até atingirem massa constante (massa seca). A densidade básica da madeira foi calculada por meio da razão entre a massa seca e o volume saturado das amostras.

2.3 Análises Estatísticas

Os dados foram submetidos à Análise de Variância (ANOVA) em esquema fatorial 6 × 3 (clones × posições longitudinais), avaliando-se os efeitos principais e a interação entre os fatores. Nos casos em que foi detectada significância estatística, as médias foram comparadas pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro. As análises estatísticas e os ensaios laboratoriais foram realizados no Laboratório de Ciência e Tecnologia da Madeira da Universidade do Estado do Pará (LCTM/UEPA).

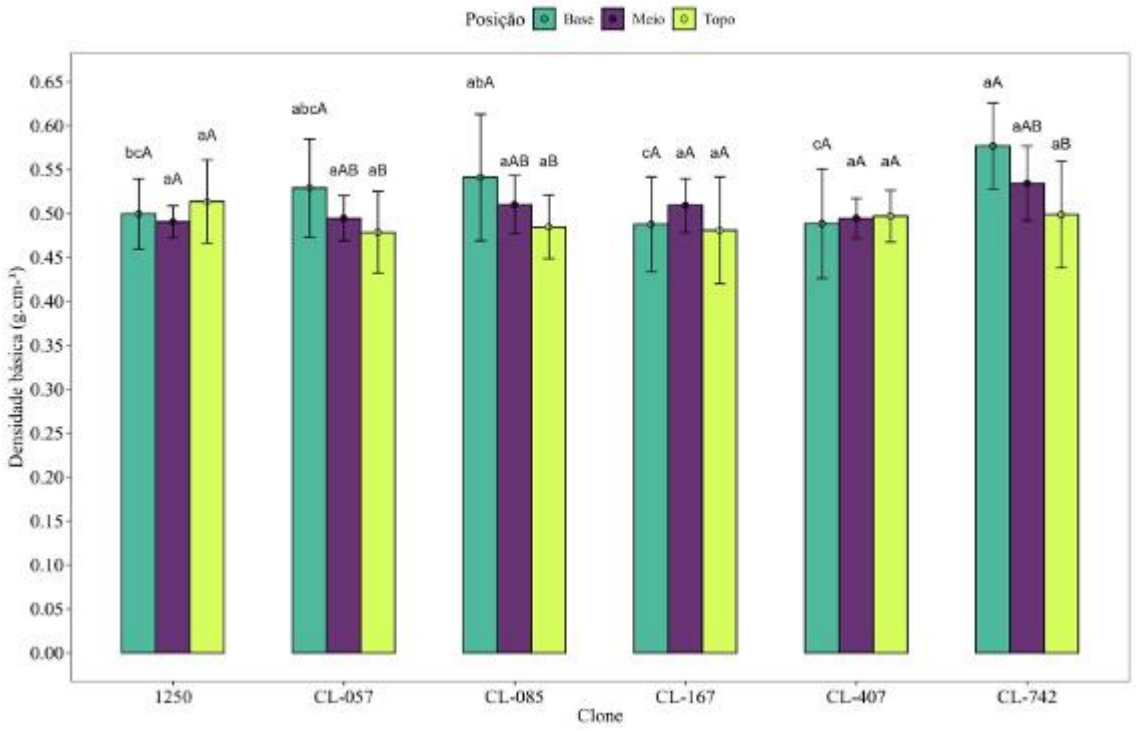
3. Resultados e Discussão

A Tabela 2 apresenta a densidade básica média dos clones de *Eucalyptus* spp. Os valores médios da densidade básica variaram entre 0,489 e 0,531 g cm^{-3}, sendo observada a maior média para o clone CL-742 (0,531 ± 0,062 g cm^{-3}) e a menor para o clone CL-167 (0,489 ± 0,053 g cm^{-3}).

Tabela 2 – Média e desvio padrão da densidade básica dos clones de eucalipto

Clone	Densidade básica média (g cm^{-3})	Desvio Padrão
CL-742	0,531	0,062
CL-085	0,511	0,056
1250	0,504	0,040
CL-057	0,498	0,049
CL-407	0,493	0,041
CL-167	0,489	0,053

A distribuição da densidade básica da madeira em função dos clones e das posições axiais do fuste é apresentada na Figura 1. Observou-se que a densidade básica ao longo do fuste variou entre os materiais genéticos avaliados. Os clones CL-057, CL-085 e CL-742 apresentaram diferenças significativas entre as posições axiais, caracterizadas por maiores valores de densidade básica na base em relação ao topo do fuste, enquanto a posição intermediária não diferiu estatisticamente das demais. Por outro lado, os clones 1250, CL-167 e CL-407 não apresentaram diferenças significativas entre as posições base, meio e topo, evidenciando distribuição mais uniforme da densidade básica ao longo do tronco.



Fonte: Autora, 2026.

Figura 1 – Densidade básica da madeira dos clones de *Eucalyptus* spp. nas posições base, meio e topo do fuste. Barras representam a média ± desvio padrão. Letras maiúsculas distintas indicam diferença significativa entre posições dentro do mesmo clone e letras minúsculas distintas indicam diferença significativa entre clones dentro da mesma posição, pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$).

Na comparação entre clones dentro de cada posição axial, verificou-se diferença expressiva apenas na posição da base. Nessa região, o clone CL-742 apresentou os maiores valores médios de densidade básica, enquanto os clones CL-167 e CL-407 apresentaram os menores valores. Os demais clones apresentaram comportamento

intermediário, compartilhando grupos estatísticos com pelo menos um dos extremos. Nas posições de meio e topo, não foram observadas diferenças significativas entre os clones, indicando comportamento semelhante da densidade básica nessas regiões do fuste.

Os resultados obtidos corroboram com evidências anteriores da distribuição longitudinal da densidade básica, que pode variar entre diferentes materiais genéticos de *Eucalyptus* spp., refletindo a influência das características genéticas sobre essa propriedade (Boschetti, Vidaurre & Silva, 2020). Embora seja comum observar maiores valores de densidade na base do fuste e redução em direção à copa, esse comportamento foi observado apenas nos clones CL-057, CL-085 e CL-742, enquanto os demais apresentaram distribuição mais uniforme ao longo do tronco, resposta esta esperada, segundo Maidana *et al*. (2022), uma vez que a densidade básica pode apresentar elevada estabilidade e ser predominantemente determinada pelo genótipo, especialmente sob condições de crescimento semelhantes. Esse comportamento é corroborado por Melo *et al*. (2016), que destacam a ocorrência de diferenças expressivas nas propriedades da madeira entre clones de *Eucalyptus* spp., mesmo quando provenientes de propagação clonal.

Do ponto de vista tecnológico, essas diferenças refletem-se diretamente na destinação industrial da madeira. A maior uniformidade da densidade básica ao longo do fuste, observada nos clones 1250, CL-167 e CL-407, favorece a obtenção de matéria-prima mais homogênea para a produção de carvão vegetal, proporcionando maior previsibilidade e eficiência ao processo produtivo (Boschetti, Vidaurre & Silva, 2020; Lima *et al*., 2020). Em contrapartida, o clone CL-742 destacou-se pela maior densidade básica média, atributo de interesse para aplicações energéticas, uma vez que madeiras com maior densidade podem apresentar maior quantidade de massa por unidade de volume, característica desejável para a produção de bioenergia (Magalhães *et al*., 2020). Esses resultados demonstram que a densidade básica deve ser avaliada em conjunto com sua distribuição ao longo do fuste, uma vez que materiais mais homogêneos tendem a ser mais adequados à carbonização. Além disso, por se tratar de plantios comerciais localizados no norte do Tocantins, em área de transição entre Cerrado e Amazônia e inserida no contexto da Amazônia Legal, esses resultados preenchem uma lacuna de informações tecnológicas sobre materiais genéticos de *Eucalyptus* cultivados sob essas condições edafoclimáticas, ainda pouco documentadas na literatura, e reforçam a relevância da caracterização da densidade básica como ferramenta de apoio à cadeia produtiva regional de carvão vegetal.

4. Conclusões

Os clones comerciais de *Eucalyptus* spp. estudados diferiram quanto à variação axial da densidade básica da madeira, evidenciando a influência do material genético sobre essa propriedade. A uniformidade da densidade básica ao longo do fuste mostrou-se um critério complementar que pode subsidiar a seleção de materiais genéticos destinados à produção de carvão vegetal, por favorecer a obtenção de matéria-prima mais homogênea para o processo de carbonização. Os resultados também ampliam o conhecimento sobre o comportamento tecnológico de clones comerciais cultivados no norte do Tocantins, fornecendo informações que podem subsidiar programas de melhoramento genético e a avaliação de materiais genéticos para cultivo na região.

5. Agradecimentos

Os autores agradecem à Siderúrgica Norte Brasil S.A. (SINOBRAS) pela disponibilização do material genético utilizado neste estudo. Agradecem, ainda, ao Programa de Pós-Graduação em Tecnologia, Recursos Naturais e Sustentabilidade na Amazônia da Universidade do Estado do Pará pelo suporte institucional à realização desta pesquisa. Este trabalho recebeu apoio financeiro da chamada pública MCTI/FINEP/FNDCT/Identidade Brasil – Recuperação e Preservação de Acervos 2024 (Ref. 3103/24), projeto nº 5827, convênio nº 0125.0186.00.

6. Referências bibliográficas

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 11941: Madeira - determinação da densidade básica*. Rio de Janeiro, 2003. 6 p.

Boschetti, W. T. N., Vidaurre, G. B., & da Silva, J. G. M. (2020). Densidade e sua variação na madeira de eucalipto. Em Vidaurre, G. B., Silva, J. G. M. da, Moulin, J. C., & Carneiro, A. de C. O. (Ed.), *Qualidade da madeira de eucalipto proveniente de plantações no Brasil*. (pp. 132-170). Editora Universitária.

Custodio, M. C., Tomazello-Filho, M., Carneiro, M. E. B., & Nisgoski, S. (2020). Axial and radial evaluation of the basic density and fiber dimensions of *Guazuma crinita* Martius wood. *Floresta*, *50*(2), 1143-1150. https://doi.org/10.5380/rf.v50i2.58356

Indústria Brasileira de árvores. (2025). *Relatório Anual Ibá 2025*. https://iba.org/publicacoes/relatorios.

Lima, M. D. R., Barros Junior, U. O., Assis, M. R., Melo, I. C. N. A., Figueiredo, I. C. R., Protásio, T. P., & Trugilho, P. F. (2020). Variabilidade das densidades básica e

energética e estoque de carbono na madeira no fuste de clones de *Eucalyptus*. *Scientia Forestalis, 48*(128), 1-17. https://doi.org/10.18671/scifor.v48n128.04

Magalhães, L. G. S., de Lima, A. P. L., de Lima, S. F., Soratto, D. N., Martins, S. M., & Santos, I. F. F. (2020). Densidade básica da madeira de clones de eucalipto em diferentes espaçamentos. *Brazilian Journal of Development, 6*(4), 19435-19445. https://doi.org/10.34117/bjdv6n4-202

Maidana, D. P. F. de L., da Silva, J. R., Ribas, A. C. de A., & Scremin-Dias, E. (2022). Clones de eucalipto de seis anos mantêm uniformidade no crescimento e na qualidade da madeira em diferentes solos? *Plant Soil, 471*, 261-272. https://doi.org/10.1007/s11104-021-05216-0

Melo, L. E. de L., Silva, J. R. M. da., Napoli, A., Lima, J. T., Trugilho, P. F., & Nascimento, D. F. R. (2016). Influence of genetic material and radial position on the anatomical structure and basic density of wood from *Eucalyptus* spp. and *Corymbia citriodora*. *Scientia Forestalis, 44*(111), 611-621. https://doi.org/10.53661/1806-9088202448263634

Santos, M. E. C., de Melo, R.R., Correia, D., de Sousa, J.A., Santos, A. M., da Silva, A.K.V., Paula, E. A., Rusch, F., Mascarenhas, A. R. P., Pimenta, A. S., & Stangerlin, D. M. (2023). Variação na densidade básica de madeiras produzidas na região semiárida brasileira submetida a diferentes regimes de irrigação. *Forests. 14*(11), 2168. https://doi.org/10.3390/f14112168

Variação da densidade básica da madeira de *Ochroma pyramidale* em plantio de restauração na Amazônia

Daniellen Pessoa Monteiro[1]; Daniel Andrade Santiago[1]; Caroline Moura Vasconcelos[1]; Francisco Tarcísio Moraes Mady[1]; Álefe Lopes Viana[2]; Narrúbia de Oliveira Almeida[1]; Guilherme Silva Modolo[1]

[1]Universidade Federal do Amazonas - UFAM.
[2] Instituto Federal do Amazonas - IFAM.

Resumo: *Ochroma pyramidale* é uma espécie de rápido crescimento com potencial para produção madeireira em plantios de restauração florestal. Este estudo avaliou a influência do diâmetro à altura do peito (DAP) na densidade básica da madeira, bem como sua variação longitudinal e radial ao longo do tronco. Foram amostradas 20 árvores em um experimento de restauração na Amazônia Central, e os dados foram analisados por modelos lineares generalizados e mistos. Árvores com maior DAP apresentaram menor densidade básica e maior heterogeneidade da madeira. A densidade básica aumentou da base para o topo do tronco e da medula para a casca, sendo a variação radial mais pronunciada que a longitudinal. Os resultados demonstram que maior crescimento não implica, necessariamente, melhor qualidade da madeira, fornecendo subsídios para o manejo de plantios de restauração voltados à produção madeireira.

Palavras-chave: Tecnologia madeira; Bioeconomia; Restauração ecológica produtiva.

Variation in wood basic density of *Ochroma pyramidale* in an amazonian restoration plantation

Abstract: *Ochroma pyramidale* is a fast-growing species with potential for timber production in forest restoration. This study evaluated the influence of diameter at breast height (DBH) on wood basic density and its longitudinal and radial variation along the stem. Twenty trees were sampled from a restoration experiment in the Central Amazon, and the data were analyzed using generalized linear and mixed-effects models. Trees with larger DBH showed lower basic wood density and greater wood heterogeneity. Basic density increased from the stem base to the top and from the pith to the bark, with radial variation being more pronounced than longitudinal variation. These findings indicate that rapid tree growth does not necessarily result in higher wood quality and provide information to support silvicultural strategies for timber-oriented restoration plantations.

Keywords: Wood technology; Bioeconomy; Productive ecological restoration.

1. Introdução

A floresta Amazônica desempenha papel fundamental na provisão de serviços ecossistêmicos, contribuindo para a mitigação dos efeitos da mudança do clima (Fearnside, 2021). Entretanto, o avanço do desmatamento compromete esses serviços, destacando a restauração florestal como uma atividade essencial para o bem-estar social. A utilização de espécies com potencial econômico em plantios de restauração é importante para estimular essa atividade, aumentando a viabilidade financeira e possibilitando a geração de renda (Krainovic et al., 2023).

Ochroma pyramidale (Cav. ex Lam.) Urb., é uma espécie que se destaca pelo seu potencial econômico e desempenho em plantios de restauração. Conhecida como “pau-de-balsa”, trata-se de uma espécie pioneira de rápido crescimento amplamente utilizada em programas de recuperação de áreas degradadas na Amazônia (Carvalho, 2010). Possui madeira de baixa densidade, fácil trabalhabilidade e ampla aplicação industrial, sendo utilizada em artesanato, aeromodelismo, papel e celulose, entre outros produtos (Weirich, 2008).

As propriedades da madeira podem variar em função das condições de crescimento das árvores, uma vez que a formação das células do xilema acompanha o ritmo de crescimento. Em geral, maiores taxas de crescimento tendem a resultar na formação de células de maiores dimensões e, em alguns casos, com menor proporção de parede celular, o que pode reduzir a densidade da madeira (Shmulsky; Jones, 2019). Considerando a diversidade de arranjos de plantio e as diferentes condições edáficas encontradas em áreas de restauração florestal, torna-se importante investigar as propriedades da madeira de espécies comerciais utilizadas nesses sistemas.

A densidade da madeira é uma das principais propriedades tecnológicas do lenho. Além de variar entre árvores submetidas a diferentes condições de crescimento, essa propriedade também apresenta variação dentro do próprio tronco. Essa variação pode ocorrer tanto no sentido longitudinal (base–topo) quanto no radial (medula–casca), em decorrência das diferenças na idade e no grau de maturação do lenho, que se refletem em características anatômicas da madeira, como a espessura das paredes celulares, o diâmetro dos vasos e a proporção dos diferentes tipos celulares (Tomazello-Filho, 1985; Rios et al., 2018). Nesse contexto, analisar a densidade da madeira e compreender seus padrões de variação em árvores cultivadas em plantios de restauração é fundamental para orientar seu aproveitamento tecnológico e sua destinação mais adequada.

Neste estudo, utilizamos árvores de *O. pyramidale* oriundas de um experimento de restauração florestal com os seguintes objetivos: (1) analisar se a densidade básica da madeira varia em função do diâmetro à altura do peito (DAP) das árvores; (2) investigar a variação da densidade básica da madeira ao longo do tronco, no sentido longitudinal (base–topo); (3) analisar a variação da densidade básica da madeira no sentido radial (medula–casca); e (4) verificar se a magnitude das variações longitudinal e radial da densidade básica da madeira depende do DAP das árvores.

2. Material e métodos

2.1. Área de coleta

As árvores foram coletadas em um experimento de restauração florestal localizado na Fazenda Experimental da Universidade Federal do Amazonas (FAEXP/UFAM), Manaus, Amazonas. O clima da região é classificado como Af, segundo Köppen, caracterizando-se como tropical úmido, com temperaturas elevadas e elevada precipitação pluviométrica durante todo o ano (Alvares et al., 2013). O experimento foi implantado em 2018 em delineamento de blocos casualizados, com duas repetições. Os tratamentos consistiram em quatro arranjos de espaçamento (4 × 3 m, 3 × 3 m, 3 × 2 m e 2 × 2 m), avaliados em três espécies pioneiras nativas (*Ochroma pyramidale*, *Inga edulis* e *Trema micrantha*). Em cada bloco, cada espécie foi plantada em quatro parcelas monoespecíficas, correspondentes aos quatro arranjos de espaçamento avaliados. No momento do plantio, cada parcela continha 25 indivíduos.

2.2. Amostragem

Foram selecionadas 20 árvores de *O. pyramidale* representativas da distribuição diamétrica da espécie no povoamento. A coleta foi realizada seis anos após o plantio (2024). As árvores foram derrubadas com motosserra, e o diâmetro à altura do peito (DAP) e a altura total foram mensurados. O DAP das árvores variou de 8,8 a 23,9 cm, enquanto a altura total variou de 8,2 a 20,0 m. Em seguida, foram coletados discos de madeira nas posições correspondentes a 0%, 25%, 50%, 75% e 100% da altura comercial, além de um disco adicional na altura do DAP, totalizando 120 discos (Figura 1).

2.3. Ensaio de densidade básica da madeira

Para avaliar a variação longitudinal da densidade básica, foram retiradas cunhas radiais dos discos coletados nas cinco posições relativas da altura comercial (0%, 25%, 50%, 75% e 100%). Para a análise da variação radial, utilizaram-se os discos coletados na altura do DAP, dos quais foram confeccionados três corpos de prova distribuídos no sentido medula–casca. A largura dos corpos de prova foi definida pela divisão do comprimento do raio em três segmentos de igual comprimento (Figura 1).

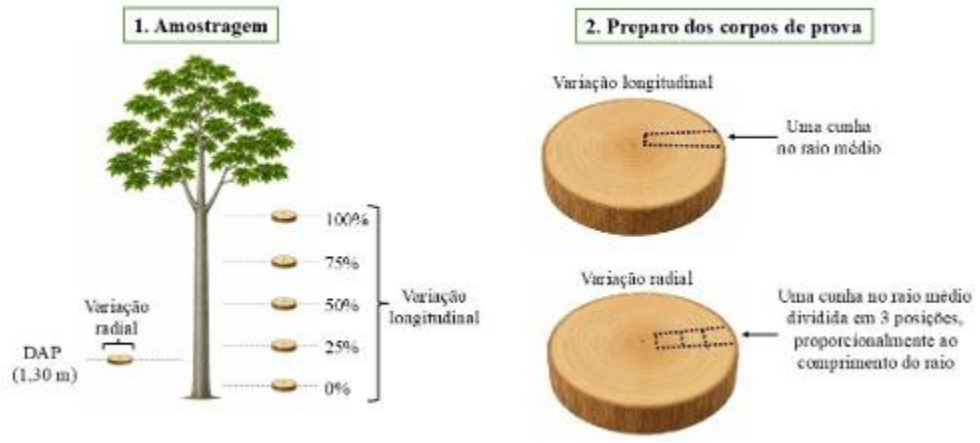


Figura 1 - Ilustração do procedimento de amostragem (1) e preparo dos corpos de prova (2).

Para determinação da densidade básica da madeira, inicialmente, os corpos de prova foram submetidos à saturação em água e posterior determinação do volume saturado pelo método de Arquimedes, com deslocamento de água. Posteriormente, as amostras foram secas em estufa a 103 ± 2 °C até a massa constante para obtenção da massa seca (Figura 2). A densidade básica da madeira foi calculada pela razão entre a massa seca em estufa e o volume saturado dos corpos de prova.



Figura 2 - Ilustração do procedimento de determinação da densidade básica da madeira.

2.4. Análise de dados

Objetivo 1: Para analisar se a densidade básica da madeira varia em função do diâmetro à altura do peito (DAP), foi ajustado um modelo linear generalizado (GLM), utilizando o DAP como variável explicativa e a densidade básica média de cada árvore como variável resposta. *Objetivo 2*: A variação longitudinal da densidade básica da madeira foi investigada por meio de um modelo linear generalizado misto (GLMM). A densidade básica da madeira foi utilizada como variável resposta, a altura relativa de amostragem como variável explicativa e a árvore

como efeito aleatório. Adicionalmente, foi realizada uma análise gráfica para visualizar a variação da densidade básica ao longo do tronco de cada árvore. *Objetivo 3*: A variação radial da densidade básica da madeira foi analisada por meio de um GLMM. A densidade básica da madeira foi utilizada como variável resposta, a posição radial (medula–casca) como variável explicativa e a árvore como efeito aleatório. *Objetivo 4*: Para verificar se a magnitude das variações longitudinal e radial da densidade básica da madeira depende do DAP das árvores, foi inicialmente calculado o coeficiente de variação (CV) da densidade básica nos sentidos longitudinal e radial para cada indivíduo. Em seguida, foram ajustados GLMs utilizando o CV longitudinal ou radial como variável resposta e o DAP como variável explicativa. Em todos os modelos, foi adotada a distribuição *Gamma* com função de ligação logarítmica. Para os modelos mistos, foram estimados os coeficientes de determinação marginal, que representam a proporção da variância explicada pelos efeitos fixos, e condicional, que representa a proporção da variância explicada pelos efeitos fixos e aleatórios. Todas as análises foram realizadas no software R versão 4.2.1 (R Core Team, 2022), utilizando o pacote *lmerTest*.

3. Resultados e discussão

3.1. Efeito do diâmetro à altura do peito na densidade básica da madeira

Foi observado um efeito significativo do diâmetro à altura do peito (DAP) na densidade básica da madeira ($p = 0,014$; $R^2 = 0,24$). À medida que o DAP aumentou, a densidade básica da madeira diminuiu (Figura 3). Árvores de maior diâmetro, que tiveram crescimento mais rápido, podem ter formado células de maiores dimensões e com paredes celulares mais delgadas (Shmulsky; Jones, 2019). Esse padrão pode ter contribuído para a redução da densidade básica da madeira. Além disso, a avaliação visual dos discos indicou que as árvores de maior diâmetro apresentavam maior proporção de lenho juvenil, o que também pode ter contribuído para a menor densidade básica média observada nos indivíduos.

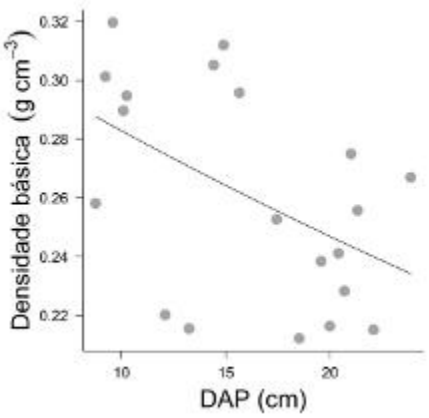


Figura 3 – Relação entre a densidade básica da madeira e o diâmetro à altura do peito (DAP) de árvores de *Ochroma pyramidale* em um plantio de restauração. Os pontos em cinza representam as árvores amostradas, e a linha representa o ajuste do modelo.

3.2. Variação longitudinal e radial da densidade da madeira

A posição longitudinal no fuste influenciou significativamente a densidade básica da madeira ($p = 0,0183$; $R^2m = 0,03$; $R^2c = 0,40$). Entretanto, a altura relativa explicou apenas uma pequena fração da variação observada (3%), enquanto a maior parte da variabilidade foi atribuída às diferenças entre árvores (37%). De modo geral, a densidade básica aumentou da base para o topo do tronco (Figura 4A). O aumento da densidade básica da madeira da base para o topo do tronco é comum em espécies de rápido crescimento, cujas árvores possuem elevadas taxas de crescimento nos primeiros anos de vida e, posteriormente, passam a formar um lenho mais denso, aumentando a estabilidade mecânica do tronco (Zhang et al., 2025). A avaliação gráfica da variação longitudinal da densidade básica da madeira em cada árvore não revelou um padrão consistente, o que explica a baixa contribuição da altura relativa para a variação da densidade básica (Figura 5).

A posição radial afetou significativamente a densidade básica da madeira ($p < 0,001$; $R^2m = 0,45$; $R^2c = 0,72$), com aumento progressivo da densidade da medula em direção à casca (Figura 4B). Esse comportamento está relacionado ao processo de formação e maturação do lenho, no qual o câmbio vascular produz inicialmente o lenho juvenil, localizado nas regiões próximas à medula. À medida que a árvore se desenvolve, passa a formar lenho maduro nas regiões mais externas do tronco (Stange et al., 2021).

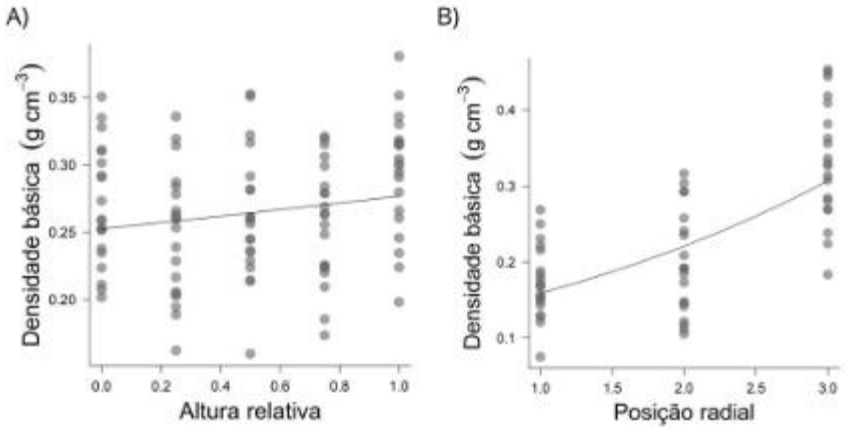


Figura 4 - Relação da densidade básica da madeira com a altura relativa (A) e a posição radial (B) de árvores de *Ochroma pyramidale* em um plantio de restauração. Os pontos em cinza representam os corpos de prova obtidos das árvores amostradas em cada posição, e a linha representa o ajuste do modelo.

3.3. Efeito do diâmetro à altura do peito na heterogeneidade do lenho

Foi observado um efeito significativo do DAP no coeficiente de variação longitudinal ($p = 0,012$; $R^2m = 0,25$) e radial ($p = 0,015$; $R^2m = 0,24$) da densidade da madeira, com um aumento dos coeficientes de variação conforme aumentou o DAP (Figuras 6A e B). Os resultados indicam que árvores de maior porte apresentam maior heterogeneidade da densidade básica da madeira ao longo do fuste e no sentido radial. Esse padrão está associado ao crescimento mais rápido, que promove diferenças estruturais durante a formação do lenho. Assim, árvores com maior DAP tendem a produzir madeira menos homogênea nas direções longitudinal e radial.

3.4. Implicações para a produção de madeira em plantios de restauração

Os resultados demonstram que árvores com crescimento produziram madeira de menor densidade básica e maior heterogeneidade. No contexto da produção madeireira em plantios de restauração, esses achados indicam que um maior crescimento não implica, necessariamente, melhor qualidade da madeira. A reduzida variação longitudinal da densidade básica sugere que a destinação das diferentes porções do tronco para a fabricação de produtos pode não depender de sua posição ao longo do fuste. Em contrapartida, a acentuada variação radial evidencia diferenças importantes nas propriedades tecnológicas da madeira entre a medula e a casca, devendo esse aspecto ser considerado na definição de seus usos.

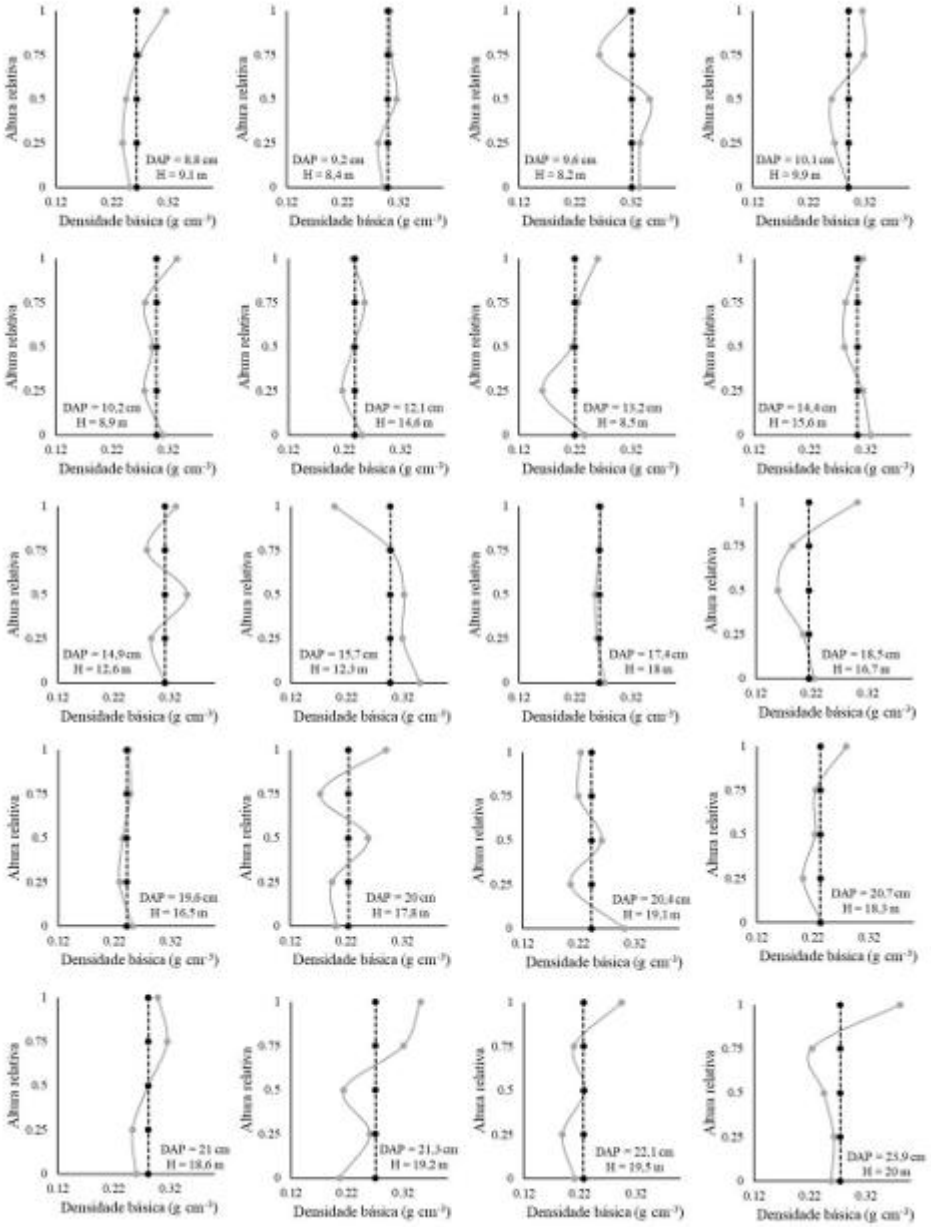


Figura 5 - Variação longitudinal da densidade básica da madeira de 20 árvores de *O. pyramidale* em plantio de restauração. As linhas e pontos na tonalidade preta representam a densidade média das árvores e as linhas e com pontos cinzas representam as densidades em cada altura relativa. Diâmetro à altura do peito (DAP) e altura total (H) de cada árvore são informados nos gráficos.

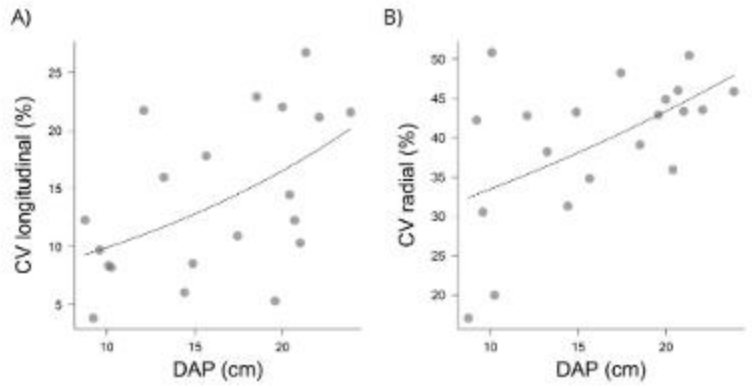


Figura 6 - Relação da densidade básica da madeira com o coeficiente de variação longitudinal (A) e radial (B) da densidade básica em árvores de *Ochroma pyramidale* em um plantio de restauração. Os pontos em cinza representam as árvores amostradas, e a linha representa o ajuste do modelo.

4. Conclusões

Árvores de *Ochroma pyramidale* com maior DAP apresentaram menor densidade básica da madeira e maior variação dessa propriedade ao longo do tronco, tanto no sentido longitudinal quanto no radial. De modo geral, a densidade básica aumentou da base para o topo e da medula para a casca, embora o gradiente longitudinal tenha sido menos pronunciado. Esses resultados ampliam o conhecimento sobre a qualidade da madeira da espécie em plantios de restauração florestal na Amazônia Central e fornecem subsídios para o desenvolvimento de estratégias de manejo que conciliem o rápido crescimento da espécie com a produção de madeira de maior qualidade tecnológica. Estudos futuros que integrem análises anatômicas, físicas e mecânicas poderão aprofundar a compreensão dos mecanismos responsáveis pelos padrões observados e de seus efeitos sobre a qualidade da madeira.

5. Agradecimentos

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Amazonas (FAPEAM), pela concessão da bolsa de Iniciação Científica. À Fazenda Experimental da Universidade Federal do Amazonas (FAEXP/UFAM), pela disponibilização da área experimental, da infraestrutura e do suporte necessário para a condução da pesquisa.

6. Referências bibliográficas

Alvares, C. A., Stape, J. L., Sentelhas, P. C., Gonçalves, J. L. M., & Sparovek, G. (2013). Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift, 22*(6), 711–728. https://doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507

Carvalho, P. E. R. (2010). *Espécies arbóreas brasileiras* (Vol. 4). Embrapa Informação Tecnológica.

Fearnside, P. M. (2021). The intrinsic value of Amazon biodiversity. *Biodiversity and Conservation, 30*, 1199–1202. https://doi.org/10.1007/s10531-021-02171-7

Krainovic, P. M., Resende, A. F., Amazonas, N. T., Almeida, C. T., Almeida, D. R. A., Silva, C. C., Andrade, H. S. F., Rodrigues, R. R., & Brancalion, P. H. S. (2023). Potential native timber production in tropical forest restoration plantations. *Perspectives in Ecology and Conservation, 21*, 294–301. https://doi.org/10.1016/j.pecon.2023.08.002

R Core Team. (2022). *R: A language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing. https://www.R-project.org/

Rios, P. D., Vieira, H. C., Pereira, G. F., Turmina, E., & Nicoletti, M. F. (2018). Variação radial e longitudinal da densidade básica da madeira de *Pinus patula* Schltdl. & Cham. *Pesquisa Florestal Brasileira, 38*, e201501016. https://doi.org/10.4336/2018.pfb.38e201501016

Shmulsky, R., & Jones, P. D. (2019). *Forest products and wood science: An introduction* (7th ed.). Wiley. https://doi.org/10.1002/9781119426400

Stange, R., Melo, R. R., Talgatti, M., Gatto, D. A., & Beltrame, R. (2021). Variation of the technological properties of wood from *Ochroma pyramidale* in the longitudinal and radial sense of the stem. *Floresta, 51*(4), 823–833. https://doi.org/10.5380/rf.v51i4.72952

Tomazello Filho, M. (1985). Variação radial da densidade básica e da estrutura anatômica da madeira de *Eucalyptus saligna* e *Eucalyptus grandis*. *Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais, 29*, 37–45.

Weirich, N. E. (2008). *Diretrizes técnicas para o cultivo do pau-de-balsa (Ochroma pyramidale) no Estado de Mato Grosso*. SEDER-MT.

Zhang, Z., Tian, D., Wang, J., He, P., Yang, X., & Jiang, L. (2025). Impacts of tree age and external morphological traits on longitudinal variation of stem wood density for mixed forests. *Forest Ecology and Management, 598*, Article 123255. https://doi.org/10.1016/j.foreco.2025.123255

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Variação e predição da densidade básica de *Eucalyptus* em diferentes sistemas silviculturais por espectroscopia NIR

Luíza Mendonça Bonfim Tavares[1]; Caio Palmeira Goulart[1]; Thalles Loiola Dias[1]; Valdenia Medeiros de Araújo[1]; Paulo Ricardo Gherardi Hein[1]

[1] Universidade Federal de Lavras (UFLA), Lavras, Minas Gerais, Brasil

Resumo: Entre os sistemas de manejo de *Eucalyptus* no Brasil, destacam-se o alto fuste e a talhadia. Porém, seus efeitos sobre a variabilidade interna da madeira ainda requerem maior compreensão. Assim, a espectroscopia no infravermelho próximo (NIRS) surge como método rápido e não destrutivo para avaliação. O objetivo foi avaliar a variação densidade básica da madeira de *Eucalyptus*, em alto fuste e talhadia, e o potencial da NIRS para sua predição. Foram avaliados 10 clones de *Eucalyptus.* Discos da base, DAP, 25% e 50% da altura foram seccionados em quatro partes, a partir de uma delas, foram obtidas 387 amostras no sentido tangencial. A densidade básica foi determinada conforme a norma ASTM D2395, e os espectros foram obtidos em espectrômetro Bruker (MPA). A densidade variou expressivamente entre e dentro das árvores, sem separação clara entre os sistemas. Os espectros e a PCA indicaram grande semelhança espectral. O modelo PLS-R apresentou predição moderada (R^2= 0,69, RMSE= 35,88 e RPD= 1,80).

Palavras-chave: Qualidade da madeira; Sistema de manejo; Quimiometria.

Variation and prediction of basic *Eucalyptus* density in different silvicultural systems using NIR spectroscopy

Abstract: Among the *Eucalyptus* management systems used in Brazil, high forest and coppice stand out. However, their effects on internal variability of wood still require further investigation. Thus, near-infrared spectroscopy (NIRS) emerges as a rapid and non-destructive method for evaluation. The objective was to evaluate the basic density variation of *Eucalyptus* wood, in high forest and coppice, and the potential of NIRS for its prediction. Ten *Eucalyptus* clones were evaluated. Discs from the base, DBH, 25%, and 50% of height, were sectioned into four parts, from one of them, 387 samples were obtained in the tangencial direction. The basic density was determined according to ASTM D2395, and the spectra were acquired using a Bruker spectrometer (MPA). The density varied markedly between and within trees, without clear separation between the systems. The spectra and PCA indicated great spectral similarity. The PLS-R model showed moderate prediction (R^2 = 0.69, RMSE = 35,88 kg m^{-3} and RPD = 1,80).

Keywords: Wood quality; Management system; Chemometrics.

1. Introdução

O gênero *Eucalyptus* tem sido a principal cultura florestal no Brasil, com aproximadamente 8,1 milhões de hectares cultivados, tornando-se o gênero florestal mais plantado em 2024 (IBÁ, 2025). Sua ampla utilização está associada ao rápido crescimento,

elevada produtividade e boa adaptação às condições edafoclimáticas brasileiras, tornando-a um gênero estratégico para a indústria de celulose e papel, produção de carvão vegetal, painéis, pisos laminados e madeira serrada (ROCHA et al., 2019).

A qualidade da madeira, entretanto, pode variar em função de fatores genéticos, ambientais e a interação entre eles. Além disso, os sistemas de manejo silvicultural podem intensificar essa variabilidade, influenciando diretamente a formação do lenho e, consequentemente, o desempenho tecnológico da matéria-prima (PIMENTA et al., 2023). Entre os sistemas mais utilizados, destacam-se o alto fuste e a talhadia. No alto fuste, a condução do povoamento ocorre a partir do plantio de mudas ou sementes, enquanto, na talhadia, a nova rotação é conduzida a partir da brotação nos tocos após o corte (SANTO, 2023).

A talhadia têm sido amplamente empregada em diversas plantações de *Eucalyptus*, podendo apresentar produtividade semelhante ou até superior quando comparadas com plantios convencionais por alto fuste (CIRILO et al., 2024). Esse desempenho pode estar associado ao aproveitamento do sistema radicular já estabelecido, à grande adaptabilidade às secas, além de grandes reduções nos insumos utilizados (HAKAMADA et al., 2022). No entanto, embora esses sistemas possam apresentar vantagens produtivas e econômicas, seus efeitos sobre a variabilidade interna da madeira ainda requerem maior compreensão.

No entanto, a qualidade da madeira não depende apenas de valores médios de suas propriedades, por se tratar de um material naturalmente heterogêneo, a avaliação meticulosa de sua variabilidade é essencial para interpretar seu comportamento. Por isso, compreender não apenas o quanto uma propriedade varia, mas também como e onde ela varia dentro da madeira é fundamental para interpretar a qualidade de forma mais completa.

Entretanto, métodos convencionais para avaliação dessas propriedades costumam ser caros e demorados, por isso a utilização de tecnologias rápidas e eficazes (MEDEIROS et al., 2024) são de grande importância, como a espectroscopia no infravermelho próximo (NIR) (TSUCHIKAWA e KOBORI, 2015). Essas técnicas vibracionais são rápidas, precisas e de mínima preparação da amostra que utiliza radiação eletromagnética na faixa de 1.000 a 2.500 nm para obter dados qualitativos e/ou quantitativos através da interação das ondas com os constituintes das amostras (PASQUINI, 2003).

Estudos recentes têm demonstrado o potencial de métodos espectroscópicos para avaliação da madeira. Cirilo et al. (2024) avaliaram dez clones de *Eucalyptus* com três anos em sistemas de alto fuste e talhadia, e observaram que propriedades como densidade básica, proporção de cerne e alburno e porcentagem de casca não apresentam diferenças

significativas entre os manejos, embora a excentricidade da medula apresentou resultados superiores no sistema de talhadia. Já Chambi-Legoas et al. (2023) avaliaram o uso de imagens hiperespectrais no infravermelho próximo (NIR-HSI) para predição de densidade e viabilidade de seleção precoce em *E. grandis* sob regimes hídricos contrastantes. Obtendo R^2= 0,740 e RMSEp= 0,048 gcm^{-3} e mapas de densidade, é viável a predição da densidade e a eficiência da seleção precoce para densidade com esse método.

Embora esses estudos evidenciam a relevância do manejo e o potencial das técnicas espectroscópicas na caracterização da madeira, ainda são necessárias abordagens que integrem clone, sistema de manejo e variações associadas a densidade. Sendo assim, o objetivo deste trabalho foi avaliar a variação densidade básica da madeira de *Eucalyptus* em sistemas de alto fuste e talhadia e o potencial da espectroscopia NIR como instrumento rápido de predição.

2. Material e métodos

Os dados utilizados neste estudo foram obtidos na área experimental do EUCFLUX, Programa Cooperativo sobre Produtividade e Fluxos de Carbono e Água em Eucalipto, desenvolvido em colaboração entre o IPEF, Instituto de Pesquisa e Estudos Florestais, e empresas do setor florestal. A área experimental está localizada na Fazenda Americana, situada no município de Itatinga, região central do estado de São Paulo, nas coordenadas 22°58'S e 48°43'W. Ao longo dos últimos 12 anos, o programa realizou avaliações abrangentes relacionadas à captura de carbono, ciclagem de nutrientes e uso da água em diferentes ciclos de plantações de eucalipto. Mais informações em Cirilo et al., (2024).

Foram avaliados dois sistemas de manejo, alto fuste e talhadia, com 10 clones de *Eucalyptus, E. grandis* × *E. urophylla, E. urophylla, E. saligna* e *E. grandis* × *E. camaldulensis*, plantados em cada sistema. As árvores foram cortadas aos seis anos, e para cada clone e sistema, foi utilizada uma árvore, totalizando 20 árvores avaliadas. De cada árvore, foram retirados discos nas posições da base, DAP, 25% e 50% da altura. Cada disco foi separado em quatro cunhas, a partir de uma das cunhas foram realizados cortes no sentido tangencial, totalizando 387 amostras, conforme apresentado na Figura 1.

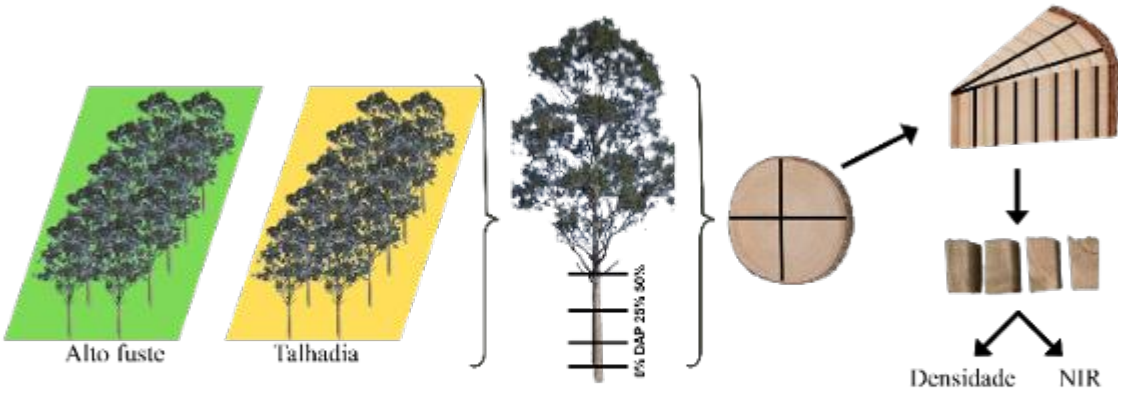


Figura 1 – Fluxograma do estudo.

A densidade básica da madeira foi determinada de acordo com a norma ASTM D2395 (ASTM Standard, 2017). A massa foi obtida em balança analítica, com precisão de 0,001 g, e o volume foi determinado pelo método de imersão.

Os espectros foram obtidos no plano transversal, em espectrômetro Bruker, modelo MPA, Bruker Optik GmbH, Ettlingen, Alemanha, utilizando o programa OPUS versão 7.5. Os espectros foram adquiridos na região do infravermelho próximo, entre 12.500 e 3.600 cm^{-1}, correspondente a 800–2780 nm, com resolução espectral de 16 cm^{-1} e 32 leituras por espécime. Para os modelos PLS, foi utilizada apenas a faixa de 9.000 a 4.000 cm^{-1}, sendo cada espectro composto por 1.300 valores de absorbância.

Como referência, foi utilizada pelo equipamento uma base com superfície banhada a ouro para a calibração da absorção da luz no infravermelho próximo. A sala onde o espectrômetro está localizado é totalmente climatizada para estabilização do teor de umidade durante a obtenção dos espectros, com temperatura em torno de 20 °C e umidade relativa do ar próxima de 60%.

Os dados espectrais foram analisados por estatística multivariada em sua forma original. O software Unscrambler versão 9.7, Camo Software, NJ, EUA, foi utilizado para a realização da análise de componentes principais, PCA, e da regressão por mínimos quadrados parciais, PLS-R. A PCA foi aplicada para analisar o agrupamento dos dados em função dos sistemas de manejo e dos clones, enquanto a PLS-R foi utilizada para o desenvolvimento dos modelos de predição da densidade básica da madeira.

A PCA e os modelos PLS-R foram avaliados por validação cruzada pelo método de full cross-validation, sendo o número de segmentos igual ao número de amostras, 387, com uma amostra por segmento, caracterizando o procedimento leave-one-out. O desempenho dos

modelos de regressão PLS-R foi avaliado por meio da raiz quadrada do erro médio, RMSE, do coeficiente de determinação, R^2, e da razão de desempenho do desvio, RPD. O RPD foi obtido pela razão entre o desvio-padrão dos valores determinados em laboratório e o erro padrão da validação cruzada.

3. Resultados e discussão

3.1 Variação da densidade

A Figura 2 apresenta a variação da densidade básica da madeira das árvores de *Eucalyptus* nos dois sistemas de manejo avaliados, talhadia e alto fuste. Considerando o conjunto total de amostras, a densidade variou de 327,39 a 708,39 e média de 498,25 kg/m^3. No sistema de talhadia, os valores foram de 344,97 a 708,38 com média de 506,08 kg/m^3, enquanto, no sistema de alto fuste, a variação foi de 327,39 a 678,24 com média de 490,38 kg/m^3.

É possível observar que a densidade variou bastante dentro de uma mesma árvore, não apenas entre as árvores diferentes. Essa variação aparece pela ampla distribuição vertical dos pontos, com grande parte dos valores ocorrendo por volta de 400 até cerca de 600 kg/m^3. Quanto aos sistemas de manejo, a distribuição apresenta valores sobrepostos na mesma faixa, indicando comportamento semelhante para a densidade nos dois sistemas.

Esses resultados estão de acordo com estudos que relatam a heterogeneidade da madeira de *Eucalyptus* (GENDVILAS et., 2022; PIMENTA et al., 2023; PIMENTA et al., 2024), com variações significativas dentro de uma mesma árvore. Porém, nas condições avaliadas, o sistema de manejo não apresentou influência clara na variação da densidade, o que está de acordo com Cirilo et al., (2024), que também não observaram diferenças significativas para o mesmo material em idade anterior.

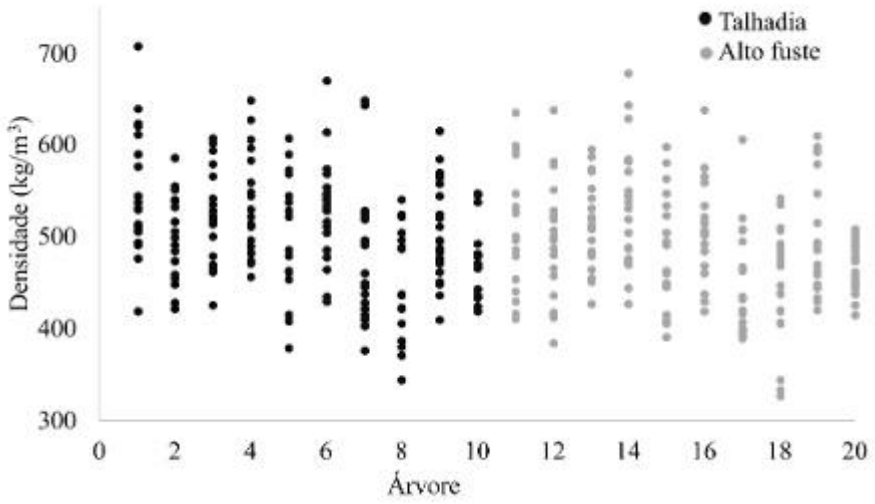


Figura 2 – Variação da densidade básica da madeira ao longo de cada árvore de *Eucalyptus* em função do sistema de manejo silvicultural.

3.2 Análise espectral e PCA

A Figura 3 apresenta os espectros originais médios de absorbância, obtidos em equipamento de bancada (A) e a PCA (B) da madeira de *Eucalyptus* nos dois sistemas de manejo.

A análise dos espectros NIR demonstrou elevada sobreposição entre as árvores independente do sistema de manejo, indicando grande semelhança espectral. Essa tendência também pode ser observada na PCA, em que a PC1 e PC2 explicaram 96% e 4% da variância, respectivamente. Da mesma forma, não apresentou agrupamento definido em função do sistema de manejo. Esse resultado vai de encontro a análise da variação da densidade básica, que também apresentou grande sobreposição dos valores, sem separação clara entre os sistemas.

Essa similaridade sugere, que nessas condições, diferenças na madeira relacionada aos manejos, podem ser sutis quando analisadas apenas com espectros originais e por métodos exploratórios. Além disso, a semelhança estrutural e química do material avaliado, por se tratarem todos do mesmo gênero, aumenta essa sobreposição, como também relatado por Soares et al. (2024).

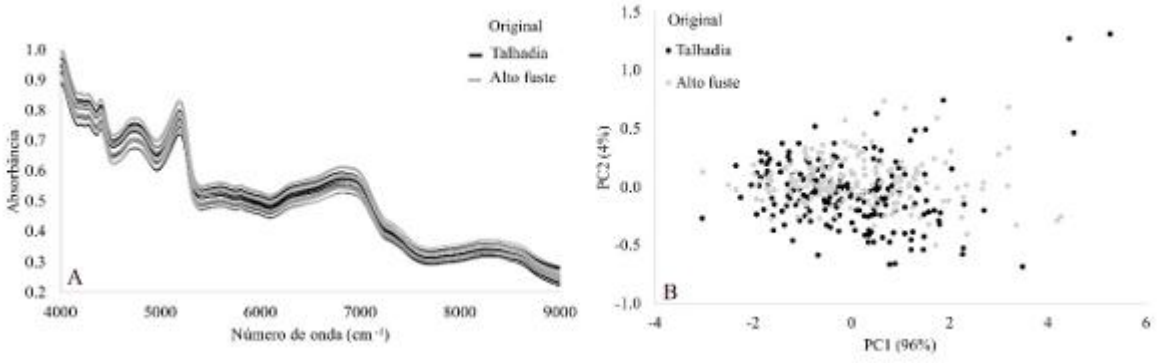


Figura 3 – Espectros originais médios de absorbância, obtidos em equipamento de bancada (A) e a PCA (B) da madeira de *Eucalyptus*, em dois sistemas de manejo, talhadia e alto fuste.

3.3 Modelos de predição da densidade básica pela PLS-R

A Figura 4 apresenta os resultados do modelo PLS-R para predição da densidade básica de diferentes árvores de *Eucalyptus*, a partir dos espectros originais, em dois sistemas de manejo. Como observado na variação da densidade, a nuvem de pontos apresenta alta dispersão, com valores indo de 300 a 700 kg/m^3, indicando que o modelo foi capaz de acompanhar a variação da densidade das amostras, porém grande parte dos valores se encontram na faixa de 400 a 550 kg/m^3.

Com o R^2, RMSE da validação cruzada e RPD atingindo 0.69, 35.88 e 1.80, respectivamente, o modelo apresentou desempenho moderado para a predição da densidade básica. Apesar de inferiores, os valores de R^2 e RMSE vão de encontro com outros modelos listados na literatura (LOUREIRO et al., 2022; MEDEIROS et al., 2024). No entanto, o baixo valor do RPD pode indicar potencial para triagem preliminar da madeira, especialmente considerando que os espectros foram utilizados sem qualquer tipo de pré-tratamento matemático.

Por fim, embora a dispersão tenha sido moderada, os resultados indicam que os espectros NIR foram capazes de capturar informações relevantes relacionadas à densidade. No entanto, não foi observado separação evidente na predição quanto ao sistema de manejo, o que vai de encontro com a sobreposição dos valores observados anteriormente.

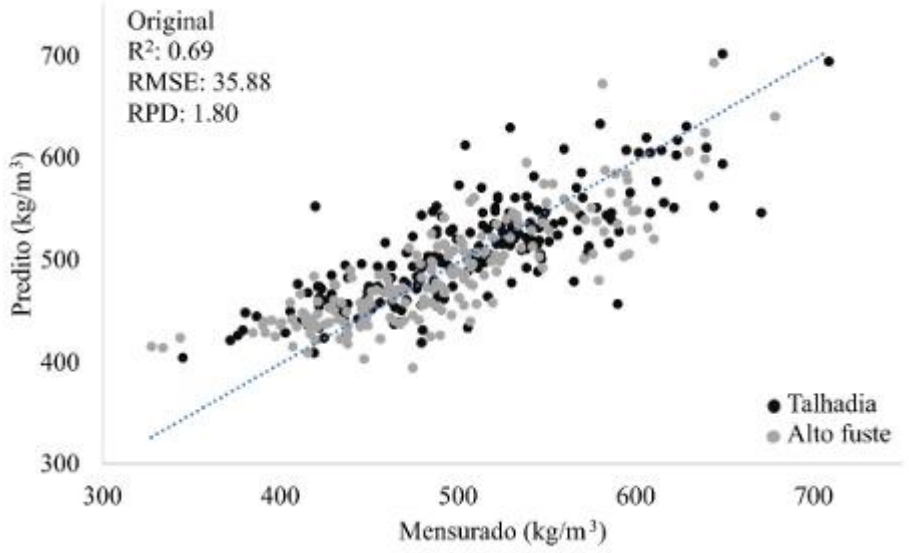


Figura 4 – Modelo PLS-R para predição da densidade básica de diferentes árvores de *Eucalyptus*, a partir dos espectros originais, em dois sistemas de manejo.

4. Conclusões

A madeira de *Eucalyptus* apresentou variação expressiva na densidade básica entre e dentro das árvores avaliadas. Entretanto, não foi possível observar separação clara entre os sistemas de manejo nos valores de densidade, nos espectros NIR e na PCA. Quanto aos modelos PLS-R, foi obtido desempenho moderado na predição da densidade básica, indicando o potencial da espectroscopia NIR como ferramenta rápida para predizer essa propriedade.

5. Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio financeiro das agências Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001, pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq: processo nº 409701/2024–6), pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG, APQ-00742-23, APQ-03095-26, APQ-05808-26) e TO 032/2026 – INOV@ÇÃO UFLA (Processo 23090.000734/2026-70). P.R.G. Hein recebeu apoio financeiro do CNPq (processo nº 304353/2024-8).

6. Referências bibliográficas

Assis Loureiro, B., Arriel, T. G., Guedes Ramalho, F. M., Hein, P. R. G., & Trugilho, P. F. (2022). NIR-based models for estimating selected physical and chemical wood properties from

fast-growing plantations. IForest-Biogeosciences and Forestry, 15(5), 372. https://doi.org/10.3832/ifor4030-015

ASTM International. (2017). Standard test methods for density and specific gravity (relative density) of wood and wood-based materials (ASTM D2395–17). ASTM International.

Chambi-Legoas, R., Tomazello-Filho, M., Vidal, C., & Chaix, G. (2023). Wood density prediction using near-infrared hyperspectral imaging for early selection of Eucalyptus grandis trees. Trees, 37(3), 981-991. https://doi.org/10.1007/s00468-023-02397-2

Cirilo, N. R. M., de Almeida, M. N. F., dos Santos, V. B., de Souza, A. J., da Conceição, G. J., da Silva, J. G. M., ... & Vidaurre, G. B. (2024). Impact of coppice and high stem management on Eucalyptus wood quality. European Journal of Wood and Wood Products, 82(6), 1841-1854. https://doi.org/10.1007/s00107-024-02125-8

Gendvilas, V., Neyland, M., Rocha-Sepúlveda, M. F., Downes, G. M., Hunt, M., Jacobs, A., ... & O'Reilly-Wapstra, J. (2022). Effects of thinning on the longitudinal and radial variation in wood properties of Eucalyptus nitens. Forestry, 95(4), 504-517. https://doi.org/10.1093/forestry/cpac007

Hakamada, R. E., Moreira, G. G., Fernandes, P. G., & Martins, S. D. S. (2022). Legacy of harvesting methods on coppice-rotation Eucalyptus at experimental and operational scales. Trees, Forests and People, 9, 100293. https://doi.org/10.1016/j.tfp.2022.100293

Indústria Brasileira de Árvores – IBÁ. (2025). Relatório Ibá 2025. IBÁ. IBA_relatorio_digital_POR.pdf

Medeiros, D. T., Gomes, J. N. N., Batista, F. G., Mascarenhas, A. R. P., Pimenta, E. M., Chaix, G., & Hein, P. R. G. (2024). Estimation of the basic density of Eucalyptus grandis wood chips at different moisture levels using benchtop and handheld NIR instruments. Industrial Crops and Products, 209, 117921. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2023.117921

Pasquini, C. (2003). Near infrared spectroscopy: fundamentals, practical aspects and analytical applications. Journal of the Brazilian chemical society, 14(2), 198-219. https://doi.org/10.1590/S0103-50532003000200006

Pimenta, E. M., Brito, E. G. D. S., Gomes, P. F., Ramalho, F. M. G., Vidaurre, G. B., Couto, A. M., ... & Hein, P. R. G. (2023). Planting spacing influences radial variation of basic density and chemical composition of wood from fast growing young Eucalyptus plantations. Holzforschung, 77(9), 657-669. https://doi.org/10.1515/hf-2023-0016

Pimenta, E. M., Ramalho, F. M. G., Dambroz, G. B. V., Couto, A. M., Campoe, O. C., & Hein, P. R. G. (2024). Planting spacing and genotype affected the tree growth and variation of wood density and lignin content along Eucalyptus trunks. Industrial Crops and Products, 222, 119595. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2024.119595

Rocha, M. F. V., Veiga, T. R. L. A., Soares, B. C. D., Araújo, A. C. C. D., Carvalho, A. M. M., & Hein, P. R. G. (2019). Do the growing conditions of trees influence the wood properties?. Floresta e Ambiente, 26, e20180353. https://doi.org/10.1590/2179-8087.035318

Santo, E. (2023). Produção de cerne em madeira de clones de eucaliptos sob manejos de alto fuste e talhadia. Série Técnica IPEF, 26(48). https://doi.org/10.18671/sertec.v26n48.087

Soares, L. F., Silva, D. C. D., Bergo, M. C., Coradin, V. T., Braga, J. W., & Pastore, T. C. (2017). Avaliação de espectrômetro NIR portátil e PLS-DA para a discriminação de seis espécies similares de madeiras amazônicas. Química nova, 40(4), 418-426. https://doi.org/10.21577/0100-4042.20170014

Tsuchikawa, S., & Kobori, H. (2015). A review of recent application of near infrared spectroscopy to wood science and technology. Journal of Wood Science, 61(3), 213-220. https://doi.org/10.1007/s10086-015-1467-x

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Variação longitudinal da densidade básica da madeira de cinco espécies nativas da Mata Atlântica cultivadas em reflorestamentos

Ana Julia Alves Pereira[1]; Evanderson Luis Capelete Evangelista [1]; William Colatino Martins[1]; Laura Menezes Côrrea[1]; Gabriel Matos Diniz [1]; Isabelle Silveira Martins Honorato[1]; Angélica de Cassia Oliveira Carneiro[1]; Vinicius Resende de Castro [1].

[1] Universidade Federal de Viçosa

Resumo: A expansão de plantios com espécies nativas da Mata Atlântica representa uma estratégia para integrar restauração florestal, sequestro de carbono e produção sustentável de madeira. Entretanto, a limitada disponibilidade de informações tecnológicas restringe a valorização e o uso industrial dessas espécies. Este estudo avaliou a densidade básica da madeira de cinco espécies nativas provenientes de plantios de reflorestamento: Boleira (*Joannesia princeps* Vell.), Ipê Felpudo (*Zeyheria tuberculosa*), Jacarandá da Bahia (*Dalbergia nigra*), Jenipapo (*Genipa americana*) e Jequitibá Rosa (*Cariniana legalis*). Foram analisadas amostras obtidas em diferentes posições do fuste, conforme a NBR 11941. Os resultados demonstraram diferenças significativas entre as espécies, com maior densidade para o Jenipapo (0,668 g/cm³), seguido por Jacarandá da Bahia (0,597 g/cm³), Ipê Felpudo (0,582 g/cm³) e Jequitibá Rosa (0,527 g/cm³), e menor para a Boleira (0,358 g/cm³). A caracterização da densidade básica contribui para definir usos tecnológicos adequados e valorizar madeiras nativas oriundas de plantios sustentáveis.

Palavras-chave: Qualidade da Madeira; Propriedades Físicas; Uso Tecnológico; Densidade básica; Madeira nativa.

Longitudinal variation in basic wood density of five native Atlantic Forest species grown in reforestation plantations

Abstract: Expanding plantations with native Atlantic Forest species represents a strategy to integrate forest restoration, carbon sequestration, and sustainable timber production. However, limited technical information restricts the valuation and industrial use of these species. This study evaluated the basic wood density of five native species from reforestation plantations: Boleira (*Joannesia princepsVell.*), Ipê Felpudo (*Zeyheria tuberculosa*), Jacarandá da Bahia (*Dalbergia nigra*), Jenipapo (*Genipa americana*), and Jequitibá Rosa (*Cariniana legalis*). Samples obtained from different positions along the stem were analyzed in accordance with the NBR 11941 standard. The results showed significant differences among the species, with the

highest density observed in Jenipapo (0.668 g/cm³), followed by Jacarandá da Bahia (0.597 g/cm³), Ipê Felpudo (0.582 g/cm³), and Jequitibá Rosa (0.527 g/cm³), and the lowest in Boleira (0.358 g/cm³). Characterizing basic density helps define appropriate technological applications and enhances the value of native timber from sustainable plantations.

Keywords: Wood Quality; Physical Properties; Technological Use; Basic density; Native wood.

1. Introdução

A crescente demanda por matérias-primas renováveis e produzidas de forma sustentável tem impulsionado o estabelecimento de plantios florestais com espécies nativas brasileiras, especialmente aqueles associados à restauração ecológica e à produção de madeira de maior valor agregado (Araújo et al., 2017). Além de contribuírem para a recuperação de ecossistemas degradados e para a conservação da biodiversidade, esses plantios representam uma alternativa promissora para reduzir a pressão sobre remanescentes florestais naturais, conciliando benefícios ambientais, econômicos e sociais (Chazdon & Brancalion, 2019; Strassburg et al., 2020).

Nos últimos anos, modelos de reflorestamento com espécies nativas também passaram a desempenhar papel estratégico em projetos de remoção de carbono atmosférico, uma vez que promovem o sequestro de carbono na biomassa arbórea e possibilitam a geração de créditos de carbono (Nogueira Junior, 2023). Entretanto, a viabilidade econômica desses empreendimentos não depende exclusivamente da comercialização desses créditos. O aproveitamento tecnológico da madeira produzida ao longo do ciclo de manejo representa uma importante fonte complementar de receita, tornando essencial o conhecimento das propriedades físicas, mecânicas e anatômicas das espécies utilizadas.

Nesse contexto, sistemas de manejo baseados em desbastes seletivos permitem manter a cobertura florestal e o estoque de carbono, ao mesmo tempo em que disponibilizam madeira para diferentes aplicações industriais, como a madeira serrada de alto valor agregado (Brancalion et al., 2021).

Nessa perspectiva de aproveitamento produtivo, a caracterização tecnológica da madeira proveniente desses plantios é fundamental para orientar seu uso mais adequado. Entre as propriedades físicas da madeira, a densidade básica destaca-se como um dos principais parâmetros de avaliação da qualidade tecnológica, pois expressa a relação entre a massa seca da madeira e seu volume saturado (Vital, 1984; Tsoumis, 1991). Por se relacionar diretamente com

a resistência mecânica, a estabilidade dimensional e o comportamento da madeira durante o processo de secagem, a densidade básica permite comparar espécies, estimar o rendimento da matéria-prima e auxiliar na indicação de usos mais adequados (Silveira; Rezende; Vale, 2013; Vital, 1984; Tsoumis, 1991). Trata-se, no entanto, de uma característica complexa, que varia entre espécies e mesmo dentro de uma mesma árvore, sendo influenciada tanto por fatores internos — como a posição na árvore e a proporção entre cerne e alburno — quanto por fatores externos, relacionados às condições de sítio e ao manejo silvicultural (Silveira; Rezende; Vale, 2013; Silva; Vale; Miguel, 2015).

Embora existam diversos estudos sobre propriedades tecnológicas de madeiras provenientes de florestas naturais ou de espécies comerciais amplamente cultivadas, como *Eucalyptus* e *Pinus*, ainda são escassas as informações referentes às espécies nativas brasileiras cultivadas em plantios comerciais destinados simultaneamente à restauração florestal e à produção sustentável de madeira. Essa limitação reduz a disponibilidade de informações técnicas necessárias para orientar o processamento industrial, definir usos mais adequados e agregar valor econômico à madeira produzida nesses sistemas. Além disso, poucos estudos avaliam simultaneamente a variação longitudinal da densidade básica em espécies nativas provenientes de plantios de reflorestamento, aspecto relevante para o melhor aproveitamento da matéria-prima.

Diante disso, o presente trabalho teve como objetivo avaliar a densidade básica da madeira de cinco espécies nativas da Mata Atlântica provenientes de plantios de reflorestamento, sendo elas Boleira (*Joannesia princeps* Vell.), Ipê Felpudo (*Zeyheria tuberculosa*), Jacarandá da Bahia (*Dalbergia nigra*), Jenipapo (*Genipa americana*) e Jequitibá Rosa (*Cariniana legalis*), visando contribuir para a caracterização tecnológica dessas espécies e auxiliar na definição dos destinos mais adequados para sua utilização.

2. Material e métodos

2.1 Área de estudo e material estudado

O estudo foi conduzido no Laboratório de Propriedades da Madeira (LPM) da Universidade Federal de Viçosa (UFV), utilizando madeira proveniente de plantios comerciais de espécies nativas da Mata Atlântica pertencentes à empresa Symbiosis Investimentos. As árvores foram coletadas de áreas localizadas nos municípios de Porto Seguro e Trancoso, Bahia, Brasil.

Foram avaliadas cinco espécies florestais nativas com potencial madeireiro: *Joannesia princeps* Vell. (Boleira), *Zeyheria tuberculosa* (Ipê Felpudo), *Dalbergia nigra* (Jacarandá da Bahia), *Genipa americana* (Jenipapo) e *Cariniana legalis* (Jequitibá Rosa). Todas as árvores apresentavam aproximadamente 14 anos de idade e foram conduzidas sob o mesmo sistema de manejo florestal.

2.2 Amostragem

De cada espécie foram selecionadas dez árvores, totalizando cinquenta indivíduos. De cada árvore foi retirada a primeira tora comercial, com aproximadamente 3 m de comprimento, da qual foi obtido um disco correspondente ao diâmetro à altura do peito (DAP; 1,30 m). Adicionalmente, foram coletados discos nas posições correspondentes a 0%, 25%, 50% e 75% da altura comercial do fuste.

Para a determinação da densidade básica, foram retiradas de cada disco, nas diferentes posições longitudinais do fuste, quatro cunhas opostas entre si, dispostas em um ângulo de 33°, totalizando 4 corpos de prova por disco. Para a saturação, os corpos de prova de cada uma das 10 árvores utilizadas por espécie foram imersos em baldes contendo água limpa, renovada periodicamente sempre que se observava acúmulo de impurezas, sendo a saturação completa constatada após 7 dias de imersão. Em algumas amostras, fez-se necessária a utilização da bomba de vácuo, a fim de acelerar o processo de saturação dos corpos de prova (Figura 1).

Figura 1. Etapas da Análise de Densidade Básica.





Fonte: Autor

O volume saturado de cada corpo de prova foi determinado pelo método de pesagem hidrostática, fundamentado no princípio de Arquimedes, adotando-se a densidade da água igual a 1 g/cm³, sendo o excesso superficial de água removido com papel toalha antes da pesagem. A massa seca foi determinada em balança analítica, após secagem das amostras em estufa, à temperatura de 103 ± 2 °C até atingirem massa constante. A densidade básica foi obtida pela razão entre a massa seca e o volume saturado, conforme a NBR 11941 (ABNT, 2003), calculada pela seguinte expressão:

$$Db = Ms / Vs$$

Em que:

Db = densidade básica da madeira, em g/cm³;

Ms = massa seca da amostra, em g;

Vs = volume saturado da amostra, em cm³.

O experimento foi conduzido em delineamento inteiramente casualizado, em esquema fatorial 5 × 5, correspondente a cinco espécies e cinco posições longitudinais do fuste (DAP, 0%, 25%, 50% e 75%).

Os dados foram inicialmente submetidos aos testes de normalidade dos resíduos e homogeneidade das variâncias. Posteriormente, realizou-se análise de variância (ANOVA) para verificar os efeitos de espécie, posição longitudinal e da interação entre esses fatores. Quando observadas diferenças significativas ($p < 0,05$), as médias foram comparadas pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.

As análises estatísticas foram realizadas utilizando o software R Studio.

3. Resultados e discussão

Na Tabela 1 estão apresentados os valores médios de densidade básica das cinco espécies avaliadas, considerando as posições da altura comercial do fuste, além da média geral de cada espécie.

Tabela 1. Valores médios da densidade aparente das 5 espécies, em cada posição longitudinal

Posição	**Boleira** (*Joannesia princeps* Vell.)	**Ipê-felpudo** *(Zeyheria tuberculosa*)	**Jacarandá-da-Bahia** (*Dalbergia nigra*)	**Jenipapo** (*Genipa americana*)	**Jequitibá-rosa** *(Cariniana legalis)*
DAP	0,325 dC	0,597 bA	0,609 bA	0,679 aA	0,546 cA
0%	0,336 dBC	0,594 bA	0,644 aA	0,680 aA	0,544 cA
25%	0,359 dABC	0,563 bcA	0,603 bA	0,658 aA	0,541 cA
50%	0,381 dAB	0,560 bcA	0,608 bA	0,680 aA	0,530 cA
75%	0,387 dA	0,592 bA	0,520 cB	0,647 aA	0,475 cB
Média	0,358 d	0,582 b	0,597 b	0,668 a	0,527 c

Médias seguidas pela mesma letra minúscula, na linha, não diferem estatisticamente entre si; médias seguidas pela mesma letra maiúscula, na coluna, não diferem estatisticamente entre si (Tukey, 5%).

De maneira geral, houve diferença significativa entre as espécies avaliadas, evidenciando que a densidade básica variou em função da espécie, e em alguns casos, ao longo do fuste. Esse comportamento é esperado, uma vez que a densidade da madeira é influenciada por fatores anatômicos, genéticos e ambientais, além da posição no tronco, da proporção entre lenho juvenil e adulto e da relação entre cerne e alburno (Silveira; Rezende; Vale, 2013; Silva; Vale; Miguel, 2015).

O Jenipapo *(Genipa americana*) apresentou a maior média geral de densidade básica (0,668 g/cm³), diferindo significativamente das demais espécies em praticamente todas as posições avaliadas. Esse resultado indica maior quantidade de massa seca por unidade de volume, característica que geralmente está associada a maior resistência mecânica, maior rendimento em massa e melhor desempenho em usos que exigem madeira mais compacta e resistente (Vital, 1984; Tsoumis, 1991; Forest Products Laboratory, 2010).

O Jacarandá da Bahia (*Dalbergia nigra*) apresentou a segunda maior média geral (0,597 g/cm³), seguido pelo Ipê Felpudo (0,582 g/cm³). Embora essas espécies tenham apresentado médias semelhantes, o comportamento ao longo do fuste foi diferente. No Jacarandá da Bahia, a

maior densidade ocorreu na posição 0%, enquanto a menor foi observada na posição 75%, com 0,520 g/cm³, diferindo significativamente das demais posições. Essa redução na porção superior do fuste pode estar relacionada à variação longitudinal da madeira, comportamento comum em espécies florestais, pois a formação dos tecidos lenhosos pode mudar entre a base e o topo da árvore (Silveira; Rezende; Vale, 2013; Silva; Vale; Miguel, 2015).

O Ipê Felpudo (*Zeyheria tuberculosa*) apresentou valores de densidade básica relativamente próximos entre as posições avaliadas, variando de 0,560 a 0,597 g/cm³, sem diferença significativa entre elas. Essa uniformidade indica menor variação longitudinal da densidade básica, caracteristica considerada positiva do ponto de vista tecnológico. Madeiras com propriedades físicas mais homogêneas tendem a apresentar comportamento mais previsível durante o processamento, a secagem e a utilização final, favorecendo a padronização da matéria-prima industrial (Tsoumis, 1991; Forest Products Laboratory, 2010).

O Jequitibá Rosa (*Cariniana legalis*) apresentou média geral de 0,527 g/cm³, sendo classificado, entre as espécies avaliadas, como uma madeira de densidade intermediária. Os valores observados nas posições DAP, 0%, 25% e 50% foram semelhantes, variando de 0,530 a 0,546 g/cm³, sem diferença significativa entre si. Entretanto, na posição 75%, houve redução para 0,475 g/cm³, diferindo das demais posições. Essa redução pode estar associada a maior proporção de tecidos menos densos na porção superior do fuste (Silveira; Rezende; Vale, 2013; Silva; Vale; Miguel, 2015).

A Boleira (*Joannesia princeps* Vell.) apresentou os menores valores de densidade básica em todas as posições avaliadas, com média geral de 0,358 g/cm³. Os valores variaram de 0,325 g/cm³ no DAP a 0,387 g/cm³ na posição 75%, indicando aumento da densidade da base para o topo. Embora tenha apresentado menor densidade em comparação às demais espécies, essa característica não inviabiliza seu potencial de utilização, uma vez que madeiras menos densas podem ser indicadas para aplicações que demandam leveza, facilidade de usinagem, menor peso final e menor esforço durante o processamento (Vital, 1984; Tsoumis, 1991).

A comparação entre as médias gerais permitiu estabelecer a seguinte ordem decrescente de densidade básica: Jenipapo, Jacarandá da Bahia, Ipê Felpudo, Jequitibá Rosa e Boleira. Esses resultados reforçam a importância da caracterização tecnológica individual de madeiras nativas provenientes de plantios de reflorestamento, uma vez que a densidade básica está diretamente relacionada à qualidade da madeira, ao rendimento da matéria-prima, à resistência mecânica, ao comportamento na secagem e à indicação de usos industriais mais adequados (Vital, 1984; Tsoumis, 1991; Silveira; Rezende; Vale, 2013).

Dessa forma, os resultados indicam que o jenipapo, por apresentar maior densidade básica, possui maior potencial para aplicações que exigem resistência mecânica. O Jacarandá da Bahia e o Ipê Felpudo também apresentam potencial para usos madeireiros de maior valor agregado, por apresentarem valores de densidade básica intermediários a elevados. O Jequitibá Rosa pode ser indicado para usos que demandem densidade moderada e certa uniformidade da madeira, enquanto a Boleira, por apresentar menor densidade, tende a ser mais adequada para produtos leves, peças internas, embalagens, painéis ou aplicações em que a baixa massa seja uma característica desejável (Vital, 1984; Tsoumis, 1991; Forest Products Laboratory, 2010).

Assim, a avaliação da densidade básica das espécies estudadas contribui para ampliar o conhecimento sobre madeiras nativas da Mata Atlântica cultivadas em plantios de reflorestamento. Esses resultados são relevantes diante da carência de informações tecnológicas sobre muitas espécies nativas brasileiras, principalmente quando provenientes de plantios florestais, o que dificulta sua valorização comercial e a definição de usos industriais adequados (Silva; Vale; Miguel, 2015; Silveira; Rezende; Vale, 2013).

4. Conclusões

A densidade básica da madeira diferiu significativamente entre as cinco espécies nativas da Mata Atlântica avaliadas, evidenciando que a espécie exerce influência direta sobre essa propriedade tecnológica. O Jenipapo destacou-se com a maior densidade básica e maior potencial para usos que exigem resistência mecânica, enquanto a Boleira apresentou os menores valores, sendo mais adequada para produtos leves, como embalagens e painéis. Jacarandá da Bahia, Ipê Felpudo e Jequitibá Rosa apresentaram valores intermediários, compatíveis com produtos sólidos de maior valor agregado. Além disso, Ipê Felpudo e Jenipapo mostraram-se estatisticamente uniformes ao longo do fuste, enquanto Jacarandá da Bahia e Jequitibá Rosa apresentaram redução significativa na posição de 75%, o que deve ser considerado na definição do aproveitamento da tora conforme a posição de origem.

Os resultados obtidos ampliam o conhecimento sobre a densidade básica de espécies nativas provenientes de plantios comerciais de reflorestamento, segmento ainda pouco explorado na literatura científica. Além disso, fornecem subsidios para o planejamento do uso industrial dessas madeiras, contribuindo para a agregação de valor à produção florestal oriunda de sistemas que conciliam restauração ecológica, sequestro de carbono e produção sustentável de madeira.

5. Agradecimentos

A EMBRAPII Unidade Fibras Florestais, à Universidade Federal de Viçosa (UFV), ao Departamento de Engenharia Florestal (DEF/UFV), e a empresa Symbiosis Investimentos.

6. Referências bibliográficas

Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2003). NBR 11941:2003: Madeira: determinação da densidade básica. ABNT.

Araújo, V. A. de, Garcia, J. N., Cortez-Barbosa, J., Gava, M., Savi, A. F., Morales, E. A. M., Lahr, F. A. R., Vasconcelos, J. S., & Christoforo, A. L. (2017). Importância da madeira de florestas plantadas para a indústria de manufaturados. Pesquisa Florestal Brasileira, 37(90), 189–200. https://doi.org/10.4336/2017.pfb.37.90.824

Brancalion, P. H. S., Guillemot, J., César, R. G., Andrade, H. S., Mendes, A., Sorrini, T. B., Piccolo, M. C., Peluci, M. C., Moreno, V. S., Colletta, G., & Chazdon, R. L. (2021). The cost of restoring carbon stocks in Brazil's Atlantic Forest. Land Degradation & Development, 32(2), 830–841. https://doi.org/10.1002/ldr.3764

Chazdon, R. L., & Brancalion, P. H. S. (2019). Restoring forests as a means to many ends. Science, 365(6448), 24–25**.** https://doi.org/10.1126/science.aax9539

EMBRAPA. (2023). Estoque e sequestro de carbono em florestas e sistemas de produção agropecuária. Embrapa.

Forest Products Laboratory. (2010). Wood handbook: Wood as an engineering material (General Technical Report FPL-GTR-190). U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory.

Melo, J. E. de, Coradin, V. T. R., & Mendes, J. C. (1992). Classes de densidade para madeiras da Amazônia brasileira. Silvicultura, 12(42), 695–699.

Silva, C. J. da, Vale, A. T. do, & Miguel, E. P. (2015). Densidade básica da madeira de espécies arbóreas de Cerradão no estado do Tocantins. Pesquisa Florestal Brasileira, 35(82), 63–75. https://doi.org/10.4336/2015.pfb.35.82.822

Silveira, L. H. C., Rezende, A. V., & Vale, A. T. do. (2013). Teor de umidade e densidade básica da madeira de nove espécies comerciais amazônicas. Acta Amazonica, 43(2), 179–184. https://doi.org/10.1590/S0044-59672013000200007

Strassburg, B. B. N., Iribarrem, A., Beyer, H. L., Cordeiro, C. L., Crouzeilles, R., Jakovac, C. C., Braga Junqueira, A., Lacerda, E., Latawiec, A. E., Balmford, A., Brooks, T. M., Butchart, S. H. M., Chazdon, R. L., Erb, K.-H., Brancalion, P. H. S., Buchanan, G., Cooper, D., Díaz, S., Donald, P. F., ... Visconti, P. (2020). Global priority areas for ecosystem restoration. Nature, 586, 724–729. https://doi.org/10.1038/s41586-020-2784-9

Tsoumis, G. (1991). Science and technology of wood: Structure, properties, utilization. Van Nostrand Reinhold.

Verra. (2024). VM0047 Afforestation, reforestation, and revegetation, v1.1. Verra.

Vital, B. R. (1984). Métodos de determinação da densidade da madeira (Boletim Técnico nº 1). Sociedade de Investigações Florestais.

Nogueira Junior, L. R. (2023). Estoque e sequestro de carbono em florestas e sistemas de produção agrícola: Software InVEST. Em S. G. Tosto, L. C. Pereira, M. A. F. Gomes, & J. A. Rodrigues (Eds.), Serviços ecossistêmicos e serviços ambientais de solo, água e carbono: Amazônia (Cap. 6, pp. 147–157). Embrapa. https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1157740

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Variação longitudinal da densidade básica e da relação cerne/alburno em clones de *Eucalyptus urophylla*: implicações para o aproveitamento industrial

João Vitor Morais da Silva[1]; Mara Lúcia Agostini Valle[1]; Wescley Viana Evangelista[2]; Calline Chaves de Jesus[1]; Wallace Plácido dos Santos[1]; Murilo Pereira da Silva[1]

[1] Universidade Federal do Sul da Bahia 01
[2] Universidade do Estado de Mato Grosso 02

Resumo: O gênero Eucalyptus destaca-se como uma das principais fontes de matéria-prima florestal devido à elevada produtividade e à versatilidade de uso industrial, sendo a densidade básica e a relação cerne/alburno importantes indicadores da qualidade tecnológica da madeira. Este trabalho teve como objetivo avaliar a variação longitudinal da densidade básica e da relação cerne/alburno em dois clones de *Eucalyptus urophylla* (Clones A e B) e suas implicações para o aproveitamento industrial. Foram analisadas 16 árvores provenientes de plantios comerciais em Itamarandiba, Minas Gerais, com amostras coletadas nas regiões da base, do meio e do topo do fuste. Segundo a classificação climática de Köppen, a região apresenta clima do tipo Cwb. A densidade básica foi determinada conforme a ABNT NBR 11941, e a relação cerne/alburno foi obtida por meio da mensuração das áreas de cerne e alburno. Os dados foram submetidos à análise de variância (ANOVA) e ao teste de Tukey ($p < 0,05$). A densidade básica variou de 468 a 501 kg m^{-3}, apresentando comportamento distinto entre os clones e valores compatíveis com aplicações industriais. O Clone A apresentou maior percentual de cerne, enquanto o Clone B apresentou maior percentual de alburno. A relação cerne/alburno diminuiu da base para o topo do fuste e apresentou relação inversa com a densidade básica. Conclui-se que o material genético e a posição longitudinal influenciam a qualidade da madeira, contribuindo para a seleção de clones e para o direcionamento do uso industrial da matéria-prima.

Palavras-chave: Densidade básica; Cerne/alburno; Propriedades físicas da madeira.

Longitudinal Variation in Basic Wood Density and Heartwood/Sapwood Ratio in Eucalyptus urophylla Clones: Implications for Industrial Utilization

Abstract: *Eucalyptus* is one of the main sources of forest raw material due to its high productivity and wide range of industrial applications. Basic wood density and the heartwood-to-sapwood ratio are important indicators of wood technological quality. This study aimed to evaluate the longitudinal variation in basic wood density and the heartwood-to-sapwood ratio in two *Eucalyptus urophylla* clones (Clones A and B) and their implications for industrial utilization. Sixteen trees from commercial plantations in Itamarandiba, Minas Gerais, Brazil, were analyzed, with samples collected from the base, middle, and top portions of the stem. According to the Köppen climate classification, the region has a Cwb climate. Basic wood density was determined according to ABNT NBR 11941, and the heartwood-to-sapwood ratio was obtained by measuring the heartwood and sapwood areas. Data were subjected to analysis of variance (ANOVA), and means were compared using Tukey's test ($p < 0.05$). Basic wood

density ranged from 468 to 501 kg m^{-3}, showing distinct patterns between the clones and values suitable for industrial applications. Clone A exhibited a higher proportion of heartwood, whereas Clone B showed a higher proportion of sapwood. The heartwood-to-sapwood ratio decreased from the base to the top of the stem and was inversely related to basic wood density. It was concluded that both genetic material and longitudinal stem position influence wood quality, contributing to clone selection and supporting decision-making regarding the industrial utilization of the raw material.

Keywords: Basic density; Heartwood/sapwood; Physical properties of wood.

1. Introdução

O gênero *Eucalyptus* destaca-se como a principal fonte de matéria-prima florestal no Brasil devido ao rápido crescimento das árvores, elevada produtividade, ampla adaptação às diferentes condições edafoclimáticas e grande diversidade de espécies. Essas características fazem com que sua madeira seja amplamente empregada em diversos segmentos industriais. Nesse contexto, a qualidade tecnológica da madeira torna-se um fator estratégico para o setor florestal, impulsionando programas de melhoramento genético voltados à seleção de clones que aliem alta produtividade e propriedades tecnológicas superiores (CAIXETA et al., 2003; ALMEIDA et al., 2026).

Entre as propriedades físicas da madeira, a densidade básica destaca-se como um dos principais indicadores de qualidade tecnológica por apresentar elevada correlação com a resistência mecânica, o rendimento em celulose, a produção de carvão vegetal, a estabilidade dimensional, a produtividade em biomassa etc. (PROTÁSIO et al., 2010; MAGALHÃES et al., 2020; VIANA et al., 2009). Entretanto, essa importante propriedade física varia ao longo do fuste em função do material genético, da idade, das condições ambientais e da proporção entre madeira juvenil e adulta. Estudos recentes demonstram que clones de *Eucalyptus* apresentam diferentes padrões de variação longitudinal da densidade básica, evidenciando a influência da interação entre genótipo e ambiente (MAGALHÃES et al., 2020; ALMEIDA et al., 2026).

Além da densidade básica, a relação cerne/alburno constitui uma característica de grande importância tecnológica, pois influencia a durabilidade natural, a permeabilidade e a estabilidade dimensional da madeira. A proporção entre essas regiões varia conforme o material genético, a idade da árvore e a posição ao longo do fuste, afetando diretamente a aptidão da madeira para diferentes aplicações industriais (SETTE JÚNIOR et al., 2012; GOMES et al., 2025). Além disso, a avaliação da variação longitudinal dessas propriedades contribui para aperfeiçoar métodos de amostragem e aumentar a precisão da caracterização tecnológica da madeira (ARAUJO et al., 2025; HASELEIN et al 2004).

Diante da crescente demanda por materiais genéticos que aliem elevada produtividade e qualidade da madeira, torna-se fundamental compreender a distribuição longitudinal da densidade básica e da relação cerne/alburno em clones de madeira do gênero *Eucalyptus*. Essas informações subsidiam programas de melhoramento genético, estratégias de manejo e o direcionamento da matéria-prima para diferentes usos industriais (VIDAURRE et al., 2024).

Nesse contexto, este trabalho teve como objetivo avaliar a variação longitudinal da densidade básica da madeira e da relação cerne/alburno em dois clones de *Eucalyptus*, em diferentes posições do fuste, e discutir suas implicações para o aproveitamento industrial.

2. Material e métodos

Foram utilizadas árvores pertencentes a dois clones comerciais de *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake (Clones A e B) provenientes de plantios comerciais, localizados no município de Itamarandiba, estado de Minas Gerais, com altitude de 1001 m, precipitação média anual 1156 mm, temperatura média anual de 20 °C e coordenadas geográficas de 8041803 UTM (latitude) e 741306 UTM (longitude). Segundo a classificação de Köppen, o clima da região é do tipo Cwb (temperado de altitude, com inverno seco e verão ameno), (ALVARES et al., 2013).

Foram coletadas oito árvores de cada clone, com cerca de 5 anos de idade, com espaçamento entre árvores de 3,0 x 2,8 m, totalizando 16 árvores selecionadas aleatoriamente. Após a derrubada, as árvores foram seccionadas em toras de três metros, utilizando-se as três primeiras toras da porção basal, totalizando 48 toras. De cada tora foi retirado um disco de madeira a 30 cm da base para a avaliação das propriedades da madeira. As análises foram realizadas no Laboratório de Propriedades da Madeira, do Departamento de Engenharia Florestal da Universidade Federal de Viçosa (UFV), campus de Viçosa, estado de Minas Gerais. De cada tora retirou-se um disco de madeira, a 30 cm da região basal onde foram avaliadas as propriedades da madeira estudadas (Figura 1).

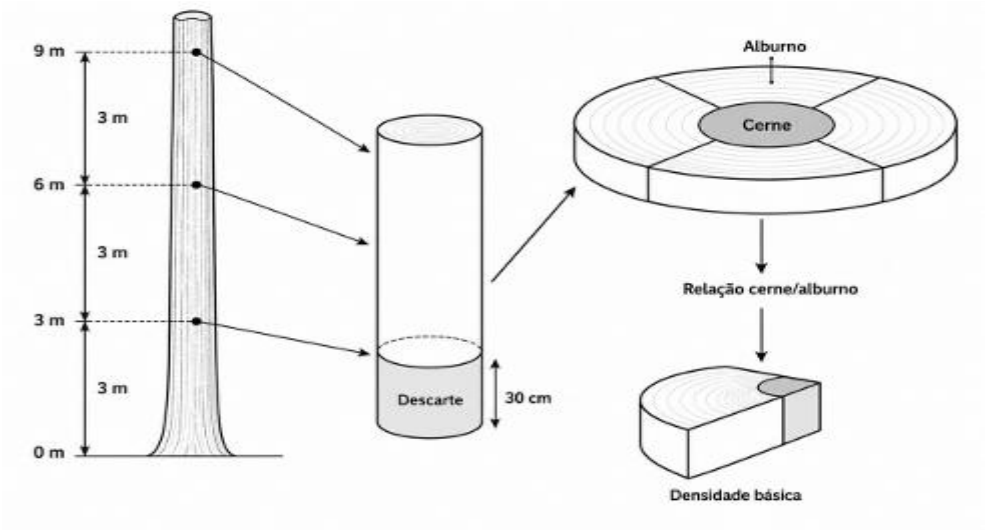


Figura 1 – Esquema de retirada de corpos de prova das toras para densidade básica e relação cerne e alburno.

A densidade básica da madeira foi determinada de acordo com a relação entre a massa absolutamente seca e o seu volume saturado, conforme a Norma Brasileira Regulamentadora NBR-11941 da Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT (2003) e utilizando a Equação 1.

$$DB = \frac{Ms}{Vsat} * 1000 \qquad \text{Equação 1}$$

Onde: DB = densidade básica da madeira (kg/m³); Ms = massa absolutamente seca (g); Vsat = volume saturado (cm³).

Para determinação da relação cerne/alburno (C/A), identificou-se a região de transição entre cerne e alburno, considerando a diferença de coloração entre os lenhos na superfície transversal. Em seguida, foram traçadas duas linhas perpendiculares passando pela medula e, na extremidade de cada tora, mensuraram-se o diâmetro total, o diâmetro do cerne e a espessura do alburno em quatro posições opostas, utilizando régua e fita métrica, ambas com precisão de 0,1 cm. Com base nessas medições, calcularam-se a porcentagem de cerne, a porcentagem de alburno e a relação cerne/alburno (C/A), conforme equação 2, 3, 4, 5, 6 e 7.

Cálculo da área ocupada pelo cerne:

Equação 2

Onde: Crn = área ocupada pelo cerne (cm²); π = constante matemática pi (3,1416); d = diâmetro do cerne (cm).

Cálculo da área seccional da tora:

$$As = \frac{\pi * D2}{40.00} \qquad \text{Equação 3}$$

Onde: As = área seccional da tora (cm²); π = constante matemática pi (3,1416); D = diâmetro da seção transversal da tora (cm).

Cálculo da área ocupada pelo alburno:

$$Alb = As - Crn \qquad \text{Equação 4}$$

Onde: Alb = área ocupada pelo alburno (cm²); As = área seccional da tora (cm²); Crn = área ocupada pelo cerne (cm²).

Cálculo da porcentagem de alburno:

$$\%\ Alb = \frac{Alb}{As} \qquad \text{Equação 5}$$

Onde: % Alb = porcentagem de alburno (%); Alb = área ocupada pelo alburno (cm²); As = área seccional da tora (cm²).

Cálculo da porcentagem de cerne:

$$\%\ Crn = 1 - \%\ Alb \qquad \text{Equação 6}$$

Onde: % Crn = porcentagem de cerne (%); % Alb = porcentagem de alburno (%).

Cálculo da relação cerne/ alburno:

$$C/A = \frac{\%\, Crn}{\%\, Alb} \qquad \text{Equação 7}$$

Onde: C/A = Relação cerne/alburno; % Crn = Porcentagem de cerne e % Alb = Porcentagem de alburno.

Os dados foram submetidos à análise de variância (ANOVA) em delineamento fatorial 2 × 3, considerando os fatores clone e posição longitudinal do fuste e sua interação, utilizando o software PAST versão 4.02. Quando constatado efeito significativo ($p < 0,05$), as médias foram comparadas pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

3. Resultados e discussão

3.1. Densidade básica da madeira

Os resultados da densidade básica média da madeira registrada nos dois clones de *Eucalyptus urophylla* (Clones A e B), em diferentes posições longitudinais (base, meio e topo) podem ser observados na Figura 2.

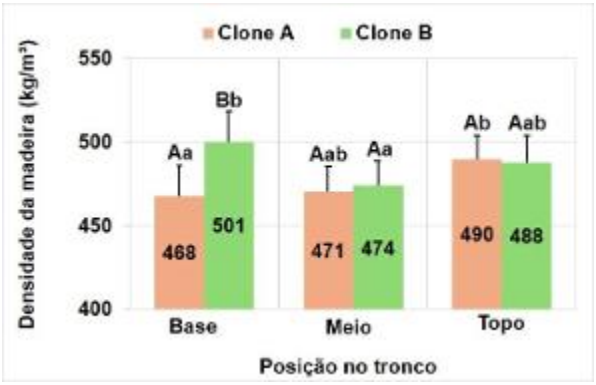


Figura 2 – Densidade básica da madeira de dois clones de *Eucalyptus urophylla* em diferentes posições longitudinais do fuste. Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). Letras maiúsculas indicam a comparação entre clones dentro da mesma posição longitudinal, enquanto letras minúsculas indicam a comparação entre posições longitudinais dentro de cada clone.

A densidade básica da madeira variou em função da posição longitudinal do fuste e do material genético avaliado, evidenciando comportamentos distintos entre os clones. O Clone B apresentou o maior valor médio na base do tronco (501 kg/m³), com redução nas posições meio e topo (474 e 488 kg/m³, respectivamente), comportamento frequentemente associado à maior proporção de madeira madura nas regiões basais do fuste. Em contraste, o Clone A apresentou incremento gradual da densidade ao longo do fuste, atingindo o maior valor médio na posição do topo (490 kg/m³). Esse padrão sugere que fatores anatômicos inerentes ao material genético, como variações na espessura da parede das fibras, no diâmetro do lume e na proporção dos diferentes tecidos, exerceram maior influência sobre a densidade básica do que a distribuição longitudinal de cerne e alburno.

De modo geral, os valores médios de densidade básica, variando entre 474 e 501 kg/m³, enquadram-se na faixa considerada adequada para diversas aplicações industriais. Madeiras com essa característica tendem a apresentar bom rendimento em processos de transformação, equilíbrio entre resistência mecânica e trabalhabilidade, além de potencial para utilização na produção de celulose e papel, carvão vegetal para fins energéticos e siderúrgicos, bem como na fabricação de produtos sólidos de madeira. Assim, os resultados demonstram que ambos os clones possuem qualidade tecnológica compatível com múltiplos usos industriais, sendo as

diferenças observadas ao longo do fuste atribuídas principalmente às características genéticas e anatômicas de cada material.

Nesse contexto, o Clone A apresenta melhor capacidade para produtos sólidos e carvão vegetal, devido à maior densidade básica e ao maior percentual de cerne, enquanto o Clone B demonstra maior potencial para a indústria de celulose e papel, em razão do maior percentual de alburno, característica associada a um processamento mais favorável. Essas diferenças evidenciam a influência das características genéticas e anatômicas de cada clone sobre a qualidade tecnológica da madeira.

Esses resultados corroboram os encontrados por Portz et al. (2020), que observaram diferenças na densidade básica entre clones comerciais de *Eucalyptus*, atribuídas às características químicas, físicas e ao potencial de crescimento de cada material genético. Esse comportamento reforça a influência do genótipo na qualidade da madeira e em seu desempenho para fins industriais.

3.2. Porcentagem de cerne, de alburno e a relação cerne/alburno

Os valores médios da porcentagem de áreas de cerne e alburno e da relação cerne/alburno encontram-se na Figura 3.

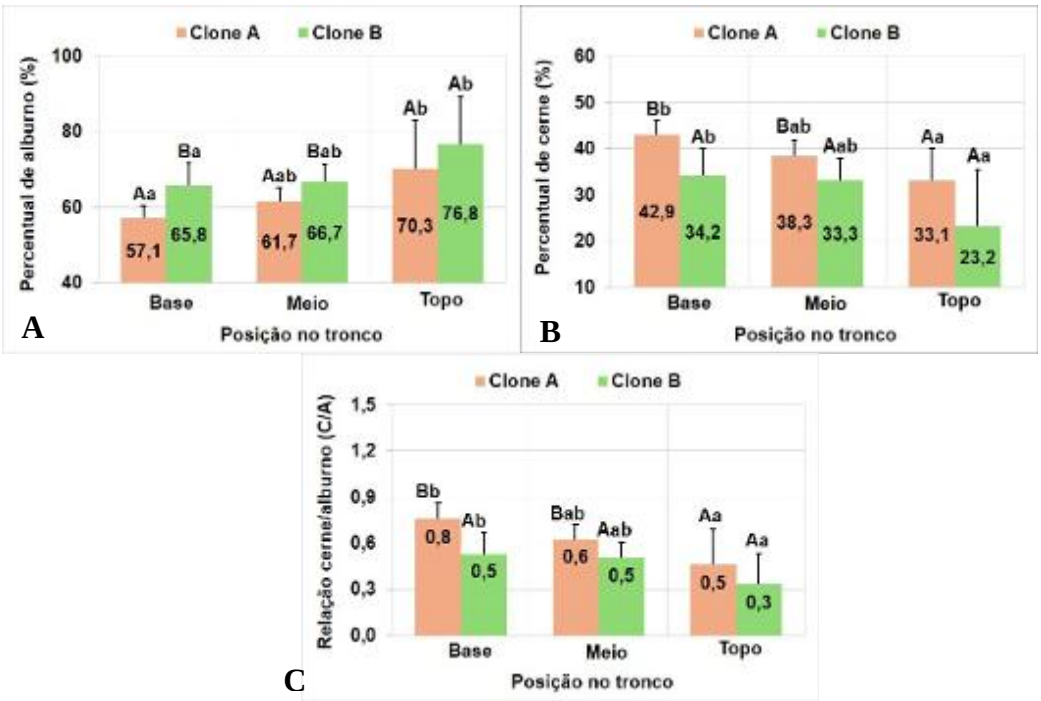


Figura 3 – Percentuais de cerne (Figura 3A) e alburno (Figura 3B), e relação cerne/alburno (C/A) (Figura 3C) na madeira de dois clones de *Eucalyptus urophylla* em diferentes posições longitudinais do fuste. Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de

Tukey ($p < 0,05$). Letras maiúsculas indicam a comparação entre clones dentro da mesma posição longitudinal, enquanto letras minúsculas indicam a comparação entre posições longitudinais dentro de cada clone.

A porcentagem de alburno apresentou aumento da base para o topo do tronco em ambos os clones e consequentemente menores valores de cerne. Esse comportamento é esperado, uma vez que as regiões mais próximas ao meristema apical são mais jovens em decorrência do crescimento longitudinal do caule. Nesses locais, embora o câmbio vascular já esteja ativo promovendo o crescimento em diâmetro, houve menor tempo para a deposição sucessiva de camadas de xilema secundário em comparação às porções basais do tronco.

Como reflexo desse comportamento, a relação cerne/alburno reduziu da base para o topo nos dois materiais genéticos, variando de 0,8 para 0,5 no Clone A e de 0,5 para 0,3 no Clone B. Esses resultados demonstram que tanto a posição longitudinal do tronco quanto o material genético influenciam a distribuição de cerne e alburno na madeira.

Os resultados corroboram estudos de Costa (2017), Morais et al. (2007) e Mauri (2010), que destacam a influência do genótipo e da posição no fuste sobre a formação de cerne em espécies de *Eucalyptus.* Sob a perspectiva industrial, a maior proporção de cerne observada na base do tronco, especialmente no Clone A, representa uma característica desejável, pois está associada à maior durabilidade natural, estabilidade dimensional e melhor desempenho tecnológico da madeira para produtos sólidos e processos de transformação. Por outro lado, a maior proporção de alburno verificada no Clone B pode favorecer processos que dependem da elevada permeabilidade da madeira, como a secagem, a impregnação com preservantes e a produção de polpa celulósica, em razão da maior atividade fisiológica e menor teor de extrativos presentes nessa região (HASELEIN et al., 2004).

De maneira geral, a correlação entre a densidade básica da madeira e a relação cerne/alburno evidenciou tendência negativa, indicando que madeiras mais densas apresentaram, em geral, menores valores da relação cerne/alburno (Figura 4). Embora a associação tenha sido moderada, os resultados demonstram que esses atributos são complementares na avaliação da qualidade tecnológica da madeira, contribuindo para a seleção de materiais genéticos e para o direcionamento do aproveitamento industrial conforme a aplicação desejada.

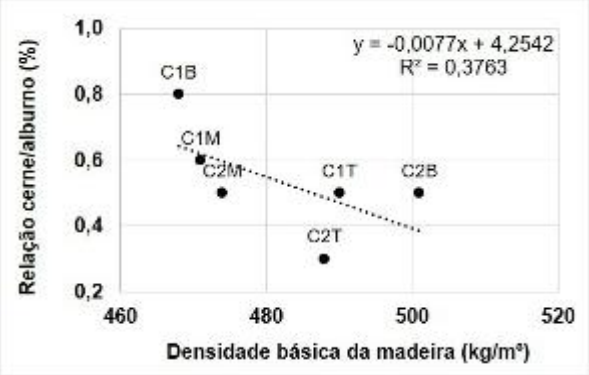


Figura 4 – Correlação entre a densidade básica da madeira e a relação cerne/alburno (C/A) em dois clones de *Eucalyptus urophylla*, avaliados em diferentes posições longitudinais do fuste.

4. Conclusões

A densidade básica e a relação cerne/alburno variam em função do clone e da posição longitudinal do fuste, evidenciando a influência do material genético na qualidade tecnológica da madeira.

O Clone A apresentou maior proporção de cerne, enquanto ambos os clones apresentaram densidade básica compatível com aplicações tecnológicas como a produção de celulose e papel, painéis reconstituídos, madeira serrada, laminação e produção de energia (lenha e carvão vegetal).

A avaliação conjunta dessas propriedades constitui uma ferramenta importante para programas de melhoramento genético e para o direcionamento do uso da madeira de acordo com sua finalidade tecnológica, permitindo selecionar materiais mais adequados às diferentes demandas industriais.

5. Referências bibliográficas

Almeida, M. N. F. D., Louzada, J. L., Pezzopane, J. E. M., Rocha, S. M., Câmara, A. P., Santos, V. B. D., ... & Vidaurre, G. B. (2026). Influence of clone-site interaction on basic wood density of Eucalyptus clones in Brazilian tropical zones. CERNE, 32, e103566.

Alvares, C. A., Stape, J. L., Sentelhas, P. C., Gonçalves, J. L. M., & Sparovek, G. (2013). Köppen's climate classification map for Brazil. Meteorologische Zeitschrift, 22(6), 711–728.

Araujo, S. D. L., Protázio, L. B., Gimenez, G. G., Barros, U. D. O., Castor, T. C., Silva, D. F. S. H. S., ... & Vidaurre, G. B. (2025). Sampling strategies along the tree stem to determine the basic density of Eucalyptus wood. CERNE, 31, e103500.

Caixeta, R. P., Trugilho, P. F., Rosado, S. C. D. S., & Lima, J. T. (2003). Propriedades e classificação da madeira aplicadas à seleção de genótipos de Eucalyptus. Revista Árvore, 27(1), 43–51.

Costa, A. C. S., Leal, C. S., Santos, L. C., Carvalho, A. M. M. L., Oliveira, A. C., & Pereira, B. L. C. (2017). Propriedades da madeira de cerne e alburno de Eucalyptus camaldulensis. Revista Ciência da Madeira (Brazilian Journal of Wood Science), 8(1).

Gomes, G. S., Galvão, W. R., Souza, A. C., Morais, R. O., Santos, R. S., Amorim, S. M. C. S., ... & Raabe, J. (2025). Caracterização de propriedades físicas e anatômicas de clones de Eucalyptus spp. para a aplicação de agentes preservantes. Caderno Pedagógico, 22(1), e13520.

Haselein, C. R., Lopes, M. D. C., Santini, E. J., Longhi, S. J., Rosso, S., Fernandes, D. L., & Menezes, L. F. D. (2004). Características tecnológicas da madeira de árvores matrizes de Eucalyptus grandis. Ciência Florestal, 14(2), 145–155.

Magalhães, L. G. S., Lima, A. P. L., Lima, S. F., Soratto, D. N., Martins, S. M., & Santos, I. F. F. (2020). Densidade básica da madeira de clones de eucalipto em diferentes espaçamentos. Brazilian Journal of Development, 6(4), 19435–19445.

Mauri, R. (2010). Relação cerne/alburno de clones de Eucalyptus urophylla × Eucalyptus grandis em diferentes regiões de cultivo (Dissertação de mestrado). Universidade de São Paulo.

Morais, M. C., & Pereira, H. (2007). Heartwood and sapwood variation in Eucalyptus globulus Labill. trees at the end of rotation for pulp wood production. Annals of Forest Science, 64(6), 665–671.

Portz, M. T., Barros, W. T., Conceição Júnior, V., Barreto-Garcia, P. A. B., & Silva, M. D. S. (2020). Variáveis dendrométricas de clones de eucalipto, aos seis anos de idade, no sudoeste da Bahia. Semana de Agronomia da UESB (SEAGRUS), 2(1).

Sette Jr., C. R., Oliveira, I. R., Tomazello Filho, M., Yamaji, F. M., & Laclau, J. P. (2012). Efeito da idade e posição de amostragem na densidade e características anatômicas da madeira de Eucalyptus grandis. Revista Árvore, 36, 1183–1190.

Viana, L. C., Trugilho, P. F., Hein, P. R. G., Lima, J. T., & Silva, J. R. M. (2009). Predicting the morphological characteristics and basic density of Eucalyptus wood using the NIRS technique. CERNE, 15(4), 421–429.

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Variação longitudinal da velocidade de propagação de ondas em clones de *Eucalyptus* spp.

Henzza Ferreira Rocha[1]; Nathalia Gabriele Franca Dias Polido[1]; Náthali dos Santos Toniato Alves[1]; Davi Rogério Guimarães[1]; Maria Eduarda Meira Pratti [1]; Daniele Ingrid Moreira Damásio[1]; Graziela Baptista Vidaurre[1]; Rejane Costa Alves[1]

[1] Universidade Federal do Espírito Santo

Resumo: A variabilidade das propriedades da madeira ao longo do fuste é importante para a caracterização tecnológica e para a seleção de materiais genéticos em programas de melhoramento florestal. Nesse contexto, métodos não destrutivos, como a avaliação por ondas de tensão, permitem estimar diferenças na qualidade da madeira de forma rápida e com menor alteração do material. Este trabalho teve como objetivo avaliar a variação longitudinal da velocidade de propagação de ondas de tensão em seis clones de *Eucalyptus* spp. aos sete anos de idade. Foram avaliadas cinco árvores por clone, totalizando 30 árvores. Após a derrubada, foram retirados toretes nas posições correspondentes a 0%, diâmetro à altura do peito (DAP), 25%, 50%, 75% e 100% da altura comercial. As leituras foram realizadas no sentido diametral, utilizando o equipamento Fakopp Microsecond Timer. A velocidade média geral foi de 1322,02 m s^{-1}, com médias entre clones variando de 1267,52 a 1381,27 m s^{-1}. Todos os clones apresentaram maiores velocidades na região basal e redução em direção ao topo do fuste. Os resultados demonstram que a posição longitudinal influencia a propagação das ondas de tensão e deve ser considerada na caracterização tecnológica da madeira.

Palavras-chave: Qualidade da madeira; Ensaios não destrutivos; Amostragem vertical.

Longitudinal variation of stress wave velocity in Eucalyptus spp. clones

Abstract: Wood property variability along the stem is important for technological characterization and for selecting genetic materials in forest breeding programs. In this context, nondestructive methods, such as stress wave evaluation, allow rapid estimation of differences in wood quality with less alteration of the material. This study aimed to evaluate the longitudinal variation of stress wave propagation velocity in six seven-year-old Eucalyptus spp. clones. Five trees were evaluated per clone, totaling 30 trees. After felling, logs were collected from the positions corresponding to 0%, diameter at breast height (DBH), 25%, 50%, 75%, and 100% of the commercial height. Readings were performed in the diametral direction using a Fakopp Microsecond Timer. The overall mean velocity was 1322.02 m s^{-1}, with clone means ranging from 1267.52 to 1381.27 m s^{-1}. All clones showed higher velocities in the basal region and a reduction toward the top of the stem. The results demonstrate that longitudinal position influences stress wave propagation and should be considered in the technological characterization of wood.

Keywords: Wood quality; Nondestructive testing; Vertical sampling.

1. Introdução

A madeira é um material biológico heterogêneo, cujas propriedades variam em função de fatores genéticos, idade, crescimento, posição no fuste e condições ambientais (Bouslimi et al., 2022). No setor florestal, a madeira de Eucalyptus spp. ocupa posição estratégica, sendo utilizada em cadeias produtivas como celulose, energia, painéis, madeira serrada e produtos engenheirados (Hua et al., 2022). Nesse contexto, métodos capazes de identificar diferenças entre clones, entre árvores e dentro da própria árvore podem contribuir para decisões mais seguras de seleção, manejo e aproveitamento da madeira.

Ao longo do fuste, a madeira pode apresentar variações em densidade, umidade e organização anatômica, influenciando seu comportamento físico-mecânico (Pimenta et al., 2024). Assim, embora a amostragem em uma única posição seja mais simples, ela pode não representar toda a variabilidade existente na árvore (Araújo et al., 2025).

Os ensaios não destrutivos têm se consolidado como alternativas para avaliar propriedades da madeira sem comprometer integralmente o material. Esses métodos utilizam respostas físicas, como propagação de ondas, vibração, resistência à perfuração e interação com radiação, para inferir características relacionadas à qualidade do lenho (Ondrejka et al., 2021). Entre eles, a avaliação por ondas de tensão se baseia na propagação de uma onda mecânica pela madeira, sendo o Fakopp Microsecond Timer uma das ferramentas utilizadas para mensurar o tempo de propagação entre dois transdutores (Esteban et al., 2025).

Medições acústicas podem auxiliar na estimativa de propriedades mecânicas e na identificação de variações na madeira (Arriaga et al., 2023; Van Duong & Hasegawa, 2024). No entanto, sua interpretação deve considerar fatores como sentido de propagação, dimensões da amostra, umidade e variabilidade natural do material (Nascimento et al., 2025). Por isso, ainda são relevantes estudos que descrevam como a velocidade das ondas de tensão varia ao longo do fuste em clones de Eucalyptus spp., especialmente em posições representativas da altura comercial (Kravetz et al., 2025; Duchesne et al., 2025).

Diante disso, este trabalho teve como objetivo avaliar a variação longitudinal da velocidade de propagação de ondas de tensão ao longo do fuste de seis clones de Eucalyptus spp. aos sete anos de idade.

2. Material e métodos

2.1 Material avaliado

O estudo foi conduzido com seis clones de *Eucalyptus* spp., identificados como C1 a C6, aos sete anos de idade. Para cada clone foram avaliadas cinco árvores, totalizando 30 árvores. Após a seleção e derrubada das árvores, foram retirados toretes no sentido base-topo.

2.2 Avaliação da velocidade de propagação das ondas de tensão

As avaliações da velocidade de propagação das ondas de tensão foram conduzidas em toretes retirados nas posições correspondentes a 0%, DAP, 25%, 50%, 75% e 100%.

Em cada posição de amostragem, o diâmetro do torete foi mensurado. As medições foram realizadas com o equipamento Fakopp Microsecond Timer, modelo Microsecond Timer, da marca FAKOPP, composto por dois transdutores. O primeiro transdutor atuou como emissor da onda, gerada por impactos mecânicos aplicados com martelo, enquanto o segundo transdutor registrou o tempo de chegada da onda após sua passagem pela madeira.

Em cada amostra, foram realizados três impactos sucessivos no transdutor emissor, sendo definido como tempo representativo de propagação o valor que mais se repetiu entre as medições. Esse procedimento foi utilizado com o objetivo de reduzir a influência de possíveis variações pontuais durante a medição, como diferenças na intensidade do impacto, no contato entre transdutor e madeira ou na leitura registrada pelo equipamento.

A velocidade de propagação das ondas de tensão foi determinada pela razão entre a distância percorrida pela onda e o tempo de propagação registrado, conforme a Equação 1.

$$V = \frac{d}{t} \quad (1)$$

V = velocidade de propagação das ondas de tensão na madeira, m s^{-1};
d = distância percorrida pela onda, correspondente ao diâmetro do torete, m;
t = tempo de propagação da onda, s.

2.3 Organização e análise dos dados

Inicialmente, foram calculadas, no *Microsoft Excel*, as estatísticas descritivas da velocidade média das ondas de tensão entre árvores, incluindo valores máximo, médio e mínimo, desvio padrão e coeficiente de variação. Em seguida, foi calculada a amplitude da velocidade dentro da árvore, considerando a diferença entre as posições de maior e menor velocidade para cada clone.

Para visualizar a tendência de variação ao longo do fuste, foram elaborados, no software *SigmaPlot*, perfis longitudinais de velocidade para cada clone, considerando as médias obtidas nas posições respectivamente. A média de cada clone foi representada como linha vertical de referência, permitindo comparar a posição de cada ponto em relação ao comportamento médio do respectivo material genético.

3. Resultados e discussão

Os valores de velocidade de propagação das ondas de tensão apresentaram variação entre clones e ao longo das posições longitudinais do fuste. A velocidade de propagação média geral entre árvores foi de 1322,02 m s^{-1}, com médias por clone variando de 1267,52 m s^{-1} (C5) a 1381,27 m s^{-1} (C1) (Tabela 1). Vale destacar que os toretes estavam saturados com umidade variando de 97,06% para o clone C2 a 142,63% para o C3 .

Tabela 1 – Estatística descritiva da velocidade média das ondas de tensão entre árvores

Variáveis	C1	C2	C3	C4	C5	C6
Média [$m.s^{-1}$]	1381 (1183*; 1689**)	1314 (1045; 1441)	1340 (1113; 1598)	1326 (1032; 1518)	1267 (1048; 1539)	1302 (1107; 1521)
Desvio-padrão [$m \cdot s^{-1}$]	112,76	120,36	117,56	127,82	114,70	110,96
Coeficiente de variação [%]	8,16	9,16	8,77	9,64	9,05	8,52

Os valores entre parênteses correspondem aos valores mínimo (*) e máximo (**) observados em cada clone.

Apesar dessa variação, a amplitude entre as médias foi reduzida, indicando comportamento relativamente homogêneo dos materiais quanto à propagação das ondas. Essa proximidade pode estar associada, em parte, à realização dos ensaios com a madeira em condição saturada, uma vez que, acima do ponto de saturação das fibras, a influência da umidade sobre as propriedades elásticas da parede celular torna-se significativa (Gonçalves et al., 2018). Dessa forma, as diferenças observadas tendem a refletir principalmente as características intrínsecas de cada clone, como densidade, estrutura anatômica e rigidez da madeira, e não variações no teor de umidade acima do PSF (Yassine & Mustapha, 2024).

Os coeficientes de variação inferiores a 10%, para todos os clones, variando de 8,16%, no C1, a 9,64%, no C4 indicam baixa dispersão dos resultados e elevada uniformidade das medições, sugerindo boa repetibilidade do ensaio de ondas de tensão nas condições experimentais adotadas. Embora o clone C1 tenha apresentado a maior velocidade média e o clone C5 a menor, essas diferenças foram relativamente discretas, propondo que a condição saturada contribuiu para reduzir a variabilidade associada ao teor de umidade, permitindo uma comparação mais consistente entre os materiais.

A literatura mostra que a velocidade de ondas de tensão está associada à rigidez dinâmica e ao desempenho mecânico da madeira. Virgen-Cobos et al. (2022) destacaram que medições acústicas em árvores em pé, incluindo ondas de impacto obtidas com o Microsecond Timer, podem auxiliar na estimativa de propriedades mecânicas. Duchesne et al. (2025) verificaram relações entre a velocidade acústica e o módulo de elasticidade, com R^2 de 0,068 a 0,097 em árvores, 0,262 a 0,430 em fustes e 0,265 a 0,469 em toras. De forma semelhante, Van Duong e Schimleck (2022) encontraram correlações entre ondas de tensão e propriedades de flexão em clones de

Eucalyptus spp., com r = 0,61 e 0,53 para módulo de elasticidade e módulo de ruptura em árvores, e r = 0,76 e 0,71 em toras. Esses resultados reforçam o potencial dos métodos acústicos na avaliação tecnológica da madeira, embora a velocidade isolada não substitua a caracterização completa das propriedades físicas e mecânicas.

Em relação à variação longitudinal, para todos os clones avaliados, a maior velocidade ocorreu na posição 0%, correspondente à base do fuste, enquanto os menores valores foram registrados na posição 100% (Tabela 2).

Tabela 2 – Amplitude da velocidade média das ondas de tensão dentro da árvore

Clones	Posição de máximo	Posição de mínimo	Amplitude dentro da árvore (m s^{-1})
C1	0	100	505,89
C2	0	100	395,24
C3	0	100	484,80
C4	0	100	422,86
C5	0	100	490,21
C6	0	100	413,49
Média geral	**0**	**100**	**452,08**

Todos os clones apresentaram, descritivamente, o mesmo padrão geral de distribuição longitudinal da velocidade de propagação das ondas, com os maiores valores registrados na base (0%) e os menores no topo (100%). Esse comportamento demonstra uma tendência consistente de redução da velocidade no sentido base-topo nos materiais avaliados.

A amplitude dentro da árvore variou de 395,24 m s^{-1} (C2) a 505,89 m s^{-1} (C1), com média de 452,08 m s^{-1}. Descritivamente, essa amplitude foi aproximadamente quatro vezes superior à diferença observada entre as velocidades médias dos clones (114 m s^{-1}; Tabela 1), destacando a expressiva variação dos valores ao longo do fuste. Entretanto, como não foram realizadas análises inferenciais para comparar os efeitos de clone e posição longitudinal, essa relação deve ser interpretada apenas de forma descritiva. Dessa forma, a posição de medição deve ser considerada na interpretação dos resultados obtidos pela propagação de ondas de tensão.

A ocorrência dos maiores valores na base pode estar associada à maior maturidade relativa do lenho nessa região, bem como a possíveis diferenças de densidade, organização anatômica e proporção de madeira juvenil (Zanuncio et al., 2022). Entretanto, como a velocidade acústica é influenciada por múltiplos fatores, a

tendência observada deve ser interpretada como uma evidência do comportamento longitudinal da onda, e não como diagnóstico isolado.

O perfil dos clones evidencia que, apesar de todos apresentarem redução da velocidade no sentido base-topo, a intensidade dessa redução variou entre materiais genéticos (Figura 2). O

clone C2 apresentou queda mais acentuada na posição 100%, enquanto o clone C1 manteve valores relativamente mais elevados ao longo das posições, principalmente nas regiões inferiores e intermediárias.

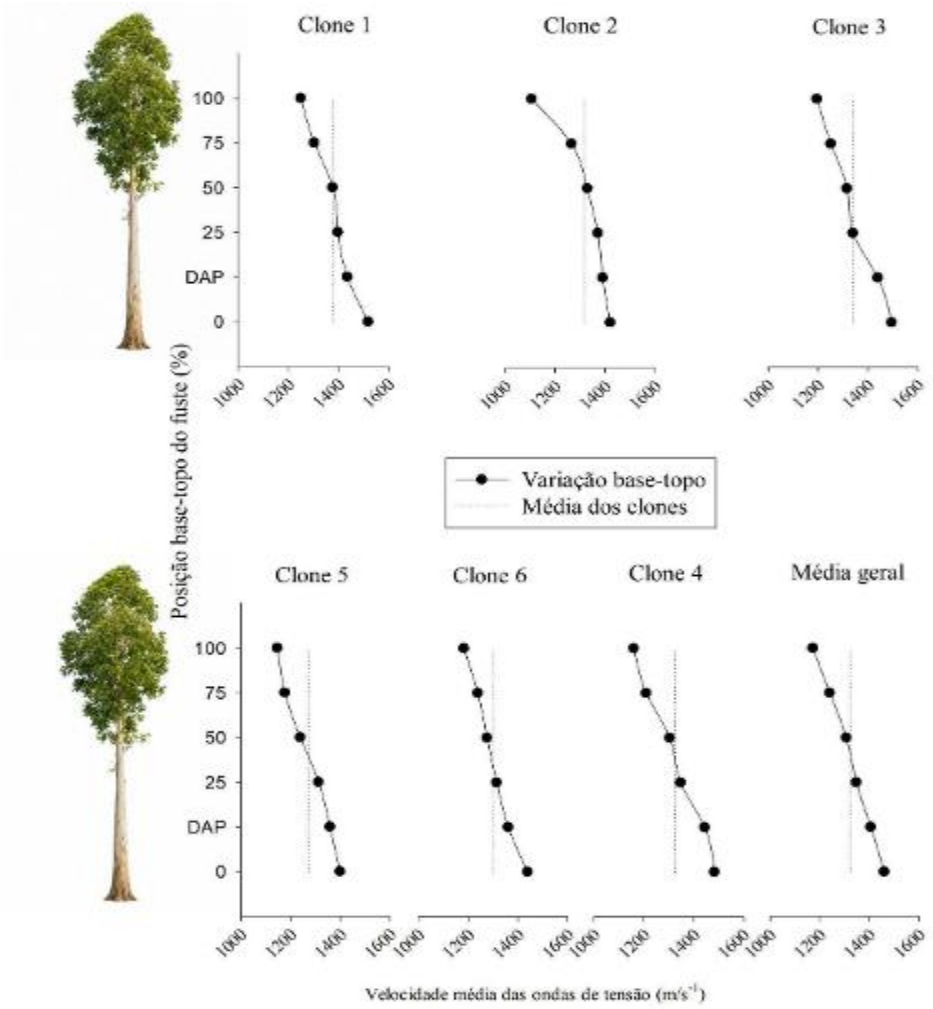


Figura 2 – Perfil da variação longitudinal da velocidade média (m/s-¹) das ondas de tensão em clones de *Eucalyptus* spp. A linha tracejada indica a média de cada clone.

A diferença entre os perfis observados demonstra que a variação longitudinal não deve ser interpretada apenas com base na média geral de cada clone, uma vez que a distribuição dos valores ao longo da árvore também fornece informações relevantes sobre a heterogeneidade da matéria-prima (Pimenta et al., 2024). Esse aspecto merece atenção, pois a propagação de ondas

na madeira pode ser influenciada por diferentes fatores, como orientação das fibras, umidade, densidade e organização estrutural do lenho (Bucur, 2023). Descritivamente, os clones apresentaram diferentes padrões de variação da velocidade ao longo do fuste, enquanto a média geral das árvores indicou tendência de redução da velocidade da base para o topo. Dessa forma, os resultados evidenciam a importância de considerar a posição longitudinal nas avaliações acústicas, especialmente quando se busca representar o comportamento do fuste como um todo. Tendência semelhante de variação longitudinal da velocidade foi relatada por Van Duong et al. (2025).

Os resultados obtidos neste trabalho apresentam comportamento semelhante ao observado por Conceição (2026) em estudo sobre amostragem da densidade básica, no qual posições intermediárias do fuste demonstraram maior capacidade de representar o comportamento médio da árvore. O autor verificou que a posição de 37,5% teve melhor desempenho quando considerada uma única posição amostral, enquanto a estratégia com três posições envolveu 0%, 33% e 75% do fuste. De forma complementar, no presente estudo, as posições entre 25% e 50% da altura comercial apresentaram velocidades mais próximas da média geral, indicando maior representatividade do comportamento acústico médio dos clones.

Essa convergência evidencia que regiões intermediárias do fuste possuem potencial para representar propriedades médias da madeira, reduzindo a influência dos extremos longitudinais. Entretanto, a inclusão de posições próximas à base e ao topo, como observado no estudo de densidade básica, pode ser necessária quando o objetivo é capturar toda a amplitude de variação ao longo do fuste.

4. Conclusões

A velocidade de propagação das ondas de tensão apresentou diferenças numéricas entre os clones de Eucalyptus spp. e entre as posições longitudinais avaliadas, evidenciando a variabilidade do comportamento acústico da madeira.

Em todos os clones, os maiores valores foram registrados na base do fuste (0%) e os menores no topo (100%), caracterizando uma tendência de redução da velocidade no sentido base-topo. A amplitude média observada entre as posições longitudinais foi de 452,08 m s^{-1}.

Dessa forma, a posição de amostragem deve ser considerada nas avaliações não destrutivas por ondas de tensão, uma vez que foram observadas variações na velocidade ao longo do fuste. O método apresentou potencial para auxiliar na caracterização tecnológica da madeira e na avaliação de sua variabilidade longitudinal.

5. Agradecimentos

À Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação do Espírito Santo (FAPES) e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelo apoio financeiro e pela concessão de bolsas, e à Suzano S.A., pelo fornecimento do material genético.

6. Referências bibliográficas

Araujo, S. L., Protázio, L. B., Gimenez, G. G., Barros Junior, U. de O., Castor Neto, T. C., Silva, D. F. S. H. S., Rezende, D. A. N., Almeida, M. N. F., Silva, J. G. M., & Vidaurre, G. B. (2025). Sampling strategies along the tree stem to determine the basic density of *Eucalyptus* wood. *Cerne*, *31*(1), e-103500. https://doi.org/10.1590/01047760202531013500

Arriaga, F., Wang, X., Íñiguez-González, G., Llana, D. F., Esteban, M., & Niemz, P. (2023). Mechanical properties of wood: A review. *Forests*, *14*(6), 1202. https://doi.org/10.3390/f14061202

Bouslimi, B., Koubaa, A., & Bergeron, Y. (2022). Regional, site, and tree variations of wood density and growth in *Thuja occidentalis* L. in the Quebec forest. *Forests*, *13*(12), 1984. https://doi.org/10.3390/f13121984

Bucur, V. (2023). A review on acoustics of wood as a tool for quality assessment. *Forests*, *14*(8), 1545. https://doi.org/10.3390/f14081545

Duchesne, I., Tong, Q., & Coursolle, C. (2025). Acoustic velocity at the tree, log, and lumber levels and their relationship with lumber bending properties. *Canadian Journal of Forest Research*, *55*, 1–15. https://doi.org/10.1139/cjfr-2025-0065

Esteban, M., Olvera-Licona, G., Virgen-Cobos, G. H., & Bobadilla, I. (2025). Comparison of acoustic tomography and drilling resistance for the internal assessment of urban trees in Madrid. *Forests*, *16*(7), 1125. https://doi.org/10.3390/f16071125

Kravetz, C., Bertoldo, C., Lorensani, R., & Ferreira, K. (2025). Interference of edaphoclimatic variations on nondestructive parameters measured in standing trees. *Forests, 16*(3), 535. https://doi.org/10.3390/f16030535

Lee, S. H., Lum, W. C., Antov, P., Kristak, L., & Tahir, P. M. (2022). Engineering wood products from *Eucalyptus* spp. *Advances in Materials Science and Engineering, 2022*, Article 8000780. https://doi.org/10.1155/2022/8000780

Nascimento, C. S., Araújo, R. D., Nascimento, C. C., Higuchi, A. M. D., Santos, J., & Higuchi, N. (2025). Stiffness of wood from two hyperdominant species in Central Amazon evaluated by different nondestructive methodologies. *Acta Amazonica, 55*, e55mt24291. https://doi.org/10.1590/1809-4392202402912

Ondrejka, V., Gergeľ, T., Bucha, T., & Pástor, M. (2021). Innovative methods of non-destructive evaluation of log quality. *Central European Forestry Journal, 67*, 3–13. https://doi.org/10.2478/forj-2020-0021

Pimenta, E. M., Ramalho, F. M. G., Dambroz, G. B. V., Couto, A. M., Campoe, O. C., & Hein, P. R. G. (2024). Planting spacing and genotype affected the tree growth and variation of wood density and lignin content along *Eucalyptus* trunks. *Industrial Crops and Products, 222*(Part 2), 119595. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2024.119595

Van Duong, D., & Hasegawa, M. (2024). Relationship between acoustic wave velocity and mechanical properties in *Acacia mangium* wood. *Maderas. Ciencia y Tecnología, 26*, 33, 1–10. https://doi.org/10.22320/s0718221x/2024.33

Van Duong, D., Schimleck, L., Tran, D. L., & Vo, H. D. (2022). Radial and among-clonal variations of the stress-wave velocity, wood density, and mechanical properties in 5-year-old *Acacia auriculiformis* clones. *BioResources, 17*(2), 2084–2096. https://doi.org/10.15376/biores.17.2.2084-2096

Virgen-Cobos, G. H., Olvera-Licona, G., Hermoso, E., & Esteban, M. (2022). Nondestructive techniques for determination of wood mechanical properties of urban trees in Madrid. *Forests, 13*(9), 1381. https://doi.org/10.3390/f13091381

Zanuncio, A. J. V., Possato, E. L., Carvalho, A. G., Lopes, O. P., & Castro, V. R. de. (2022). Basic density and scaling of juvenile and mature wood in *Pinus caribaea* trees. *Cellulose Chemistry and Technology, 56*(5–6), 473–479. https://doi.org/10.35812/CelluloseChemTechnol.2022.56.42

Gonçalves, R., Mansini-Lorensani, R. G., Negreiros, T. O., & Bertoldo, C. (2018). Moisture-related adjustment factor to obtain a reference ultrasonic velocity in structural

lumber of plantation hardwood. *Wood Material Science & Engineering, 13*(5), 254–261. https://doi.org/10.1080/17480272.2017.1313312

Yassine, R., & Mustapha, S. (2024). The effect of moisture content and temperature on the propagation characteristics of guided waves in timber utility poles: Numerical and

experimental validation. Wood Science and Technology, 58, 533–573. https://doi.org/10.1007/s00226-023-01528-9

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

VARIAÇÃO LONGITUDINAL, RADIAL E EFEITO DA CLASSE DIAMÉTRICA NA DENSIDADE BÁSICA DA MADEIRA DE *Eucalyptus cloeziana*

Vanuzia Rodrigues Fernandes Ferreira[1]; José Reinaldo Moreira da Silva[1]; Thiago de Paula Protásio[1]; Ana Luiza de Jesus Dias[1]; Maria Fernanda Martins Vilas Boas[1]; Genilson Maia Corrêa[1]; Elvis Vieira dos Santos[1]; Paulo Fernando Trugilho[1]

[1] Universidade Federal de Lavras, Escola de Ciências Agrárias de Lavras, Departamento de Ciências Florestais

Resumo: A densidade básica é importante índice de qualidade, pois possui relação com características e produtos da madeira. Na árvore a densidade básica varia tanto no sentido radial como longitudinal. O objetivo da pesquisa foi avaliar a variação longitudinal, radial e o efeito da classe diamétrica na densidade básica da madeira de *Eucalyptus cloeziana*. A madeira do *Eucalyptus cloeziana* com idade variando de 17 a 18 anos foi utilizada. Três árvores representativas foram selecionadas no plantio comercial, dentro das classes diamétricas de 17cm, 22cm e 26cm, consideradas, respectivamente, de fina, média e grossa. A densidade básica foi determinada em seis posições longitudinais ao fuste da árvore. Na posição do diâmetro a altura do peito foi determinada a variação radial da densidade básica. A densidade básica foi maior nas classes diamétricas de 22cm (0,727g/cm^3) e 26cm (0,664 g/cm^3) e menor na de 17cm (0,622 g/cm^3). A variação longitudinal mostrou padrão crescente da densidade básica até 75% seguido de queda em 100% da altura da árvore, exceto na classe 17cm de diâmetro. A variação radial foi semelhante em todas as classes e mostrou padrão crescente da densidade básica da medula para a casca.

Palavras-Chave: Padrão de variação; Eucalipto; Índice de qualidade

LONGITUDINAL AND RADIAL VARIATION AND EFFECT OF DIAMETER CLASS ON BASIC DENSITY OF *Eucalyptus cloeziana* WOOD

Abstract: Basic density is an important quality index because it is related to the characteristics and products of the wood. In the tree, basic density varies both radially and longitudinally. This research aimed to evaluate the longitudinal and radial variation and the effect of diameter class on the basic density of *Eucalyptus cloeziana* wood. *Eucalyptus cloeziana* wood aged 17 to 18 years was used. Three representative trees were selected from the commercial plantation, within the diameter classes of 17cm, 22cm, and 26cm, considered, respectively, thin, average and thick. Basic density was determined at six longitudinal positions along the tree stem. The radial variation of basic density was determined at the breast height diameter position. Basic density was highest in the diameter classes of 22cm (0.727g/cm^3) and 26cm (0.664 g/cm^3) and lowest in the 17cm class (0.622 g/cm^3). Longitudinal variation showed increasing pattern of basic density

up to 75% followed by decrease at 100% of the tree height, except in the 17cm diameter class. Radial variation was similar in all classes and showed increasing pattern of basic density from the pith to the bark.

Keywords: Variation pattern; Eucalypt; Quality index

1. Introdução

A madeira é um material que apresenta variações tanto do ponto de vista químico, físico, mecânico e anatômico. Estas variações ocorrem devido a fatores como o genótipo, ambiente e a interação entre o genótipo e o ambiente, além da idade, das práticas silviculturais, nutrição, entre outras.

A caracterização física, química, anatômica e mecânica da madeira é atividade necessária para se definir a sua melhor forma de utilização. Dentre as características físicas, a densidade básica é definida como sendo importante índice de qualificação, pois está relacionada a vários produtos e características da madeira. Esta característica representa a relação entre a massa seca pelo volume verde ou saturado, sendo, portanto, a menor densidade que a madeira pode assumir.

Na árvore, a densidade básica pode variar no sentido longitudinal ao fuste e também no sentido radial, ou seja, da medula para a casca. A variação longitudinal da densidade básica apresenta padrão crescente, decrescente ou não conclusiva, enquanto a variação radial geralmente apresenta padrão crescente da medula para a casca. Couto et al. (2012) observaram padrão de variação longitudinal da densidade básica com a tendência de decréscimo inicial, acréscimo e decréscimo final em 46 clones de *Eucalyptus* sp. aos 42 meses de idade, plantados em Minas Gerais. Cacau et al. (2023), estudando dois clones de eucalipto, observaram tendências distintas de variação longitudinal da densidade básica média entre os clones, onde um clone, de forma geral, apresentou redução da densidade no sentido base-topo, enquanto no outro clone os valores foram semelhantes na base e no topo. Downes et al. (1997) relataram a ocorrência de diferentes padrões de variação da densidade básica da madeira, tanto no sentido longitudinal como radial.

Segundo Malan (1995) a variação no sentido radial é de longe a mais importante fonte de variação. A extensão dessa variação é determinada, principalmente, pela presença da madeira juvenil, pela sua proporção relativa no tronco e pelas suas características físico-químicas e

anatômicas. A elevação do gradiente de variação dentro da zona juvenil diminui com o passar do tempo. Essa variação influenciará na forma de uso final da madeira (Trugilho et al., 2005).

O efeito dos tratamentos silviculturais afetam as características de crescimento da árvore, mas na literatura usual existem muitas controvérsias. Em algumas pesquisas, por exemplo, a densidade básica da madeira, tende a aumentar com

a redução do espaçamento das árvores, mas este efeito não é consensual, pois pode ocorrer o efeito contrário também. Moulin et al. (2017), avaliando os efeitos de espaçamento e irrigação em clones de eucaliptos, mostraram que o espaçamento de plantio influenciou na densidade básica da madeira de apenas em um dos clones e a irrigação não influenciou nos valores da densidade básica da madeira nos clones.

Na literatura existem informações controversas também sobre o efeito do diâmetro da árvore sobre a densidade básica da madeira. Em algumas pesquisas o efeito da classe diamétrica é positivo, em outras, negativo e também pode ser sem padrão definido. Por exemplo, Pádua (2009), avaliando um clone híbrido de eucalipto, observaram, em quatro diferentes métodos de amostragem, que a densidade básica apresentou tendência de aumento com a classe de diâmetro.

Dentro deste contexto, o objetivo da pesquisa foi avaliar a variação longitudinal, radial e o efeito da classe diamétrica na densidade básica da madeira de *Eucalyptus cloeziana*.

2. Material e Métodos

Este trabalho utilizou a madeira do *Eucalyptus cloeziana* com idade variando de 17 a 18 anos. O plantio foi realizado pela empresa Agropecuária Minas Novas e Ótima Empreendimentos e Construções no ano de 2007 em espaçamento de 3m x 2m e estava localizado no município de Cláudio/MG.

No plantio foram selecionadas três árvores representativas, uma com diâmetro de 17cm, considerada fina, outra de 22cm, considerada média, e a terceira com 26cm, considerada grossa. Essa distribuição diamétrica foi conduzida com base no inventário florestal da área do plantio. As alturas totais das árvores eram de 18,70m, 24,94m e 33,30m, respectivamente, para as árvores fina, média e grossa.

A amostragem no fuste das árvores para a determinação da densidade básica da madeira foi a de retirada de discos, considerando as posições longitudinais de 0% (base), diâmetro a altura do peito (DAP), 25%, 50%, 75% e 100% da altura total da árvore. Estas posições foram

usadas para determinar a densidade básica média aritmética (DBm) da árvore por classe diamétrica. Nestas alturas foram retirados discos de aproximadamente 2,5 cm de espessura. Na posição do DAP foi retirado um disco adicional, que foi utilizado para o estudo da variação radial.

Os discos foram encaminhados para o Laboratório Multiusuário de Biomateriais e Energia da Biomassa do Departamento de Ciências Florestais da Universidade Federal

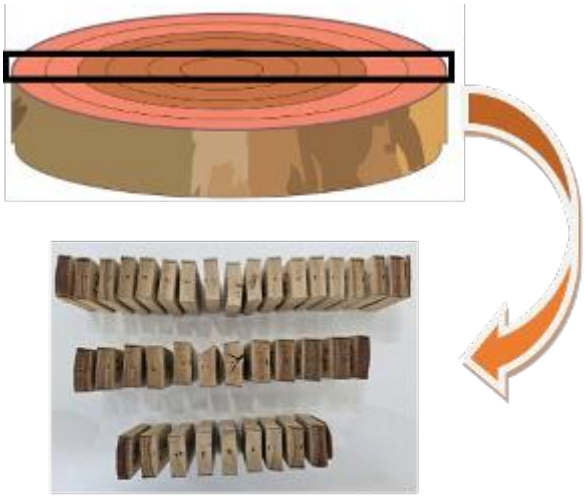
de Lavras para a determinação da densidade básica da madeira, conforme a norma NBR 11941 (ABNT, 2003) e metodologia descrita por Vital (1984).

No disco extra retirado da posição do DAP, utilizado para o estudo da variação radial, foi retirada uma bagueta radial de lado a lado, de 2,0cm de largura. A bagueta foi subdividida em peças de 1,0cm de espessura de lado a lado, conforme mostra a Figura 1. As peças foram saturadas em água dentro de recipiente que permitia a aplicação de vácuo, necessário para acelerar o processo de saturação da madeira e obtenção do volume saturado das peças individuais. Após este procedimento as peças foram secas em estufa calibrada a 103 ± 2ºC, até atingirem a massa constante. Em seguida as amostras foram pesadas e determinada as suas massas secas. A densidade básica foi determinada conforme a equação 1.

$$DB = \frac{MS}{Vsat} \quad (1)$$

em que: DB é a densidade básica (g/cm^3), MS é a massa seca (g) e Vsat é o volume saturado (cm^3).

Figura 1 – Esquema da amostragem no disco do DAP e saturação das peças



Peças de madeira para estudo da variação radial nas três classes de diâmetro na posição do DAP.

3. Resultados e Discussão

Os valores médios de densidade básica por classes de diâmetro estão na Tabela 1. Observa-se que a classe diamétrica de 22cm foi a que apresentou o maior valor médio de densidade básica, enquanto a menor classe diamétrica (17cm) o menor valor. Este resultado foi diferente ao encontrado por Pádua et al. (2009), em que a autora verificou aumento da densidade básica com o aumento da classe de diâmetro em um clone de híbrido de eucalipto. No entanto, relações negativas entre crescimento e a densidade básica podem ser encontradas para clones específicos de *Eucalyptus* em função das condições ambientais básica (Costa et al., 2020). Em condições de baixa temperatura, clones de *Eucalyptus urophylla* tiveram incremento do volume e redução da densidade básica (Costa et al., 2020).

Tabela 1 – Valores médios de densidade básica por classe de diâmetro

Classe de Diâmetro (cm)	Densidade Básica (g/cm^3)
17,0	0,622
22,0	0,727
26,0	0,664

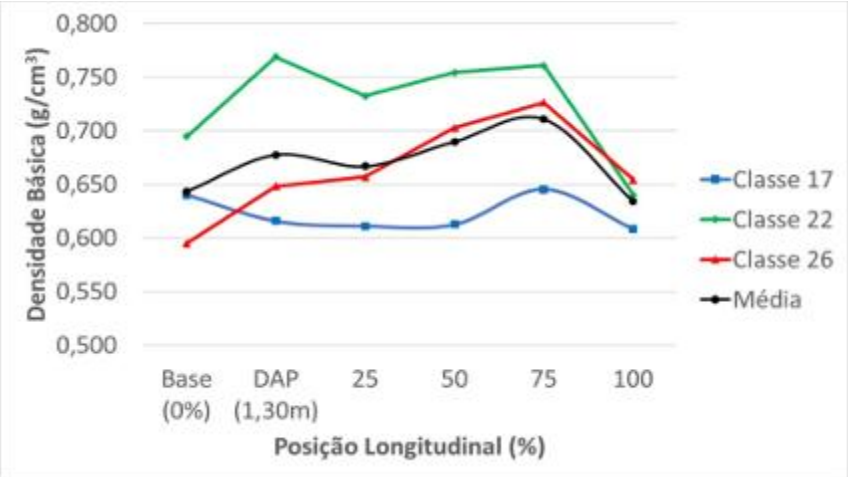
A Figura 2 mostra a variação da densidade básica da madeira em função das posições longitudinais de amostragem no fuste das árvores de *Eucalyptus cloeziana*. Pode-se observar que a variação longitudinal mostrou padrão crescente da densidade básica até 75% seguido de queda em 100% da altura da árvore, exceto na classe 17cm de diâmetro, que mostrou padrão decrescente da densidade básica até 50% da altura, aumento até 75% e queda em 100% da altura da árvore. Na média, o padrão de variação longitudinal segue o observado nas classes de maiores diâmetros. Para a classe de diâmetro 17 cm e 22 cm, a densidade básica encontrada no DAP se aproxima da densidade básica média das árvores. Já para a classe 26 cm, a posição de 25% se aproxima de forma mais precisa da densidade média da árvore dessa classe diamétrica.

A variação da densidade dentro da árvore é importante, pois influencia diversos usos da madeira. Para produção de carvão vegetal, a densidade básica da madeira irá

influenciar na densidade aparente do carvão vegetal e suas propriedades mecânicas (Abreu Neto et al., 2020). Alta variação deste parâmetro dentro da árvore resultará em

alta heterogeneidade do carvão vegetal. As classes 22 e 26 cm apresentaram as maiores variações da densidade (0,640 g/cm³ - 0,770 g/cm³ e 0,590 g/cm³ - 0,720 g/cm³, respectivamente). Embora com menor valor de densidade básica média da árvore, a classe 17 cm apresentou menor variação, entre 0,610 g/cm³ - 0,640 g/cm³.

Figura 2 – Padrão da variação longitudinal da densidade básica nas classes diamétricas



As Figuras 3, 4 e 5 mostram o padrão de variação radial da densidade básica da madeira para as três classes de diâmetro, respectivamente. Observa-se que o padrão de variação radial foi o mesmo para as três classes de diâmetro, ou seja, a densidade básica da madeira aumenta da posição da medula para a casca. O modelo quadrático foi o de tendência observado nas três classes de diâmetro e apresentaram bons coeficientes de determinação (R^2). Houve grande variação da densidade básica radialmente, com amplitudes entre cerca de 0,420 g/cm³ e 0,800 g/cm³.

Figura 3 – Padrão da variação radial da densidade básica na classe de diâmetro de 17cm

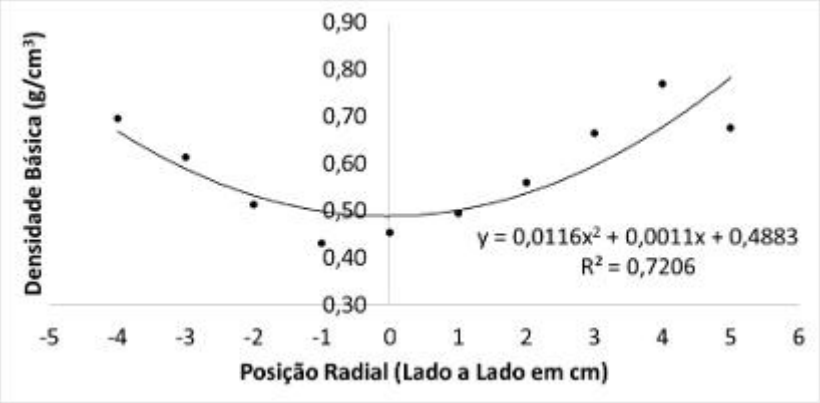


Figura 4 – Padrão da variação radial da densidade básica na classe de diâmetro de 22cm

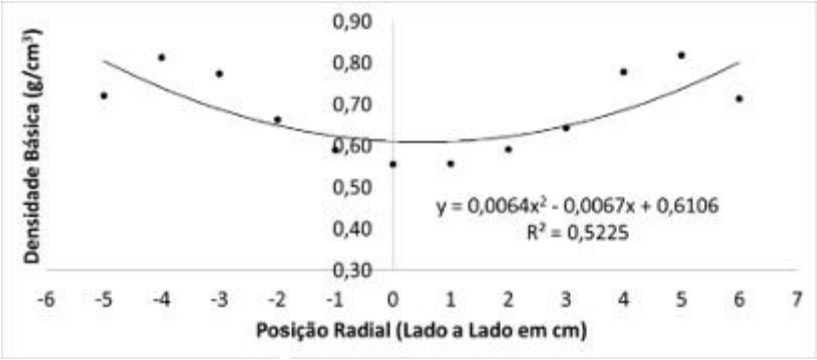
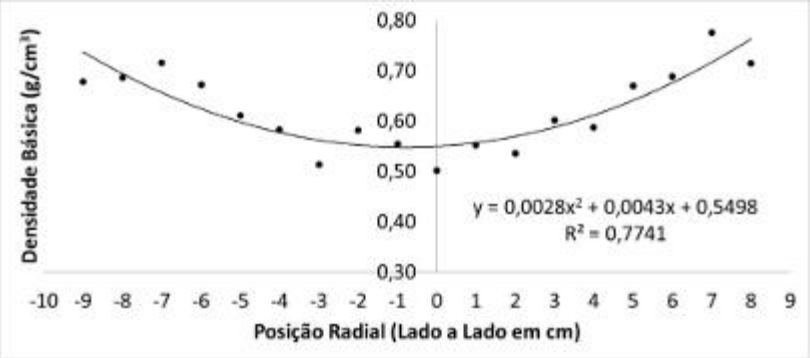


Figura 5 – Padrão da variação radial da densidade básica na classe de diâmetro de 26cm



O padrão crescente da densidade básica da medula para a casca, observado nas três classes de diâmetro, pode ser explicado pela presença e proporção da madeira juvenil no fuste. Conforme destacado por Malan (1995), a zona próxima à medula é caracterizada por essa madeira juvenil, cujas características físico-químicas e anatômicas determinam a extensão dessa variação radial. Como essa madeira

concentra-se na região da medula e apresenta menor densidade, ocorre uma elevação natural do gradiente em direção à casca, o qual diminui com o passar do tempo e influencia a forma de uso final do material, como apontado por Trugilho et al (2005). Além disso, devido as árvores desse estudo possuírem idade avançada (17 a 18 anos), a transição da madeira juvenil para a madeira adulta (próxima a casca) já está bem consolidada na literatura (Palermo et al., 2015), o que justifica os bons coeficientes de determinação (R^2) encontrados nos modelos quadráticos.

Ao analisar a variação longitudinal, notou-se que a classe diamétrica de 17 cm apresentou um comportamento distinto das demais. Enquanto as outras classes mostraram um padrão crescente da densidade básica até 75% da altura, a classe mais

fina exibiu um decréscimo inicial, acréscimo e um decréscimo final, corroborando com o padrão de variação observado por Couto et al. (2012) em clones de *Eucalyptus* sp. Esse comportamento diferenciado reforça os relatos de Downes et al. (1997) e Cacau et al. (2023) de que a ocorrência de variados padrões longitudinais (crescentes, decrescentes ou irregulares) é comum.

4. Conclusão

Os resultados permitem concluir que:

✔️ A classe diamétrica de 22cm (0,727g/cm^3) apresentou o maior valor de densidade básica, seguida da classe de 26cm (0,664 g/cm^3) e 17cm (0,622 g/cm^3);

✔️ A variação longitudinal mostrou padrão crescente da densidade básica até 75% seguido de queda em 100% da altura da árvore, exceto na classe 17cm de diâmetro;

✔️ A variação radial foi semelhante em todas as classes e mostrou padrão crescente da densidade básica da medula para a casca.

5. Agradecimentos

Ao CNPq, FAPEMIG e CAPES pelo auxílio financeiro necessário à realização do trabalho.

6. Referências Bibliográficas

Abreu Neto, R., Assis, A. A., Ballarin, A. W., Hein, P. R. G. (2020). Effect of final temperature on charcoal stiffness and its correlation with wood density and hardness. SN Applied Sciences, 2, 2822. https://doi.org/10.1007/s42452-020-2822-0

Associação Brasileira de Normas Técnicas-ABNT. (2003). *Normas técnicas* NBR 11941. Madeira-Determinação da densidade básica. Rio de Janeiro, 6p.

Cacau, F. V. P., Duarte, M. S., Urbano, E., Falcão, K. S., Silva, R. F. (2023). Variação longitudinal da densidade básica da madeira de clones de eucalipto. Brazilian Journal of Biological Sciences, 10(23), 01–14. https://doi.org/10.21472/bjbs.v10n23-001

Costa, S. E. L., Santos, R. C., Vidaurre, G. B., Castro, R. V. O., Rocha, S. M. G., Carneiro, R. L., Campoe, O. C., Santos, C. P. S., Gomes, I. R. F., Carvalho, N. F. O., Trugilho, P. F. (2020). The effects of contrasting environments on the basic density and mean annual

increment of wood from eucalyptus clones. *Forest Ecology and Management*, 458, 117807. https://doi.org/10.1016/j.foreco.2019.117807

Couto, A.M., Protásio, T.P., Reis, A.A., Trugilho, P.T. (2012). Amostragens Longitudinais Alternativas para a Determinação da Densidade Básica em Clones de *Eucalyptus* sp. Floresta e Ambiente, 19(2), p.184-193. https://doi.org/10.4322/floram.2012.022

Downes, G.M., Hudson, I.L., Raymond, C.A., Dean, G.H., Michell, A.J., Schimleck, R., Evans, R., Muneri, A. (1997). Sampling plantation eucalypts for wood and fiber properties. Hobart: CSIRO, 126 p. https://doi.org/10.1071/9780643105287

Malan, F. A. (1995). *Eucalyptus* improvement for lumber production. In: Seminário internacional de utilização da madeira de e eucalipto para serraria. São Paulo, Anais... São Paulo: IPEF/IPT, p. 1-19.

Moulin, J. C., Rocha, M. F. V., Arantes, M. D. C., Boschetti, W. T. N., Jesus, M. S., Trugilho, P. F. (2017). Influência do espaçamento de plantio e irrigação na densidade e na massa seca em espécies de Eucalyptus. Nativa, 5(5), 367–371. https://doi.org/10.5935/2318-7670.v05n05a11

Palermo, G. D. M., Latorraca, J. D. F., De Carvalho, A. M., Calonego, F. W., & Severo, E. T. D. (2015). Anatomical properties of Eucalyptus grandis wood and transition age between the juvenile and mature woods. European Journal of Wood and Wood Products, 73(6), 775-780. https://doi.org/10.1007/s00107-015-0947-4

Pádua, F. A. (2009). Amostragem para avaliação da densidade básica da madeira de um híbrido de *Eucalyptus grandis* W.Hill ex Maiden x *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake. (Tese de Doutorado). Universidade Federal de Lavras.

Trugilho, P. F., Silva, J.R.M., Mori, F.A., Lima, J.T., Mendes, L.M., Mendes, L.F.B. (2005). Rendimentos e características do carvão vegetal em função da posição radial de amostragem em clones de *Eucalyptus*. Cerne, Lavras, 11(2), p. 178-186.

Trugilho, P. T. (2017). Influência do espaçamento de plantio e irrigação na densidade e na massa seca em espécies de Eucalyptus. Nativa, 5(5), 367–371. https://doi.org/10.5935/2318-7670.v05n05a11

Vital, B.R. (1984). Métodos de determinação da densidade da madeira. Viçosa, MG, SIF, 21p. (Boletim técnico, 1).

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Variação na densidade básica da madeira de espécies de manguezal da costa amazônica brasileira

Madson Lucas Galvão[1]; Iedo Souza Santos[2]; Marcus Emanuel Barroncas Fernandes[1]

[1] Laboratório de Ecologia de Manguezal–LAMA, Instituto de Estudos Costeiros–IECOS, Universidade Federal do Pará–UFPA, Bragança, Pará 68600-000, Brasil
[2] Programa de Pós-Graduação em Tecnologia, Recursos Naturais e Sustentabilidade na Amazônia, Departamento de Tecnologia e Recursos Naturais, Universidade do Estado do Pará–UEPA, Belém, Pará 66095-015, Brasil

Resumo: Os manguezais da costa amazônica brasileira desempenham importantes funções ecológicas e fornecem recursos madeireiros utilizados por comunidades tradicionais. Este estudo teve como objetivo avaliar a variação longitudinal da densidade básica da madeira de *Laguncularia racemosa*, *Avicennia germinans* e *Rhizophora mangle* ao longo do fuste. Foram selecionadas cinco árvores de cada espécie na Reserva Extrativista Marinha Caeté-Taperaçu, em Bragança (PA), utilizando como critério a mediana do diâmetro à altura do peito. Corpos de prova foram obtidos nas posições de 0%, 33%, 66% e 100% da altura comercial do tronco para determinação da densidade básica. *Rhizophora mangle* apresentou os maiores valores de densidade, com reduzida variação ao longo do fuste, evidenciando elevada homogeneidade estrutural. *Laguncularia racemosa* apresentou densidade intermediária e distribuição relativamente uniforme, enquanto *Avicennia germinans* exibiu maior variação longitudinal. Os resultados demonstram diferenças marcantes entre as espécies quanto à distribuição da densidade da madeira, fornecendo subsídios para estudos sobre biomassa, estoque de carbono, tecnologia da madeira e manejo sustentável dos manguezais da costa amazônica brasileira.

Palavras-chave: Propriedades físicas; Qualidade da madeira; Florestas costeiras

Variation in basic wood density of mangrove species from the Brazilian Amazon coast

Abstract: Mangrove forests along the Brazilian Amazon coast perform important ecological functions and provide timber resources used by traditional communities. This study aimed to evaluate the longitudinal variation in basic wood density of *Laguncularia racemosa*, *Avicennia germinans*, and *Rhizophora mangle* along the stem. Five trees of each species were selected in the Caeté-Taperaçu Marine Extractive Reserve in Bragança (Pará state), based on the median diameter at breast height. Wood samples were obtained at 0%, 33%, 66%, and 100% of the commercial stem height to determine basic density. *Rhizophora mangle* exhibited the highest density values with minimal variation along the stem, indicating high structural homogeneity. *Laguncularia racemosa* showed intermediate density and a relatively uniform distribution, whereas *Avicennia germinans* displayed greater longitudinal variation. The results demonstrate marked differences among the species regarding wood density distribution, providing data to support studies on biomass, carbon stocks, wood technology, and the sustainable management of mangrove forests along the Brazilian Amazon coast.

Keywords: Physical properties; Wood quality; Coastal forests

1. Introdução

Os manguezais são ecossistemas costeiros tropicais e subtropicais altamente especializados, estabelecidos em zonas entremarés sob influência direta dos regimes de maré, da salinidade e do aporte de sedimentos continentais (Tomlinson, 1986). Reconhecidos entre os ecossistemas mais produtivos do planeta, desempenham funções ecológicas fundamentais, incluindo a proteção da linha de costa contra processos erosivos, a estabilização de sedimentos, a ciclagem de nutrientes, o sequestro e armazenamento de carbono, além de fornecer habitat, abrigo e áreas de reprodução para inúmeras espécies da fauna aquática e terrestre (Alongi, 2014; Donato et al., 2011; Gardunho et al., 2026). Esses serviços ecossistêmicos tornam os manguezais estratégicos para a conservação da biodiversidade, mitigação das mudanças climáticas e manutenção da segurança alimentar de populações tradicionais que dependem diretamente de seus recursos naturais (Fernandes et al., 2018; Galvão et al., 2024).

A costa amazônica brasileira abriga o maior contínuo de manguezais do mundo, estendendo-se por aproximadamente 7.500 km² e representando uma das regiões de maior integridade ecológica desse ecossistema em escala global. Sua dinâmica é fortemente influenciada pela elevada amplitude das marés macromarés, pelo intenso aporte de sedimentos provenientes da Bacia Amazônica e pelas condições climáticas equatoriais, fatores que promovem alta produtividade primária e moldam a estrutura e o funcionamento dessas florestas (Diniz et al., 2019; Hayashi et al., 2019; Fernandes et al., 2026). Nessa região, a vegetação arbórea é composta principalmente por *Rhizophora mangle* L., *Rhizophora racemosa* G. Mey., *Rhizophora harissonii* Leechm., *Avicennia germinans* (L.) L., *Avicennia schaueriana* Stapf & Leechm. ex Moldenke e *Laguncularia racemosa* (L.) C.F. Gaertn., espécies que apresentam adaptações morfofisiológicas específicas para sobreviver em ambientes sujeitos à inundação periódica, à elevada salinidade e à baixa disponibilidade de oxigênio no solo (Abreu et al., 2016).

Embora a densidade básica da madeira de espécies de mangue, como *L. racemosa*, *A. germinans* e *R. mangle* já tenha sido investigada em estudos anteriores (Galvão et al., 2025; Galvão et al., 2025), as informações disponíveis referem-se, predominantemente, a valores médios gerais. Consequentemente, ainda são escassos os estudos que descrevem a variação longitudinal dessa propriedade ao longo do fuste, especialmente para populações da costa amazônica brasileira. Essa limitação dificulta uma compreensão mais abrangente da distribuição da densidade da madeira ao longo da árvore, restringindo interpretações sobre a formação do lenho e reduzindo a precisão de estimativas utilizadas em pesquisas sobre biomassa, estoque de carbono e qualidade da madeira.

Diante desse cenário, a caracterização da densidade básica da madeira e a avaliação de sua variação ao longo do fuste constituem ferramentas importantes para compreender os padrões de distribuição dessa propriedade física nas principais espécies arbóreas de mangue. Além de contribuir para o entendimento da estrutura da madeira e de suas respostas às condições ambientais características desse ecossistema, esses resultados fornecem informações relevantes para estudos de ecologia funcional, tecnologia da madeira, quantificação de biomassa e carbono, bem como para o desenvolvimento de estratégias voltadas ao manejo sustentável e à conservação dos recursos florestais dos manguezais amazônicos.

2. Material e métodos

2.1. Área de estudo

A área de estudo está localizada na Reserva Extrativista Marinha Caeté-Taperaçu, no município de Bragança, nordeste do estado do Pará. A unidade de conservação é administrada pelo Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade (ICMBio). O clima da região é classificado como tropical úmido, caracterizado por elevadas temperaturas e alta pluviosidade ao longo do ano. A temperatura média anual é de aproximadamente 26,5 °C, a precipitação média anual é de cerca de 2.350 mm e a umidade relativa média do ar é de 85%(INMET, 2025). A sazonalidade climática é bem definida, com período menos chuvoso entre julho e novembro e período chuvoso entre dezembro e junho (Moraes et al., 2005).

2.2. Coleta de madeira

O critério para a seleção das árvores para coleta de madeira foi a mediana da variável estrutural diâmetro à altura do peito (DAP) de *L. racemosa*, *A. germinans* e *R. mangle*, com DAP em torno de 19 cm, 23 cm e 20 cm, respectivamente. Cinco árvores de cada espécie foram coletadas (Licença MMA/ICMBIO/SISBIO nº 77770–1) e levadas ao Laboratório de Ecologia de Manguezal – Universidade Federal do Pará, Campus Bragança – para a preparação dos corpos de prova. Após a preparação, os corpos de prova foram encaminhados ao Laboratório Multiusuário de Engenharia Florestal – Universidade Estadual do Pará, Campus Paragominas, para análises físicas.

2.3. Caracterização física

Para caracterizar a densidade básica da madeira, quatro discos de 6 cm de espessura foram removidos de cada árvore e de cada espécie ao longo do fuste. Quatro posições radiais foram tomadas nos discos, de casca a casca, nomeadamente perto da medula a 0%, 33% e 66% do raio, e na periferia do tronco perto da casca a 100%, com margens de 5 cm na direção longitudinal (L), 3 cm na direção radial (R) e 2 cm na direção tangencial (T), todas isentas de

defeitos e perfeitamente orientadas, seguindo o procedimento de teste especificado pela norma ASTM D2395-17 (ASTM 2022).

3. Resultados e discussão

A Tabela 1 apresenta os valores médios de densidade da madeira ao longo do fuste das espécies de mangue *L. racemosa*, *A. germinans* e *R. mangle*, considerando as posições de 0%, 33%, 66% e 100% da altura do tronco. Para *L. racemosa*, observa-se uma densidade média praticamente constante ao longo do fuste, variando de 0,61 g/cm^3 (66%) a 0,63 g/cm^3 (0%, 33% e 100%). Os coeficientes de variação nessa espécie são moderados, com maior variabilidade na base (9,0%) e menor no topo (4,9%), sugerindo uma madeira estruturalmente homogênea.

Em *A. germinans*, a densidade apresenta leve decréscimo da base (0,71 g/cm^3) ao topo (0,61 g/cm^3), com variações intermediárias nas posições de 33% (0,66 g/cm^3) e 66% (0,66 g/cm^3). O CV% nesta espécie varia de 5,4% a 9,7%, indicando maior heterogeneidade ao longo do fuste, especialmente na base. Já *R. mangle* apresenta as maiores densidades médias entre as três espécies, mantendo-se praticamente constantes entre 0,83 e 0,84 g/cm^3 ao longo de todas as posições, com um desvio padrão sempre baixo (entre 0,02 e 0,05). O CV% para *R. mangle* é notavelmente baixo, especialmente no topo (0,7%) e na base (3,3%), o que evidencia uma madeira densa e altamente homogênea ao longo do tronco. Esses resultados indicam que *R. mangle* possui uma madeira estruturalmente mais estável e compacta, com maior potencial para usos que exigem alta resistência mecânica e durabilidade, enquanto *L. racemosa* e *A. germinans* apresentam maior variabilidade, refletindo diferenças nas estratégias de crescimento e adaptação ao ecossistema.

Tabela 1 – Valores médios e desvio padrão da densidade básica da madeira das espécies arbóreas de mangue da costa amazônica brasileira, em diferentes posições radiais do fuste. CV = coeficiente de variação.

Posição	**Densidade (g/cm^3)**			***p***	**Desvio padrão**			**CV (%)**		
	Lr	Ag	Rm		Lr	Ag	Rm	Lr	Ag	Rm
0%	0,63	0,71	0,84	<0,0001	0,06	0,07	0,03	9,0%	9,7%	3,3%
33%	0,63	0,66	0,83	<0,0001	0,03	0,05	0,02	4,3%	7,5%	3,0%
66%	0,61	0,66	0,83	<0,0001	0,05	0,04	0,04	8,0%	5,4%	3,7%
100%	0,63	0,61	0,83	<0,0001	0,03	0,05	0,05	4,9%	7,1%	0,7%
p		<0,0001								

O diagrama polar apresenta a variação da densidade básica da madeira ao longo do fuste das espécies de mangue *L. racemosa*, *A. germinans* e *R. mangle*, considerando as posições de 0%, 33%, 66% e 100% da altura do tronco (Figura 1). A espécie *L. racemosa* apresenta uma distribuição relativamente constante da densidade ao longo do fuste, com valores variando de aproximadamente 0,65 g/cm^3 na base (0%) até 0,68 g/cm^3 no topo (100%), indicando uma leve elevação, porém sem grandes oscilações. Em contraste, *A. germinans* mostra maior variação, iniciando com 0,58 g/cm^3 na base, reduzindo para cerca de 0,56 g/cm^3 aos 33%, e depois aumentando progressivamente até atingir aproximadamente 0,64 g/cm^3 no topo, o que sugere uma reorganização estrutural da madeira possivelmente relacionada ao transporte de água e ao suporte da copa. Já *R. mangle* apresenta densidades mais elevadas em todas as posições do fuste, com um padrão crescente ao longo da altura: de 0,72 g/cm^3 na base, passando por 0,75 g/cm^3 (33%), 0,78 g/cm^3 (66%), até atingir o valor máximo de 0,80 g/cm^3 no topo, evidenciando um padrão marcante de incremento longitudinal.

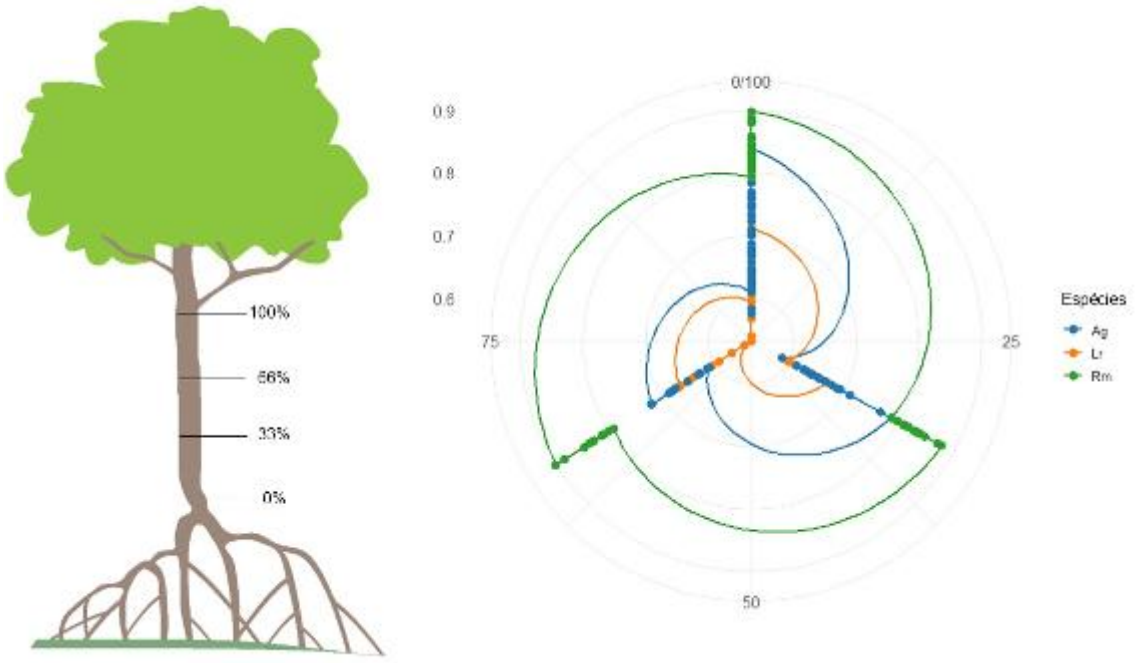


Figura 1 – Diagrama polar da variação radial da densidade básica da madeira das espécies arbóreas de mangue da costa amazônica brasileira.

A densidade da madeira está diretamente relacionada à sua resistência mecânica, durabilidade e eficiência energética (Chen et al., 2020; Galvão, Nobre, et al., 2025). Espécies como *R. mangle*, que apresentaram os maiores valores de densidade (0,72 a 0,80 g/cm^3) e um padrão crescente ao longo do fuste, tendem a gerar madeiras mais resistentes, pesadas e duráveis

(Galvão et al., 2024b). Isso justifica seu uso frequente para estacas, vigas, trapiches, cercas, pontes e mourões (Galvão et al., 2024), estruturas que exigem boa resistência ao apodrecimento e à tração, especialmente em ambientes úmidos ou diretamente em contato com o solo e a água (Galvão et al., 2024b). Por outro lado, madeiras de *A. germinans*, com densidade inicial mais baixa (~0,58 g/cm^3 na base) e variações ao longo do fuste, podem apresentar desempenho mecânico menos previsível, o que limita seu uso em estruturas permanentes ou de maior exigência mecânica (Galvão et al., 2025). No entanto, podem ser preferidas em usos como lenha e produção de carvão vegetal, especialmente pelas populações tradicionais, onde a densidade intermediária facilita o corte, manuseio e transporte, ao mesmo tempo em que garante uma queima mais prolongada e eficiente. *Laguncularia racemosa*, com densidade mais constante e moderada (~0,65–0,68 g/cm^3), representa uma madeira de uso mais versátil, podendo ser aplicada tanto para lenha e carvão quanto para construções leves, como barrotes, suportes temporários e utensílios domésticos (Galvão, Nobre, et al., 2025). A homogeneidade da densidade pode facilitar o trabalho artesanal e a predição do desempenho da madeira (Cacau et al., 2023).

Além disso, é importante considerar que a alta densidade está associada a uma menor absorção de umidade e maior resistência à decomposição, características desejáveis em ambientes litorâneos (regiões entremarés). Isso também reforça a preferência tradicional por *R. mangle*, cuja madeira tende a durar mais em condições adversas (Galvão et al., 2024b).

4. Conclusões

Em resumo, os padrões de densidade revelados pelo estudo ajudam a explicar e justificar o uso diferencial das madeiras de mangue pelas comunidades tradicionais, que historicamente reconhecem essas características mesmo sem medições técnicas, orientando o aproveitamento da madeira com base em sua resistência, durabilidade, facilidade de trabalho e desempenho energético.

5. Agradecimentos

Agradecemos ao Laboratório de Ecologia de Manguezal (LAMA) – Universidade Federal do Pará – Bragança pela logística necessária para a realização do trabalho. Ao Laboratório Multiusuário de Engenharia Florestal (LAMEF) – Universidade do Estado do Pará – Paragominas. Agradecemos também ao projeto Mangues da Amazônia (Programa Petrobras Socioambiental) pelo apoio à pesquisa.

6. Referências bibliográficas

Abreu, M. M. O., Veiga, N., Costa-Neto, S. V, & Fernandes M E B. (2016). Vegetação Arbórea: Distribuição Espacial. In M. E. B. Fernandes (Ed.), *Os Manguezais da Costa Norte Brasileira* (Vol. 3, pp. 35–78).

Alongi, D. M. (2014). Carbon cycling and storage in mangrove forests. *Annual Review of Marine Science*, *6*. https://doi.org/10.1146/annurev-marine-010213-135020

ASTM International. (2022). ASTM D2395–17: Standard test methods for density and specific gravity (relative density) of wood and wood-based materials. https://doi.org/10.1520/D2395-17

Cacau, F. V. do P., Duarte, M. da S., Urbano, E., Falcão, K. dos S., & Silva, R. F. da. (2023). Variação longitudinal da densidade básica da madeira de clones de eucalipto. *Brazilian Journal of Biological Sciences*, *10*(23). https://doi.org/10.21472/bjbs.v10n23-001

Chen, C., Kuang, Y., Zhu, S., Burgert, I., Keplinger, T., Gong, A., Li, T., Berglund, L., Eichhorn, S. J., & Hu, L. (2020). Structure–property–function relationships of natural and engineered wood. In *Nature Reviews Materials* (Vol. 5, Number 9). https://doi.org/10.1038/s41578-020-0195-z

Diniz, C., Cortinhas, L., Nerino, G., Rodrigues, J., Sadeck, L., Adami, M., & Souza-Filho, P. W. M. (2019). Brazilian mangrove status: Three decades of satellite data analysis. *Remote Sensing*, *11*(7). https://doi.org/10.3390/rs11070808

Donato, D. C., Kauffman, J. B., Murdiyarso, D., Kurnianto, S., Stidham, M., & Kanninen, M. (2011). Mangroves among the most carbon-rich forests in the tropics. *Nature Geoscience*, *4*(5). https://doi.org/10.1038/ngeo1123

Fernandes, M. E. B., Oliveira, F. P., & Eyzaguirre, I. A. L. (2018). Mangroves on the Brazilian Amazon Coast: Uses and Rehabilitation. In C. Makowski & C. W. Finkl (Eds.), *Threats to Mangrove Forests: Hazards, Vulnerability, and Management* (pp. 621–635). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-73016-5_29

Fernandes, M. E. B., Souza-Filho, P. W. M., & Proisy, C. (2026). Mangrove Blue Carbon Dynamics on the Amazon Coast: An Overview. In M. E. B. Fernandes, P. W. M. e. Souza-Filho, & C. Proisy (Eds.), *Amazonian Mangrove Blue Carbon Dynamics* (pp. 231–241). Springer Nature Switzerland. https://doi.org/10.1007/978-3-032-18604-1_14

Galvão, M. L., Batista, A. S., Nobre, J. R. C., Balboni, B. M., Santos, I. S., & Fernandes, M. E. B. (2025). Chemical, physical, and mechanical wood properties of *Rhizophora mangle* L., *Avicennia germinans* (L.) L., and *Laguncularia racemosa* (L.) C.F. Gaertn. on the Brazilian Amazon coast. *Annals of Forest Science*, *82*(1). https://doi.org/10.1186/s13595-025-01279-6

Galvão, M. L., Nobre, J. R. C., Balboni, B. M., Santos, I. S., & Fernandes, M. E. B. (2025). Assessment of suitability of mangrove wood for different uses. *Journal of Wood Science*, *71*(1). https://doi.org/10.1186/s10086-025-02180-6

Galvão, M. L., Bessa-Silva, A., Batista, A. S., Balboni, B. M., Santos, I. S., & Fernandes, M. E. B. (2024b). Effects of wood density on mechanical properties of mangrove wood from the Amazon coast. *PLOS ONE*, *19*(11), e0313824-. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0313824

Galvão, M. L., Rodrigues, T. N. M., Santos, I. S., & Fernandes, M. E. B. (2024b). Traditional ecological knowledge of mangrove wood use on the Brazilian Amazon coast. *Ethnobiology and Conservation*, *13*. https://doi.org/10.15451/ec2024-01-13.03-1-19

Gardunho, D. C. L., Costa Virgulino-Júnior, P. C., Silva, D. N. C., & Fernandes, M. E. B. (2026). Species-Specific Allometric Equations for Estimating Aboveground Biomass in Amazonian Mangrove Forests. In M. E. B. Fernandes, P. W. M. e. Souza-Filho, & C. Proisy (Eds.), *Amazonian Mangrove Blue Carbon Dynamics* (pp. 69–91). Springer Nature Switzerland. https://doi.org/10.1007/978-3-032-18604-1_5

Hayashi, S. N., Souza-Filho, P. W. M., Nascimento Jr., W. R., & Fernandes, M. E. B. (2019). The effect of anthropogenic drivers on spatial patterns of mangrove land use on the Amazon coast. *PLOS ONE*, *14*(6), e0217754-. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0217754

INMET. (2025). Instituto Nacional de Meteorologia - INMET. *On Line*, *2014*.

Moraes, B. C. de, Costa, J. M. N. da, Costa, A. C. L. da, & Costa, M. H. (2005). Variação espacial e temporal da precipitação no Estado do Pará. *Acta Amazonica*, *35*(2). https://doi.org/10.1590/s0044-59672005000200010

Tomlinson, P. B. (1986). The botany of mangroves. *The Botany of Mangroves*. https://doi.org/10.2307/4109956

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Variação radial das propriedades anatômicas da madeira de *Calophyllum brasiliense* proveniente de plantio comercial

Natalia Durigon Melo[1]; Thâmara dos Santos Osaki[1]; José Fellip Catique Marinho[1]; Romulo Koeche[1]; Camila Alves Corrêa[1]; José Cicero Pereira Junior[1]; Alexsandro Bayestorff da Cunha[1]; Polliana D'Angelo Rios[1]

[1] Universidade do Estado de Santa Catarina – Centro de Ciências Agroveterinárias

Resumo: A caracterização tecnológica da madeira é essencial para a definição de usos apropriados, sobretudo em espécies de plantio comercial recente, cuja avaliação da variação radial entre lenho juvenil e adulto ainda é pouco aprofundada. Este trabalho avaliou a variação radial das propriedades anatômicas da madeira de *Calophyllum brasiliense* (guanandi) proveniente de plantio comercial em Dueré, Tocantins. Foram amostradas doze árvores de oito anos, com análises nas regiões próximas à medula e próximas à casca. As variáveis quantitativas foram comparadas entre as regiões por testes t, Mann-Whitney ou Fisher, conforme a distribuição dos dados. Sete das treze variáveis avaliadas diferiram significativamente entre as regiões: diâmetro do lume, espessura da parede celular, comprimento do elemento de vaso, diâmetro do vaso, diâmetro da pontoação intervascular, altura e largura dos raios. O diâmetro do vaso praticamente dobrou da medula para a casca, enquanto a frequência de poros, a frequência de raios e o número de células por raio mantiveram-se semelhantes entre as regiões. Os resultados evidenciam uma transição entre lenho juvenil e lenho em maturação aos oito anos, contribuindo para a caracterização da madeira e indicando potencial para ciclos de rotação mais curtos em plantios comerciais.
Palavras-chave: Guanandi; Elementos vasculares; Xilema secundário.

Radial variation in the anatomical properties of *Calophyllum brasiliense* wood from a commercial plantation

Abstract: Technological characterization of wood is essential for defining appropriate uses, especially in species from recent commercial plantations, whose radial variation between juvenile and mature wood has still been little explored. This study evaluated the radial variation of the anatomical properties of *Calophyllum brasiliense* (guanandi) wood from a commercial plantation in Dueré, Tocantins, Brazil. Twelve eight-year-old trees were sampled, with analyses performed in the regions near the pith and near the bark. Quantitative variables were compared between regions using t-tests, Mann-Whitney tests, or Fisher tests, according to data distribution. Seven of the thirteen variables evaluated differed significantly between regions: lumen diameter, cell wall thickness, vessel element length, vessel diameter, intervessel pit diameter, and ray height and width. Vessel diameter nearly doubled from pith to bark, whereas pore frequency, ray frequency, and the number of cells per ray remained similar between regions. The results indicate a transition between juvenile wood and maturing wood at eight years of age, contributing to wood characterization and suggesting potential for shorter rotation cycles in commercial plantations.
Keywords: Guanandi; Vessel elements; Secondary xylem.

1. Introdução

A madeira é um material amplamente utilizado e extremamente versátil, cujas características variam conforme a espécie e influenciam diretamente seu desempenho nas aplicações finais. Sua estrutura anatômica, composição química e variação de propriedades ao longo do tronco determinam, em grande parte, os usos tecnológicos possíveis, tornando a caracterização tecnológica uma etapa essencial para a definição de aplicações apropriadas (Wiemann, 2010).

O Brasil possui 10,2 milhões de hectares de florestas plantadas, dos quais 9,75 milhões correspondem a *Eucalyptus* e *Pinus*, restando apenas 0,45 milhão de hectares para espécies nativas ou exóticas (IBÁ, 2025). Os plantios comerciais de *Calophyllum brasiliense* vêm se expandindo desde o início dos anos 2000, motivados por relatos de que seu ciclo de rotação é comparável ao do *Eucalyptus* e que seu valor comercial pode ser até cem vezes superior (Duffecky & Fossati, 2009; SFB, 2014).

Calophyllum brasiliense, popularmente conhecido como jacareúba, landim, guanandi, *leche maria*, santa maria e *beauty leaf*, apresenta ampla distribuição, ocorrendo do México à Argentina e no Brasil, nos domínios da Amazônia, Caatinga, Cerrado e Mata Atlântica. A espécie apresenta variabilidade morfológica e química, sobretudo quanto ao teor de extrativos, associada às condições ambientais de cada sítio (Cabral, 2020; Royal Botanic Gardens, Kew, 2024). Tolerante a alagamentos periódicos, apresenta potencial comercial como madeira de lei, com fuste reto e cilíndrico, alturas de até aproximadamente 30 m e copa arredondada (Carvalho, 1994; Devide, 2021; Díaz, n.d.; Souza, 2006). A madeira é valorizada por sua resistência mecânica, durabilidade e versatilidade, sendo empregada em móveis, construção civil, aplicações navais, pisos, utensílios domésticos, laminados e tanoaria.

O uso comercial de *C. brasiliense* em plantios no Brasil remonta ao início dos anos 2000, com estudos iniciais em São Paulo e, posteriormente, no Paraná, onde a espécie demonstrou crescimento satisfatório (Carvalho, 2003). O estado de Tocantins também apresenta potencial para o cultivo da espécie, com estudos sobre qualidade de mudas, viabilidade de plantios comerciais e desempenho silvicultural de povoamentos já estabelecidos (Bueno et al., 2021; Froufe et al., 2022; Limeira et al., 2022). Contudo, ainda há lacunas de conhecimento quanto à idade de rotação adequada e à qualidade da madeira produzida em plantios destinados à produção madeireira.

De modo geral, a caracterização da madeira é indispensável para o entendimento da sua qualidade, incluindo a variação radial (medula-casca), decorrente da heterogeneidade dos elementos anatômicos constituintes do lenho (Oliveira et al., 2005; Nassur, 2010; Cruz et al., 2019; Esteban et al., 2024; Balzano et al., 2024; Monteiro et al., 2026). Essas variações estão associadas ao regime silvicultural aplicado, à produtividade do sítio e a condições ambientais, como disponibilidade hídrica, fertilidade do solo, amplitude térmica e exposição ao vento (Cruz et al., 2020; Erasmus et al., 2020; Garbachevski et al., 2022).

As variações no sentido radial, além disso, ressaltam o processo de diferenciação ontogenética relacionado à transição do lenho juvenil para o adulto, descrito para angiospermas tropicais (Carlquist, 1985) e associado ao avanço da idade cambial (Zobel & Sprague, 1998).

Apesar da relevância comercial crescente de *C. brasiliense*, a variação radial de suas propriedades anatômicas em indivíduos jovens ainda é pouco explorada. Deste modo, o presente trabalho teve como objetivo avaliar a variação radial das propriedades anatômicas da madeira de *C. brasiliense* proveniente de um plantio comercial de oito anos no estado do Tocantins, comparando as regiões próximas à medula e próximas à casca, de modo a contribuir para a caracterização da madeira e fornecer subsídios à definição de usos tecnológicos para a espécie nessa idade.

2. Material e métodos

2.1 Área de estudo e amostragem

O material foi coletado em plantio comercial no município de Dueré, Tocantins, em área de Floresta Ombrófila. O clima local é classificado como C2wA'a (Köppen), úmido a subúmido, com estação seca no inverno; temperatura média anual de 24,4 °C (máx. 33 °C; mín. 22 °C) e umidade relativa média de 80%. O solo predominante é Latossolo (Oxisol), bem drenado, com relevo suavemente ondulado (Sano et al., 2008).

Foram amostradas doze árvores de oito anos, pertencentes a um único povoamento equiâneo, com espaçamento de 4 m × 2 m. As mudas foram produzidas em viveiro privado a partir de sementes de árvores nativas da região, sem seleção de matrizes. A altura média das árvores foi de 11,07 m e o DAP médio de 12,02 cm. O material foi obtido de toras basais de 1,5 m, retiradas ao nível do solo.

2.2 Preparo dos corpos de prova e delimitação das zonas radiais

Inicialmente, foram delimitadas as zonas próximas à medula (PM) e próximas à casca (PC) ao longo do sentido radial, de acordo com o objetivo do estudo de avaliar a variação radial

das características anatômicas. Foram preparados corpos de prova de 3,0 × 2,5 × 3,0 cm (X × RL × TL) para as análises macroscópicas e microscópicas. Para a análise macroscópica, os corpos de prova foram saturados em água e suas superfícies foram aparadas em micrótomo de deslize. A análise microscópica foi realizada em cortes histológicos e material macerado.

Os cortes histológicos foram obtidos em micrótomo de deslize Leica SM2010R, com espessura média de 16 µm, nos planos transversal, longitudinal-tangencial e longitudinal-radial. As lâminas foram clarificadas com hipoclorito de sódio a 2%, coradas com safranina hidroalcoólica a 1%, desidratadas em série etílica gradual e montadas em Entellan®.

Para a maceração, fragmentos de madeira foram tratados com ácido acético e peróxido de hidrogênio (1:1), por 24 h a 60 °C, corados com safranina a 1% e montados em glicerina.

As imagens macroscópicas foram obtidas em estereomicroscópio Leica S8APO, com auxílio do software LAS X. Para cada região (próxima à medula e próxima à casca), foram preparadas 20 lâminas por árvore (10 temporárias e 10 permanentes), totalizando 120 lâminas temporárias e permanentes. As imagens e medições microscópicas dos elementos anatômicos foram obtidas em microscópio Leica DM500C, acoplado a câmera Leica CC50HD, utilizando o módulo LAS Measure v6.1. A classificação categórica das variáveis quantitativas seguiu os critérios da IAWA (1989).

Nas lâminas permanentes, mensuraram-se, no plano transversal, o diâmetro e a frequência dos vasos; no plano radial, o diâmetro da pontoação intervascular e o diâmetro da pontoação raio-vaso; e no plano tangencial, a altura, a largura, o número de células e a largura celular dos raios, além da frequência de raios. No material macerado (lâminas temporárias), foram mensurados o comprimento do fibrotraqueídeo/fibra (sem distinção entre esses elementos), o comprimento do elemento de vaso, o diâmetro do lume e a espessura da parede celular.

Todas as análises estatísticas foram realizadas no ambiente RStudio® (v. 2026.01.1). A variação radial das propriedades anatômicas foi avaliada comparando-se as regiões próximas à medula (PM) e próximas à casca (PC), tratadas como dois grupos independentes.

A normalidade dos dados foi avaliada pelo teste de Shapiro-Wilk e a homogeneidade de variâncias pelo teste de Levene. As variáveis que atenderam a ambos os pressupostos foram comparadas por teste t para amostras independentes (Student ou Welch, conforme a homogeneidade de variâncias), enquanto as variáveis não normais, incluindo as variáveis de contagem frequência de poros e frequência de raios, foram comparadas pelo teste não paramétrico de Mann-Whitney, adequado para duas amostras independentes e que não exige

pressupostos distribucionais. A seriação dos raios (número de células radiais por raio) foi comparada por meio do teste exato de Fisher. Não foram aplicadas transformações aos dados.

3. Resultados e discussão

3.1 Variação radial das propriedades anatômicas

Na Tabela 1 está apresentado os resultados das medições anatômicas de *C. brasiliense* ao longo do sentido radial (medula-casca). Das treze variáveis avaliadas, sete diferiram significativamente entre as regiões próxima à medula (PM) e próxima à casca (PC): diâmetro do lume, espessura da parede celular do fibrotraqueídeo/fibra, comprimento do elemento de vaso, diâmetro do vaso (poro), diâmetro da pontoação intervascular e altura e largura dos raios.

Tabela 1 – Valores médios das propriedades anatômicas da madeira de *Calophyllum brasiliense* em duas posições radiais: próxima à medula (PM) e próxima à casca (PC).

Parâmetro	PM	PC	Teste	Valor-p
Comprimento do fibrotraqueídeo/fibra (µm)	1072,78 ± 140,51	1060,67 ± 153,95	Mann-Whitney	0,461 ns
Diâmetro do fibrotraqueídeo (µm)	18,36 ± 3,33	17,93 ± 3,87	Mann-Whitney	0,209 ns
Diâmetro do lume (µm)	9,49 ± 2,93	8,40 ± 2,55	Mann-Whitney	0,012 *
Espessura da parede celular (µm)	4,22 ± 1,06	4,98 ± 1,18	Mann-Whitney	< 0,001 ***
Comprimento do elemento de vaso (µm)	425,51 ± 78,28	379,48 ± 80,87	Mann-Whitney	< 0,001 ***
Diâmetro do vaso/poro (µm)	131,43 ± 21,15	247,11 ± 33,79	Welch t	< 0,001 ***
Frequência de poros (n° mm^{-2})	6,08 ± 1,44	5,84 ± 1,40	Mann-Whitney	0,400 ns
Diâmetro da pontoação intervascular (µm)	4,79 ± 0,73	4,40 ± 0,55	Mann-Whitney	< 0,001 ***
Diâmetro da pontoação raio-vaso (µm)	4,68 ± 0,80	4,45 ± 0,47	Mann-Whitney	0,313 ns
Altura do raio (µm)	216,32 ± 47,78	254,39 ± 56,02	Mann-Whitney	< 0,001 ***
Largura do raio (µm)	17,84 ± 3,94	20,20 ± 5,05	Mann-Whitney	< 0,001 ***
Frequência de raios (raios mm^{-1})	12,18 ± 1,79	11,52 ± 1,69	Mann-Whitney	0,061 ns
Número de células por raio	10,56 ± 2,45	10,92 ± 2,46	Mann-Whitney	0,207 ns
Seriação dos raios (n° de células radiais)	1,02	1,10	Fisher	1,000 ns

Onde: PM = próxima à medula; PC = próxima à casca. Significância: * p < 0,05; ** p < 0,01; *** p < 0,001; ns = não significativo.

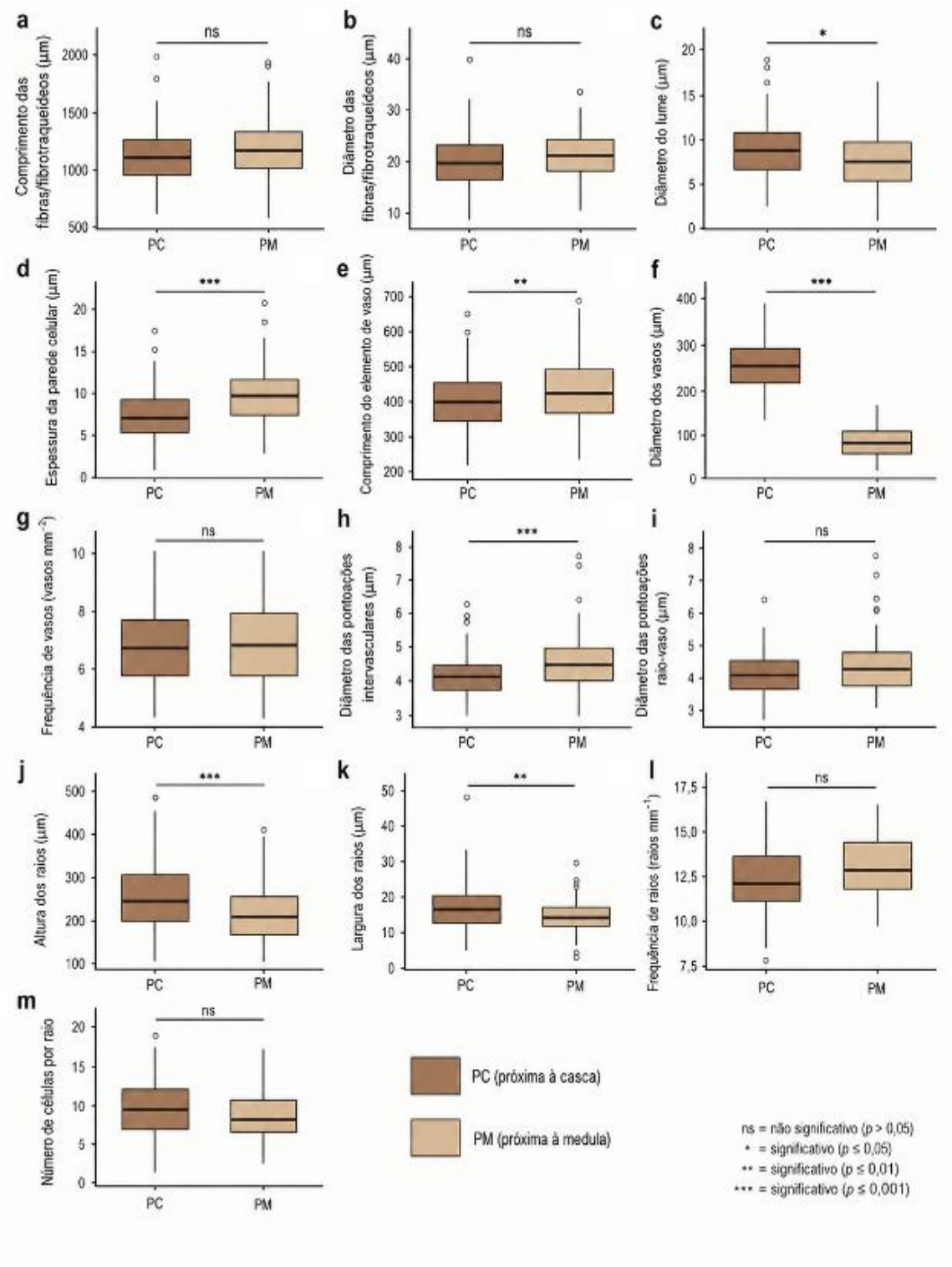


Figura 1 – Gráficos box-plot das propriedades anatômicas da madeira de *Calophyllum brasiliense* nas regiões próxima à medula (PM) e próxima à casca (PC): a) comprimento do fibrotraqueídeo; b) diâmetro do fibrotraqueídeo; c) diâmetro do lume; d) espessura da parede celular; e) comprimento do elemento de vaso; f) diâmetro do vaso (poro); g) frequência de poros; h) diâmetro da pontoação intervascular; i) diâmetro da pontoação raio-vaso; j) altura do raio; k) largura do raio; l) frequência de raios; m) número de células por raio.

Os elementos de vaso apresentaram a variação mais expressiva ao longo do gradiente lenho juvenil-adulto. Como mostra a Tabela 1, o diâmetro do vaso praticamente dobrou da medula para a casca.

O maior diâmetro dos vasos próximo à casca é consistente com o ajuste funcional necessário para manter o transporte de seiva sob maior estresse hídrico (Hacke & Sperry, 2001). Para a mesma espécie, Barreiros et al. (2016) e Muñiz et al. (2012) relataram valores médios de 151,70 µm e 155,05 µm, respectivamente, próximos aos valores obtidos aqui para a região próxima à medula. Padrão semelhante de aumento radial no diâmetro do vaso foi documentado para *Eucalyptus pellita* (Poubel et al., 2011) e clones de *Hevea brasiliensis* (Amorim et al., 2021).

A espessura da parede celular do fibrotraqueídeo/fibras diferiu significativamente entre as regiões (Tabela 1), sendo maior próximo à casca. O comprimento do fibrotraqueídeo (PM: 1.072,78 µm; PC: 1.060,67 µm) não diferiu significativamente entre as regiões, assim como o diâmetro do fibrotraqueídeo. Richter e Dallwitz (2000) relataram fibras mais longas (1.280 µm) para a espécie, enquanto Barreiros et al. (2016) encontraram espessura de parede ligeiramente menor (4,07 µm) aos 13 anos de idade.

A altura e a largura dos raios foram significativamente maiores próximo à casca. A maior altura na região externa pode favorecer o armazenamento radial de água e carboidratos e contribuir para a resistência a esforços mecânicos (Schweingruber, 1990). A frequência de raios, o número de células por raio e o diâmetro da pontoação raio-vaso não diferiram entre regiões, indicando que essas características já estavam homogêneas nessa idade. Os raios foram predominantemente unisseriados, raramente bisseriados.

A frequência de poros também não diferiu entre as regiões (PM: 6,08 mm^{-2}; PC: 5,84 mm^{-2}), permanecendo homogênea ao longo do sentido radial. Essa característica pode ser relevante para usos que demandem uniformidade anatômica, como a tanoaria (Tarko et al., 2023). Entretanto, a adequação da madeira para esse uso deve ser avaliada conjuntamente com outras características anatômicas, físicas e tecnológicas.

Em conjunto, os resultados anatômicos descrevem uma madeira em transição: a região próxima à medula mantém características de lenho juvenil, enquanto a região próxima à casca já apresenta características de maior maturação, especialmente pelo aumento do diâmetro dos vasos, da espessura da parede celular e das dimensões dos raios. Aos oito anos de idade, *C. brasiliense* apresenta variação radial nas dimensões de importantes elementos anatômicos,

evidenciando uma transição entre lenho juvenil e adulto e contribuindo para a compreensão de seu potencial tecnológico em ciclos de rotação mais curtos.

4. Conclusões

A madeira de *C. brasiliense* proveniente do plantio comercial de Dueré, Tocantins, apresentou variação radial significativa em sete das treze propriedades anatômicas avaliadas, com destaque para o diâmetro do vaso, que praticamente dobrou da medula para a casca. A frequência de poros, a frequência de raios e o número de células por raio, por sua vez, mantiveram-se estatisticamente homogêneos entre as regiões próxima à medula e próxima à casca.

Esses resultados evidenciam uma transição entre lenho juvenil e lenho em maturação aos oito anos de idade, com a região próxima à casca apresentando atributos anatômicos mais desenvolvidos. A caracterização anatômica radial contribui para o conhecimento da qualidade da madeira e indica potencial de *C. brasiliense* para ciclos de rotação mais curtos em plantios comerciais.

5. Agradecimentos

Os autores agradecem à empresa parceira pela concessão do material utilizado no presente estudo, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal da Universidade do Estado de Santa Catarina (UDESC) pelo apoio institucional e à Fundação de Amparo à Pesquisa de Santa Catarina (FAPESC) pela concessão de bolsa durante a realização do estudo.

6. Referências bibliográficas

Amorim, E. P., Longui, E. L., Faria, R. F. P., Freitas, M. L. M., Morais, M. A., Cambuim, J., Moraes, M. L. T., & Gonçalves, P. S. (2021). Anatomical radial variation and density in rubber tree wood clones. Journal of the Forestry Institute, 33(1). https://doi.org/10.24278/2178-5031.202133101

Balzano, A., Merela, M., & de Micco, V. (2024). Advances in wood anatomy: cutting-edge techniques for identifying wood and analyzing its structural modifications. Forests, 15, 1802. https://doi.org/10.3390/f15101802

Barreiros, R. M., Amaral, S. S., & Matos, C. A. O. (2016). Quantitative study of structural morphological variation in Calophyllum brasiliense wood. CERNE, 22(1), e1838. https://doi.org/10.1590/01047760201622011838

Bueno, M. C., Barilli, J., Varavallo, M. A., & Encinas, J. M. I. (2021). Viabilidade de plantio da espécie Calophyllum brasiliense. https://doi.org/10.53268/BKF21090700

Cabral, F. N. (2020). Calophyllum in Flora do Brasil 2020. Jardim Botânico do Rio de Janeiro. http://floradobrasil.jbrj.gov.br/

Carlquist, S. (1985). Ecological strategies of xylem evolution. University of California Press.

Carvalho, P. E. R. (1994). Espécies arbóreas brasileiras: guanandi (Calophyllum brasiliense) (Vol. 1, pp. 485–494). Embrapa.

Carvalho, P. E. R. (2003). Espécies arbóreas brasileiras (Vol. 1). Embrapa Informação Tecnológica.

Cruz, G. K. A., Pio, N. S., & Iwakiri, S. (2019). Longitudinal and transverse variation in the physical properties of wood red tauari. Floresta e Ambiente, 26(3), e20170336.

Cruz, T. M., Faria, R. S., Duarte, P. J., Mascarenhas, A. R. P., Borges, C., Mendes, L. M., & Cruz, C. R. (2020). Wood properties of Eucalyptus urophylla in different planting locations in Northeastern Brazil. UERGS Electronic Scientific Journal, 7(2), 203–211. http://dx.doi.org/10.21674/2448-0479.72.203-211

Devide, A. C. (2021). Agroforestry systems with guanandi (Calophyllum brasiliense) on terraces and floodplains in the Paraíba do Sul Valley, Brazil [Tese de doutorado]. https://doi.org/10.13140/RG.2.2.28472.70402

Díaz, D. M. V. (n.d.). Multivariate analysis of morphological and anatomical characters of Calophyllum (Calophyllaceae) in South America.

Duffecky, M., & Fossati, L. (2009). Evaluation of the adaptation of Calophyllum brasiliense Cambess. (guanandi) in the Northern Plateau of Santa Catarina. Journal of Scientific Communication, 16(2).

Erasmus, J., Drew, D. M., & Wessels, C. B. (2020). The flexural lumber properties of Pinus patula improve with decreasing initial tree spacing. Annals of Forest Science, 77(3), 1–15. https://doi.org/10.1007/s13595-020-00975-9

Esteban, L. G., de Palacios, P., Gasson, P., García-Iruela, A., García-Fernández, F., & García-Esteban, L. (2024). Hardwoods: anatomy and functionality of their elements — a short review. Forests, 15, 1162. https://doi.org/10.3390/f15071162
Froufe, L. C. M., Kalil, A., Bognola, I., Aguiar, A., Oliveira, E., & Fowler, J. A. (2022). Soil resistance and multivariate analysis as a method to assist progeny selection of Calophyllum brasiliense. Revista Árvore, 46. https://doi.org/10.1590/1806-908820220000025
Garbachevski, E. M., Hillig, E., Abreu Neto, R., Retslaff, F. A. S., & Koehler, H. S. (2022). Physico-mechanical properties and growth characteristics of pine juvenile wood as a function of age and planting spacing. Revista Árvore, 46(1). https://doi.org/10.1590/1806-908820220000027
Hacke, U. G., & Sperry, J. S. (2001). Functional and ecological xylem anatomy. Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics, 4(2), 97–115.
IAWA Committee. (1989). IAWA list of microscopic features for hardwood identification. IAWA Bulletin, 10(3), 219–332.
IBÁ – Indústria Brasileira de Árvores. (2025). Relatório anual 2024. IBÁ. https://iba.org/relatorio2024.pdf
Limeira, M. M. C., Bueno, M. C., Varavallo, M. A., Barilli, J., Ataíde, Y. S. B., Souza, B. A., Rodrigues, W. M., Santos, A. F., Giongo, M. V., & Erpen, M. L. (2022). Volumetric equations for Calophyllum brasiliense Cambess. in the south of Tocantins. Journal of Engineering Research, 2(1), 2–9. https://doi.org/10.22533/at.ed.317212210013
Monteiro, R. O., Dória, L. C., Ribeiro, E. S., Gonçalez, J. C., & Sonsin-Oliveira, J. (2026). Wood anatomy and its effects on physical properties in nineteen commercial species. Brazilian Journal of Botany, 49, artigo 13. https://doi.org/10.1007/s40415-026-01136-4
Muñiz, G. I. B., Nisgoski, S., & Shardosin, F. Z. (2012). Charcoal anatomy of forest species. Cerne, 18(3). https://doi.org/10.1590/S0104-77602012000300015
Nassur, O. A. C. (2010). Variações nas propriedades tecnológicas da madeira de toras de Toona ciliata M. Roem. com dezoito anos de idade [Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Lavras]. http://repositorio.ufla.br/handle/1/2455
Oliveira, J. T. S., Hellmeister, J. C., & Tomazello Filho, M. (2005). Variação do teor de umidade e da densidade básica na madeira de sete espécies de eucalipto. Revista Árvore, 29(1), 115–127. https://doi.org/10.1590/S0100-67622005000100013
Poubel, D. S., Garcia, R. A., Latorraca, J. V. F., & Carvalho, A. M. (2011). Anatomical structure and physical properties of Eucalyptus pellita wood. Floresta e Ambiente, 18(2). https://doi.org/10.4322/floram.2011.029
Richter, H. G., & Dallwitz, M. J. (2000). Commercial timbers: descriptions, illustrations, identification, and information retrieval.
Royal Botanic Gardens, Kew. (2024). Calophyllum brasiliense Cambess. Plants of the World Online. https://powo.science.kew.org/taxon/urn:lsid:ipni.org:names:427115-1
Sano, E. E., Rosa, R., Brito, J. L., & Ferreira Júnior, L. G. (2008). Mapeamento semidetalhado do uso da terra do Bioma Cerrado. Pesquisa Agropecuária Brasileira, 43, 153–156.
Schweingruber, F. H. (1990). Microscopic wood anatomy. Swiss Federal Institute for Forest, Snow and Landscape Research.
Serviço Florestal Brasileiro, & Souza, M. H. de. (2014). Madeiras tropicais brasileiras (Vol. 2). SFB/LPF.
Souza, A. M. de. (2006). Estrutura genética de populações naturais de Calophyllum brasiliense Camb. na bacia do Alto Rio Grande [Tese de doutorado]. Universidade Federal de Lavras.

Tarko, T., Krankowski, F., & Duda-Chodak, A. (2023). The impact of compounds extracted from wood on the quality of alcoholic beverages. Molecules, 28(2), 620. https://doi.org/10.3390/molecules28020620
Wiemann, M. C. (2010). Characteristics and availability of commercially important woods. In Wood handbook: wood as an engineering material (pp. 16–60). USDA Forest Service, Forest Products Laboratory.
Zobel, B. J., & Sprague, J. R. (1998). Juvenile wood in forest trees. Springer.

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Variação radial e longitudinal das propriedades físicas da madeira de *Carapa guianensis* Aubl.

Michelly Casagrande Stragliotto[125]; Márcia Laís Ferreira Silva[1]; Fernanda Dalfiôr Maffioletti[135]; Rafaela Estevão[1]; Rafael de Aguiar Rodrigues[3]; Letícia da Silva Moreira[135]; Victor Hugo Pereira Moutinho[125]; Fernando Wallase Carvalho Andrade[25]

[1] Universidade Federal do Oeste do Pará (UFOPA), Laboratório de Tecnologia da Madeira e Bioprodutos (LTM)
[2] Programa de Pós-Graduação em Ciência, Tecnologia e Inovação Florestal (PPGCTIF)
[3] Programa de Pós-Graduação em Sociedade, Natureza e Desenvolvimento (PPGSND)
[4] Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais (PPGCFL)
[5] Empresa Brasileira de Pesquisa e Inovação Industrial (Embrapii)
[6] Serviço Florestal Brasileiro (SFB), Laboratório de Produtos Florestais (LPF)

Resumo: A variabilidade das propriedades físicas da madeira influencia diretamente seu desempenho tecnológico e sua adequada aplicação industrial. Nesse contexto, o presente estudo teve como objetivo avaliar a variação radial e longitudinal da densidade básica, da retratibilidade e do coeficiente de anisotropia da madeira de *Carapa guianensis* Aubl. Ao longo do fuste foram coletados corpos de prova em seis alturas e três posições radiais, nos quais foram determinadas a densidade básica, as contrações radial, tangencial e volumétrica e o coeficiente de anisotropia. Os dados foram submetidos à análise de variância e comparação de médias. A posição radial exerceu maior influência sobre as propriedades físicas da madeira do que a posição longitudinal. Observou-se incremento da densidade básica e da contração volumétrica no sentido medula-casca, enquanto apenas a densidade básica apresentou variação significativa ao longo da altura do fuste. O coeficiente de anisotropia permaneceu relativamente constante entre as posições avaliadas, indicando estabilidade na relação entre as contrações tangencial e radial. Os resultados evidenciam que a distribuição das propriedades físicas da madeira de *Carapa guianensis* ocorre de forma heterogênea ao longo do raio do tronco, ressaltando a importância da posição de amostragem na caracterização tecnológica da espécie.

Palavras-chave: Estabilidade dimensional; Retratibilidade; Variabilidade radial.

Radial and Longitudinal Variation in the Physical Properties of *Carapa guianensis* Aubl. **Wood**

Abstract: The variability of wood physical properties directly influences its technological performance and suitability for industrial applications. This study aimed to evaluate the radial and longitudinal variation in basic density, shrinkage, and anisotropy coefficient of *Carapa guianensis* Aubl. wood. Specimens were collected from six longitudinal positions and three radial positions along the stem to determine basic density, radial, tangential, and volumetric shrinkage, as well as the anisotropy coefficient. The data were subjected to analysis of variance followed by mean comparison. Radial position exerted a greater influence on the physical properties of the wood than longitudinal position. Basic density and volumetric shrinkage increased from the pith toward the bark, whereas only basic density showed significant variation along the stem height. The anisotropy coefficient remained relatively constant among the evaluated positions, indicating stability in the relationship between tangential and radial shrinkage. The results demonstrate that the physical properties of *Carapa guianensis* wood are

heterogeneously distributed along the stem radius, highlighting the importance of sampling position in the technological characterization of the species.

Keywords: Dimensional stability; Shrinkage; Radial variability.

1. Introdução

A diversidade de espécies arbóreas da Amazônia representa importante potencial para o setor madeireiro, sendo o conhecimento das propriedades físicas da madeira essencial para seu adequado aproveitamento tecnológico. Entre essas propriedades, destacam-se a densidade e a estabilidade dimensional, que influenciam diretamente o processamento, a secagem e o desempenho da madeira em diferentes aplicações. Essas características são particularmente relevantes para as indústrias de madeira serrada e de produtos de maior valor agregado, como móveis, pisos, esquadrias e revestimentos, nas quais variações dimensionais podem comprometer a qualidade e o desempenho do produto final (Almeida et al., 2017; Almeida et al., 2023).

Carapa guianensis Aubl. (andiroba) é uma espécie nativa amplamente distribuída na Amazônia e apresenta relevância econômica tanto pela produção de óleo das sementes quanto pelo aproveitamento de sua madeira (Lameira & Medeiros, 2022). Entretanto, suas propriedades físicas podem variar em função das condições de crescimento e da posição de formação do lenho ao longo do fuste, influenciando seu comportamento tecnológico (Firmino et al., 2019).

Diante disso, o presente trabalho teve como objetivo avaliar a variação radial e longitudinal da densidade básica, da retratibilidade e do coeficiente de anisotropia da madeira de *Carapa guianensis* Aubl., visando compreender a distribuição dessas propriedades ao longo do fuste.

2. Material e métodos

2.1 Área de coleta

O material utilizado no estudo é proveniente de cinco árvores de *Carapa guianensis* de um plantio localizado na estação experimental do Centro de Tecnologia da Madeira - CTM da Superintendência do Desenvolvimento da Amazônia - SUDAM de Curuá-Una, localizada no município de Prainha, estado do Pará. A estação localiza-se nas coordenadas geográficas S02°32'40,1" e W054º05'26,9". Possui área aproximada de 71.250 ha, o clima da região é

classificado como tropical úmido, com temperatura média anual 27,5 °C e precipitação média anual de 1.720 mm (Garcia, 2014).

2.2 Confecção das amostras

A amostragem foi feita em 6 alturas distintas de cada indivíduo: 0 cm (base), (DAP), 40%, 60%, 80% e 100%, onde foram tomadas 3 posições equidistantes na direção medula-casca, correspondendo a uma região próxima à medula (1), a região intermediária (2) e a região próxima à casca (3), com 2 repetições para cada posição.

2.3 Determinação das propriedades físicas

A densidade básica, a retratibilidade e o coeficiente de anisotropia foram determinados em corpos de prova com dimensões de 2 × 3 × 5 cm conforme NBR 7190-3 (ABNT, 2022). Inicialmente, os corpos de prova foram climatizados em ambiente com temperatura de 20 ± 2 °C e umidade relativa de 65 ± 5%, até atingirem massa constante, condição correspondente a aproximadamente 12% de teor de umidade. A estabilização da massa foi verificada por pesagens sucessivas, considerando-se estabilizadas as amostras quando a variação entre duas determinações consecutivas foi inferior a 0,5%. Nessa condição, foram determinadas a massa e as dimensões nas direções tangencial, radial e longitudinal, utilizando balança eletrônica com resolução de 0,01 g e paquímetro digital com resolução de 0,01 mm, respectivamente.

Posteriormente, os corpos de prova foram saturados em água até a estabilização da massa, adotando-se como critério uma variação inferior a 0,5% entre duas pesagens consecutivas. Na condição saturada, foram novamente determinadas a massa e as dimensões nas direções tangencial, radial e longitudinal, sendo o volume obtido pelo método estereométrico.

Após a caracterização na condição saturada, os corpos de prova foram submetidos à secagem em estufa a 103 ± 2 °C até massa constante, considerada atingida quando a variação entre duas pesagens consecutivas foi inferior a 0,5%. Após a secagem, foram determinadas a massa anidra e as dimensões dos corpos de prova nas três direções anatômicas. A partir dos valores obtidos nas condições saturada e anidra, foram calculadas a densidade básica, as contrações tangencial, radial e volumétrica e o coeficiente de anisotropia, conforme os procedimentos estabelecidos pela ABNT NBR 7190-3 (ABNT, 2022).

2.4 Análise estatística

Os dados foram inicialmente tabulados no software Microsoft Excel e, posteriormente, submetidos às análises estatísticas no software RStudio (R Development Core Team, 2026), também utilizado para a elaboração dos gráficos. A normalidade dos resíduos e a homogeneidade das variâncias foram verificadas pelos testes de Shapiro–Wilk e Levene,

respectivamente, ambos ao nível de 5% de significância. Para a contração volumétrica, atendidos os pressupostos da análise paramétrica, foi realizada análise de variância (ANOVA), seguida do teste de Tukey a 5% de significância para comparação das médias. Para as demais variáveis, em razão da violação dos pressupostos de normalidade e/ou homogeneidade das variâncias, foi aplicado o teste não paramétrico de Kruskal–Wallis, também ao nível de 5% de significância.

3. Resultados e discussão

Os valores médios de contração total, densidade básica e coeficiente de anisotropia para *Carapa guianensis* Aubl. estão apresentados nas Tabelas 1 e 2, para as variações das propriedades no sentido medula-casca e na posição do fuste, respectivamente. Observou-se que a posição radial influenciou significativamente a densidade básica e as contrações tangencial, radial e volumétrica, enquanto a contração longitudinal e o coeficiente de anisotropia não apresentaram diferenças estatísticas entre as posições avaliadas. Em contrapartida, no sentido longitudinal, apenas a densidade básica variou significativamente ao longo do fuste, ao passo que as demais propriedades permaneceram estatisticamente constantes.

Tabela 1 – Variação das propriedades físicas da madeira de *Carapa guianensis* Aubl. na direção medula-casca

Posição	Densidade básica (g/cm³)	Contração total (%)				Coeficiente anisotrópico
		Tangencial	Radial	Longitudinal	Volumétrica	
1	0,542 b	6,73 b	3,93 a	0,25 a	11,21 c	1,91 a
2	0,599 a	7,36 a	4,27 b	0,24 a	12,22 b	1,81 a
3	0,593 a	7,75 a	4,87 b	0,25 a	13,29 a	1,64 a

Médias seguidas pela mesma letra nas colunas não apresentam diferenças estatísticas significativas segundo os testes de Tukey e Kruskal Wallis ao nível de 5% de significância.

Tabela 2 – Valores médios das propriedades físicas da madeira de *Carapa guianensis* Aubl. no sentido longitudinal do fuste (base-topo)

Altura	Densidade básica (g/cm³)	Contração total (%)				Coeficiente anisotrópico
		Tangencial	Radial	Longitudinal	Volumétrica	
1	0,559 b	7,10 a	4,28 a	0,29 a	12,02 a	1,88 a
3	0,560 b	7,57 a	4,43 a	0,21 a	12,57 a	1,78 a
4	0,568 b	7,38 a	4,53 a	0,24 a	12,51 a	1,77 a
5	0,596 a	7,21 a	4,21 a	0,24 a	11,99 a	1,79 a

6	0,608 a	7,05 a	4,32 a	0,28 a	11,99 a	1,72 a

Médias seguidas pela mesma letra nas colunas não apresentam diferenças estatísticas significativas segundo os testes de Tukey e Kruskal Wallis ao nível de 5% de significância.

De modo geral, esses resultados indicam que a variabilidade das propriedades físicas da madeira de *C. guianensis* é mais pronunciada no sentido radial do que no longitudinal, evidenciando que as alterações ocorridas da medula para a casca exercem maior influência sobre o comportamento físico da madeira do que aquelas observadas ao longo da altura do fuste. Esse comportamento demonstra que a posição de amostragem deve ser considerada na caracterização tecnológica da espécie, uma vez que as propriedades físicas não se distribuem de forma uniforme ao longo do tronco.

3.1 Densidade básica

A densidade básica média da madeira de *Carapa guianensis* foi de 0,58 g cm^{-3}, valor próximo ao reportado para a espécie por Firmino et al. (2019), Batista et al. (2020) e Martins et al. (2022), indicando que a madeira avaliada apresenta comportamento compatível com o descrito na literatura. As pequenas diferenças observadas entre os estudos podem estar relacionadas à procedência do material, às condições de crescimento e à posição de amostragem ao longo do fuste, fatores reconhecidamente associados à variabilidade da densidade da madeira em espécies amazônicas (Mori et al., 2024).

A distribuição da densidade ao longo do fuste evidenciou tendência de aumento no sentido medula-casca (Figura 1), embora esse comportamento não tenha ocorrido de forma uniforme em todas as alturas avaliadas.

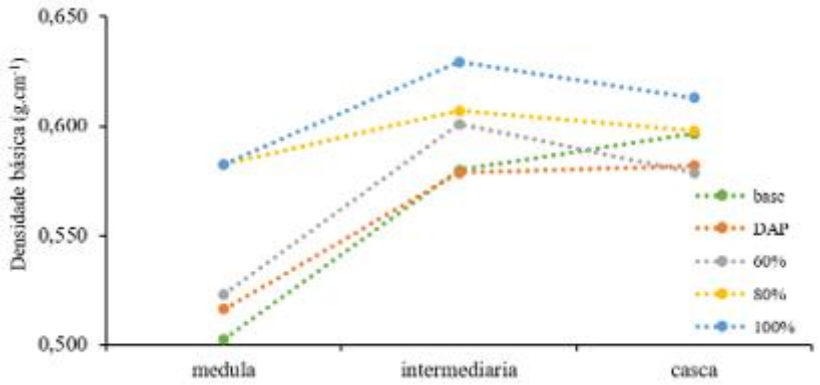


Figura 1. Valores médios da variação da densidade básica em função da posição no fuste (base-topo) e posição radial (medula-casca).

De maneira geral, maiores valores de densidade foram observados nas regiões mais externas do tronco, comportamento frequentemente atribuído às modificações estruturais que acompanham a maturação do lenho, como o aumento da espessura da parede celular e alterações nas dimensões do lume das fibras (Zobel e van Buijtenen, 1989; Nezu et al., 2022). Entretanto, o incremento radial ocorreu predominantemente da posição próxima à medula para a região intermediária, sendo observada discreta redução da densidade na posição próxima à casca na maioria das alturas avaliadas. A única exceção foi verificada na base do fuste, onde a densidade aumentou continuamente ao longo das três posições radiais, sugerindo comportamento distinto dessa região em relação às demais alturas.

O padrão observado corrobora os resultados obtidos por Firmino et al. (2019), que também verificaram incremento da densidade básica em direção à casca em *Carapa guianensis*, indicando que a variação radial da densidade constitui uma característica consistente da espécie. No sentido longitudinal, observou-se tendência de aumento da densidade da base em direção ao topo do fuste; entretanto, essa variação foi menos pronunciada que a observada no sentido radial, evidenciando que as diferenças ao longo do raio exerceram maior influência sobre a distribuição da densidade da madeira.

3.2 Retratibilidade

A contração volumétrica apresentou tendência crescente da medula para a casca em todas as alturas avaliadas (Figura 2), corroborando os resultados observados na Tabela 1. De maneira geral, o maior incremento ocorreu entre as posições intermediária e próxima à casca, indicando maior variação dimensional nas regiões mais externas do tronco durante a secagem.

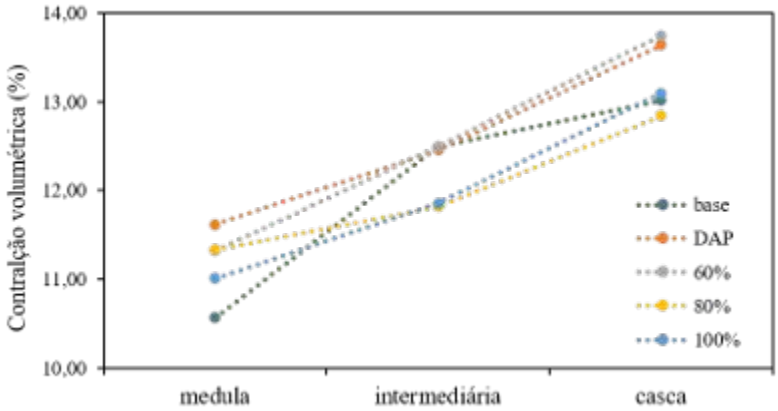


Figura 2. Variação do valor de contração volumétrica ao longo da Altura e Posição medula-casca.

Esse comportamento acompanha parcialmente a distribuição da densidade básica (Figura 1), indicando que regiões com maior densidade podem apresentar maior retração volumétrica em função da maior quantidade de parede celular por unidade de volume. Entretanto, a magnitude da retração não depende exclusivamente da densidade, sendo também influenciada pela organização anatômica da madeira e pelas interações entre a água ligada e a parede celular durante a secagem (Kollmann & Côté, 1968; Thybring et al., 2022; Gao et al., 2022; Zhao & Yang, 2025)

Embora tenha sido observada tendência geral de aumento da contração volumétrica da medula para a casca, esse comportamento manteve-se semelhante entre as diferentes alturas do fuste, evidenciado pelo paralelismo das curvas na Figura 2. Esse resultado indica que a posição radial exerceu maior influência sobre a contração volumétrica do que a posição longitudinal da madeira, corroborando os resultados obtidos na análise dos fatores isolados.

3.2 Coeficiente de anisotropia

O coeficiente de anisotropia, obtido pela relação entre as contrações tangencial e radial, constitui um dos principais indicadores da estabilidade dimensional da madeira, sendo amplamente utilizado para avaliar seu comportamento durante a secagem (Almeida et al., 2017). Embora a análise dos fatores isolados não tenha indicado diferenças significativas entre as posições radiais e alturas avaliadas (Tabelas 1 e 2), a Figura 3 evidencia tendência de redução dos valores no sentido medula-casca na maior parte das alturas analisadas, sendo essa tendência mais pronunciada nas regiões inferiores do fuste.

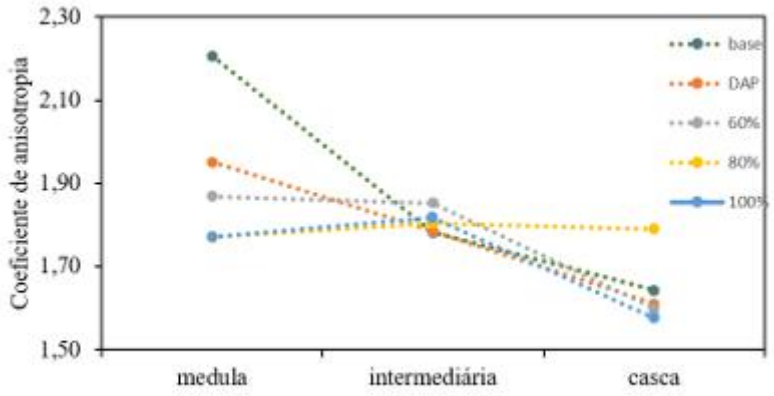


Figura 3. Valores médios de coeficiente anisotrópico nas diferentes alturas no fuste e posição no raio.

Essa tendência acompanha o comportamento radial observado para as demais propriedades físicas da madeira de *Carapa guianensis*, especialmente a densidade básica e a

contração volumétrica, indicando que as modificações ocorridas ao longo do raio do tronco também podem influenciar o comportamento da anisotropia. Firmino et al. (2019) também verificaram variações radiais nas propriedades físicas da espécie, reforçando a heterogeneidade da madeira ao longo do sentido medula-casca.

Apesar da tendência visual observada, a ausência de diferença estatística indica que a anisotropia da madeira de *Carapa guianensis* permaneceu relativamente constante ao longo do fuste. Esse resultado demonstra que as variações observadas na densidade básica e na contração volumétrica não foram suficientes para alterar significativamente a relação entre as contrações tangencial e radial da madeira.

4. Conclusões

A posição radial exerceu maior influência sobre as propriedades físicas da madeira de Carapa guianensis do que a posição longitudinal, com aumento da densidade básica e da contração volumétrica da medula para a casca, enquanto o coeficiente de anisotropia permaneceu relativamente constante ao longo do fuste. Esses resultados são relevantes para as indústrias de madeira serrada, móveis, pisos, esquadrias e revestimentos, pois evidenciam a importância de considerar a posição radial da madeira durante a seleção, secagem e processamento, contribuindo para maior uniformidade e estabilidade dimensional dos produtos.

5. Agradecimentos

Os autores agradecem à Financiadora de Estudos e Projetos (FINEP), por meio do projeto XILOREC (Edital Recuperação e Preservação de Acervos 2024), à Empresa Brasileira de Pesquisa e Inovação Industrial (EMBRAPII) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pela concessão de bolsa de Produtividade em Pesquisa, pelo apoio financeiro ao desenvolvimento desta pesquisa. O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

6. Referências bibliográficas

Almeida, T. H. de, Almeida, D. H. de, Aquino, V. B. de M., Christoforo, A. L., & Lahr, F. A. R. (2023). Analytical study of the dimensional stability of tropical Brazilian wood species. *Ciência Florestal*, *33*(1), e65389. https://doi.org/10.5902/1980509865389

Almeida, T. H. de, Almeida, D. H. de, Araujo, V. A. de, Silva, S. A. M. da, Christoforo, A. L., & Lahr, F. A. R. (2017). Density as estimator of dimensional stability quantities of Brazilian

tropical woods. *BioResources, 12*(3), 6579–6590. https://doi.org/10.15376/biores.12.3.6579-6590

Alzate, S. B. A., Tomazello Filho, M., & Piedade, S. M. S. (2005). Variação longitudinal da densidade básica da madeira de clones de *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden, *E. saligna* Sm. e *E. grandis* × *E. urophylla*. *Scientia Forestalis*, (68), 87–95.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). ABNT NBR 7190-3: Projeto de estruturas de madeira – Parte 3: Métodos de ensaio para corpos de prova isentos de defeitos para madeiras de florestas nativas. Rio de Janeiro: ABNT, 2022

Batista, F. G., Melo, R. R. de, Calegari, L., Medeiros, D. T. de, & Lopes, P. J. G. (2020). Resistência natural da madeira de seis espécies à *Nasutitermes corniger* Motsch. em condição de campo. *Madera y Bosques, 26*(2), e2622017. https://doi.org/10.21829/myb.2020.2622017

Firmino, A. V., Vidaurre, G. B., Oliveira, J. T. da S., Guedes, M. C., Almeida, M. N. F. de, Silva, J. G. M. da, Latorraca, J. V. de F., & Zanuncio, J. C. (2019). Wood properties of *Carapa guianensis* from floodplain and upland forests in Eastern Amazonia, Brazil. *Scientific Reports, 9*, 10641. https://doi.org/10.1038/s41598-019-46943-w

Gao, Y., Fu, Z., Zhou, Y., Gao, X., Zhou, F., & Cao, H. (2022). Moisture-related shrinkage behavior of wood at macroscale and cellular level. *Polymers, 14*(22), 5045. https://doi.org/10.3390/polym14225045

Garcia, S. S. C. (2014). *Estudos dendrocronológicos em Euxylophora paraensis Huber (Rutaceae) e Carapa guianensis Aubl. (Meliaceae) provenientes de plantios em terra firme na Amazônia Oriental* (Dissertação de mestrado). Universidade Federal Rural da Amazônia.

Kollmann, F. F. P., & Côté, W. A., Jr. (1968). *Principles of wood science and technology I: Solid wood*. Springer-Verlag.

Lameira, O. A., & Medeiros, A. P. R. (2022). *Carapa guianensis*: Andiroba. Em L. Coradin, J. Camillo, & I. C. G. Vieira (Eds.), *Espécies nativas da flora brasileira de valor econômico atual ou potencial: plantas para o futuro: região Norte* (pp. 1174–1183). Ministério do Meio Ambiente.

Martins, A. C. da S., Costa, F. L. dos A., Barbosa, A. de S., Rodrigues, V. M., Silva, G. R., Silva, E. B. S. da, Oliveira, E. A. de, & Figueiredo, M. F. de. (2022). Avaliação das propriedades físicas das madeiras de Andiroba (*Carapa guianensis* Aubl.) e *Parkia* sp. comercializadas em um município da Amazônia. *9º Congresso Florestal Brasileiro, 1*(1), 37–41. https://doi.org/10.55592/CFB.2022.3457196

Mori, G. B., Schöngart, J., Schietti, J., Householder, J. E., Robin, M., Wittmann, F., Poorter, L., & Piedade, M. T. F. (2024). Ecosystem type affects how Amazonian tree species invest in stem and twig wood. *Functional Ecology, 38*(7), 1486–1496. https://doi.org/10.1111/1365-2435.14572

Nezu, I., Ishiguri, F., Ohshima, J., & Yokota, S. (2022). Relationship between the xylem maturation process based on radial variations in wood properties and radial growth increments of stems in a fast-growing tree species, *Liriodendron tulipifera*. *Journal of Wood Science, 68*, 48. https://doi.org/10.1186/s10086-022-02057-y

R Core Team. (2017). *R: A language and environment for statistical computing* [Software]. R Foundation for Statistical Computing. https://www.R-project.org/

Thybring, E. E., Fredriksson, M., Zelinka, S. L., & Glass, S. V. (2022). Water in wood: A review of current understanding and knowledge gaps. *Forests, 13*(12), 2051. https://doi.org/10.3390/f13122051

Zhao, M., & Yang, L. (2025). Free drying shrinkage of wood: A review. *BioResources, 20*(3), 7890–7902. https://doi.org/10.15376/biores.20.3.Zhao

Zobel, B. J., & van Buijtenen, J. P. (1989). *Wood variation: Its causes and control*. Springer-Verlag.

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

VII CBCTEM
CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA MADEIRA
Viçosa/2026

Variações na morfologia das fibras da madeira de clones de *Eucalyptus*

José Tarcísio Lima[1]; Christine M. Cahalan[2]

[1] Departamento de Ciências Florestais – Universidade Federal de Lavras, 37202-000 Lavras MG

[2] School of Environmental and Natural Sciences – Bangor University – R.U.

Resumo: As fibras de madeira de *Eucalyptus* são os principais componentes estruturais que influenciam as propriedades físicas e mecânicas da madeira, além de sua industrialização e uso. O conhecimento sobre as variações na morfologia das fibras é importante, pois constituem a base para o melhoramento genético. Este estudo teve como objetivo principal avaliar variações radiais no comprimento (CF), na largura (LF), no diâmetro do lúmen (DL) e na espessura da parede (EP) das fibras de madeira de 11 clones de *Eucalyptus* de oito anos, plantados em quatro ambientes. As fibras foram medidas após maceração de pequenos cavacos obtidos em três posições radiais de amostragem no caule. Foi possível concluir que o CF e a EP foram maiores na madeira externa do que na madeira interna do caule. No entanto, essa tendência não foi claramente observada em relação à LF e ao DL. A análise de variância revelou diferenças significativas no CF, na LF e no DL entre clones e entre locais; contudo, a EP apresentou diferenças significativas apenas entre os clones.

Palavras-chave: Qualidade da madeira; Biometria das fibras; Ambiente.

Variations in wood fiber morphology of *Eucalyptus* clones

Abstract: *Eucalyptus* wood fibers are the primary structural components influencing the physical and mechanical properties of wood, as well as its industrial processing and utilization. Understanding variations in fiber morphology is important, as these variations form the basis for genetic improvement. The main objective of this study was to evaluate radial variations in fiber length (FL), fiber width (FW), lumen diameter (LD), and wall thickness (WT) in the wood of 11 eight-year-old *Eucalyptus* clones planted across four environments. The fibers were measured after the maceration of small sticks obtained from three radial sampling positions in the stem. It was concluded that fiber length (FL) and cell wall thickness (WT) were higher in the outer wood

than in the inner wood of the stem. However, this trend was not clearly observed regarding FW and LD. Analysis of variance revealed significant differences in FL, FW, and LD among clones and sites; however, WT showed significant differences only among clones

Keywords: Wood quality; Fiber biometry; Environment.

1. Introdução

a.

Os principais componentes anatômicos em madeira de folhosas são as fibras libriformes. Sendo assim, o comportamento da madeira é diretamente influenciado pela morfologia das fibras, seja no caso da madeira maciça ou de produtos feitos com de fibras de madeira individualizadas, como polpa celulósica e painéis de fibras.

As proporções dos vários tipos de células em uma peça de madeira apresentam ampla variação entre espécies de forma que, por exemplo, em angiospermas o volume do xilema ocupado por fibras pode variar entre 25% em *Erytrhina* e 70% em *Eucalyptus* (Wardrop, 1964). Wilkes (1988), em revisão sobre o tema, resumiu os tipos de células da madeira de *Eucalyptus* em *1)* fibra: 10 - 20 μm em diâmetro; 0,8 – 1,3 mm de comprimento, ocupando mais do que 60% do volume da madeira; *2)* Vasos: solitários e difusos, 80 - 180 μm em diâmetro, ocupando entre 10 - 20% do volume da madeira; *3)* Raios: seriados de 1 - 3, apresentando menos do que 20 células de altura, ocupando entre 10 - 20% do volume da madeira; *4)* - Traqueídeos vasicêntricos, ocupando menos do que 2% do volume da madeira.

Investigações sobre a variação da biometria das fibras têm sido conduzidas por vários autores (Ramos et al., 2011; Carrillo-Varela et al., 2015; Baldin et al., 2017; Mauri et al., 2017). Entretanto, informações que envolvam as variações dentro de árvores de clones de *Eucalyptus*, plantados simultaneamente em vários ambientes, são incomuns.

O objetivo deste trabalho foi avaliar variações radiais no comprimento, largura, diâmetro dos lumens e na espessura da parede das fibras da madeira de 11 clones de *Eucalyptus*, cultivados experimentalmente em quatro ambientes.

2. Material e métodos

b. 2.1 Material genético, condições de crescimento e de amostragem

As amostras das madeiras empregadas nesse estudo foram coletadas de 11 clones de *Eucalyptus grandis* × *E. urophylla* (híbridos naturais) com oito anos de idade, plantados

experimentalmente em quatro locais (Sul da Bahia- SBA, São Mateus 1- SM1, São Mateus 2- SM2 e Aracruz- ARA), usando originalmente o delineamento experimental de blocos casualizados, espaçados 3,0 x 3,0 m, com 26 tratamentos (clones) e três repetições. Para o presente estudo o efeito do bloco não foi considerado, uma vez que estudos prévios avaliando a relação entre produção florestal e características do solo fizeram uso de algumas árvores. O material genético utilizado não foi selecionado para morfologia das fibras o que permitiu a utilização do modelo estatístico casualizado. As árvores-amostras foram consideradas representativas das dominantes e co-dominantes. A altura total média das árvores, por local de amostragem, variou de 27,1 m a 32,2 m e o DAP médio variou de 19,7 cm a 24,2 cm. De cada árvore a tora basal de 3,10 m foi coletada e desdobrada com a finalidade de fornecer amostras para medição de outras características, além das empregadas neste trabalho.

c. 2.2 Preparo das amostras

Da base do caule, foram cortadas pranchas de 1,0 m de comprimento. Sarrafos de 20 mm × 20 mm foram confeccionados com a finalidade de preparar corpos-de-prova para ensaios mecânicos. Desses sarrafos foram retiradas as amostras de 20 x 20 x 20 mm para estudo da morfologia das fibras. Durante essa fase, especial cuidado foi tomado para assegurar a representação da extensão radial da tora, que foi dividida em três regiões: interna, intermediária e externa.

O comprimento das fibras (CF), a largura das fibras (LF) e o diâmetro dos lumens (DL) foram medidos para caracterizar as dimensões das fibras. A espessura da parede das fibras (EP) foi calculada pela relação EP = (LF - DL)/2. Todas as medições foram realizadas em material macerado, em que pequenas lascas retiradas do bloco foram colocadas em tubos de ensaio contendo solução de maceração (50 partes de ácido acético glacial + 50 partes de hidróxido de hidrogênio 30%). O tubo de ensaio foi aquecido em banho-maria a 90-95°C, por 60 minutos em capela de exaustão até que as lascas ficassem branqueadas e dissociadas quando levemente agitadas. A solução de maceração foi removida com cuidado, as fibras foram lavadas três vezes para remoção dos reagentes, evitando-se perder fibras. Após a lavagem água destilada foi adicionada.

Para montar as fibras, o tubo de ensaio foi agitado, produzindo uma suspensão de fibras. Uma gota dessa suspensão foi disposta sobre uma lâmina e coberta com lamínula. As dimensões das fibras foram medidas imediatamente usando-se um medidor digital. As dimensões foram

consideradas como a média de 50 valores. Foram medidas 6600 fibras: 50 medições × três posições radiais × 11 clones × quatro locais.

2.3 Análise dos dados

As análises estatísticas foram conduzidas usando-se o programa Minitab versão 11.11, Minitab Inc. Minitab. Foi feita a ANOVA para estimar os efeitos do clone e local sobre cada dimensão das fibras. Todos os efeitos foram assumidos como aleatórios, uma vez que os clones não foram selecionados para as dimensões das fibras; os locais foram considerados como uma amostra aleatória de ambientes disponíveis para cultivar clones de *Eucalyptus* no Brasil.

3. Resultados e discussão

d. 3.1 Variação radial na morfologia das fibras

Os resultados apresentados neste item referem-se às médias dos 11 clones estudados. Para um clone e local específicos (Resultado não apresentado aqui), a variação no comprimento das fibras (CF), da largura das fibras (LF), do diâmetro dos lumens (DL) e da espessura da parede das fibras (EP), da medula para a casca pode exibir tendência diferente da média dos clones, dependendo da variação em análise.

A Tabela 1 mostra que o CF aumentou 19,1% radialmente no caule, enquanto a EP aumentou 17,6% da madeira central para a externa. Apesar da amostragem limitada ao longo do raio, a redução da taxa de crescimento da posição intermediária para a externa, indica uma tendência de estabilização do CF. De acordo com Malan (1991) a EP aumenta rapidamente com a idade como um resultado do efeito combinado de um aumento na LF e no decréscimo no DL. Entretanto, esses comportamentos não foram observados claramente neste estudo. Tendência semelhante foi relatada por Tomazello-Filho (1985) e por Ramos et al. (2011), por exemplo, também para madeira de *Eucalyptus*. Em *E. grandis, E. saligna* e *E. urophylla* com sete anos de idade, o CF aumentou cerca de 12% da região intermediária da tora para a região externa, o mesmo comportamento da EP (Shimoyama, 1991). Wilkes (1988), em um review, encontrou cerca de 50% de aumento no CF da medula para a casca, em *Eucalyptus* a partir dos 10-20 anos de idade, período de produção de lenho juvenil.

Tem sido aceito que o CF e a EP aumentam a partir da medula, inicialmente muito rapidamente, mas, usualmente, reduzindo-se depois de 8-15 anéis (Chalk, 1983; Ramos et al., 2011), o que sugere tendência à estabilização. Madeiras formadas em condições de altas taxas

de crescimento podem revelar comportamentos distintos daqueles exibidos pelas mesmas espécies, mas que desenvolvem-se em ambientes menos favoráveis.

A Tabela 1 mostra que, para qualquer local, a LF média e o DL médio aumentam da posição interna para a intermediária, decrescendo ligeiramente a partir daí, o que sugere efeito ambiental. Entretanto, uma compreensão mais precisa do dessa variação depende do efeito do sítio sobre cada material genético. De acordo com Mauri et al. (2017) o efeito da condição de crescimento sobre essas variáveis depende do clone e/ou posição radial. Um exame da Tabela 1 permite inferir que a LF média observada na posição intermediária (18,76 μm) é somente 3,4% maior do que na posição interna (18,14 μm) e praticamente a mesma daquela observada na posição externa (18,72 μm). O DL médio observado na posição intermediária (11,5 μm) é somente 0,9% maior do que aquele da posição interna (11,4 μm) e 6,5% maior do que aquele da posição externa (10,8 μm). Em nenhum dos sítios foi observado aumento consistente da LF e do DL a partir da medula. Resultados próximos aos deste trabalho foram encontrados para *E. grandis* de sete anos de idade (Shimoyama, 1991) e para *E. globulus* e *E. nitens* de 7 anos de idade cultivados na Tasmânia, região de clima temperado (Hudson *et al*., 1998). Para a madeira adulta, Wilkes (1988) percebeu que, para *Eucalyptus*, a partir de 10-20 anos de crescimento juvenil ocorreu somente 10% de crescimento na LF. Para *E. grandis*, Malan & Gerisher (1987) e Bhat *et al*. (1990) verificaram que, assim como o CF e a EP, a LF aumenta a partir da medula, estabilizando-se a partir de 8 a 15 anos de idade.

Tabela 1 – Variação radial das dimensões das fibras de 11 clones de *Eucalyptus*, plantados em quatro locais (SBA- Sul da Bahia; SM1- São Mateus 1; SM2- São Mateus 2 e ARA- Aracruz).

Características	Local	**1370. Posição Radial**			Média
		Interna	Intermediária	Externa	
Comprimento das fibras (mm)	SBA	0,980	1,089	1,214	1,141
	SM1	0,965	1,048	1,111	1,071
	SM2	0,915	1,018	1,105	1,051
	ARA	0,933	1,040	1,084	1,051
	Média	**0,948**	**1,049**	**1,129**	**1,079**
Largura das fibras (μm)	SBA	19,28	19,57	20,82	20,17
	SM1	18,88	19,00	18,33	18,65
	SM2	16,68	18,18	18,07	17,97
	ARA	17,70	18,30	17,66	17,92
	Média	**18,14**	**18,76**	**18,72**	**18,68**

Diâmetro dos lumens (μm)	SBA	12,2	12,0	12,4	12,2
	SM1	12,4	12,1	10,6	11,4
	SM2	9,8	10,5	10,2	10,3
	ARA	11,1	11,2	10,0	10,6
	Média	**11,4**	**11,5**	**10,8**	**11,1**
Espessura das paredes (μm)	SBA	3,5	3,8	4,2	4,0
	SM1	3,2	3,5	3,8	3,6
	SM2	3,4	3,8	3,9	3,9
	ARA	3,3	3,5	3,9	3,7
	Média	**3,4**	**3,7**	**4,0**	**3,8**

De acordo com Shimoyama (1991), em *E. grandis* o DL decresceu cerca de 9,4% da região intermediária para a região externa do tronco, em contraste com o comportamento relatado no presente estudo. Entretanto, para a mesma investigação, em *E. saligna* e em *E. urophylla* o DL mostrou valores semelhantes nessas duas posições. Resultados com comportamentos distintos têm sido publicados; por exemplo, em *E. grandis* com três anos de idade, o DL não variou da medula para a casca (Brasil e Ferreira, 1979), contrastando com o comportamento reportado para a mesma espécie na idade de cinco anos (Bamber & Humphreys, 1963), em que o DL reduziu a partir da medula; diferente de Carpim *et al*. (1985) que encontraram que o DL aumentou da medula para a casca, tanto em *E. grandis* quanto em *E. saligna*.

Essa variação da LF e do DL da região interna para a externa sugere que, para os clones e locais aqui relatados, não há comportamentos comuns a todas as características, nem mesmo relação direta entre elas. A LF e o DL parece manterem-se sem tendência definida com o crescimento da árvore. De acordo com Chalk (1983) existe uma tendência geral para a LF aumentar da medula para fora. Conforme mostrado para LF e DL (Tabela 1), esse comportamento não foi geralmente observado para os diferentes sítios. Assim como verificado para o CF e EP, a menor taxa de crescimento experimentada pelo caule na região externa resulta em menores ganhos da LF e do DL.

A Tabela 2 demonstra que existe diferença estatística significativa para o CF e para a EP entre as três posições radiais de amostragem ($P \leq 0,01$) quando os dados dos quatros locais são analisados conjuntamente. Porém, a mesma tabela demonstra que não existe diferença significativa, tanto na LF quanto no DL, entre as posições radiais, ao se analisar todos os dados conjuntamente. Esse comportamento foi também constatado por Ramos et al. (2011) em CF e EP de madeira de *E. Grandis* com 23 anos.

Tabela 2 – Resumo da ANOVA one-way das dimensões das fibras de 11 clones de *Eucalyptus* entre posições radiais.

Característica	Posição Radial [g.l. (posição)= 2; g.l. (erro) = 129; g.l. (total) = 131]
Comprimento das fibras	**
Largura das fibras	ns
Diâmetro dos lumens	ns
Espessura da parede	**

ns- não significante em P = 0,05; * P≤ 0,05; ** P≤ 0,01.

3.2 Variação na morfologia das fibras entre clones e locais

Tabela 3 – Estatística descritiva do comprimento da fibra (mm) e espessura da parede da fibra (μm) da madeira de 11 clones de *Eucalyptus*, para quatro locais (SBA – Sul da Bahia; SM1 - São Mateus 1; SM2 - São Mateus 2; ARA - Aracruz).

Clone	**Local**								**Média**	
	SBA		**SM1**		**SM2**		**ARA**			
	CF	**EP**	**CF**	**EP**	**CF**	**EP**	**CF**	**EP**	**CF**	**EP**
1	1,039	3,5	1,094	3,6	1,062	3,8	0,988	3,5	1,046	3,6
2	1,088	2,9	1,004	3,0	1,087	4,0	1,004	2,8	1,046	3,2
3	1,270	4,6	1,211	3,5	1,147	3,4	1,107	3,3	1,184	3,7
4	1,140	4,8	1,060	3,3	1,056	4,6	1,000	3,7	1,064	4,1
5	1,176	3,6	1,087	3,6	1,049	3,3	0,988	4,2	1,075	3,7
6	1,133	3,9	1,092	3,8	1,061	3,7	1,154	3,5	1,110	3,7
7	1,061	3,3	1,109	3,3	1,111	4,6	1,074	3,5	1,088	3,6
8	1,267	4,9	1,135	4,0	1,099	4,0	1,152	4,2	1,163	4,3
9	1,184	5,2	0,945	4,3	1,036	4,4	1,041	4,3	1,052	4,6
10	1,082	3,3	1,017	3,2	0,921	3,3	1,046	3,7	1,017	3,4
11	1,109	3,7	1,027	4,3	0,934	3,2	1,013	3,7	1,021	3,7
Média	1,141	4,0	1,071	3,6	1,051	3,9	1,051	3,7	1,079	3,8
CV (%)	6,8	19,9	6,7	11,8	6,6	13,3	5,9	12,1	5,1	10,5
Mínima	1,039	2,9	0,945	3,0	0,921	3,2	0,988	2,8	1,017	3,2
Máxima	1,270	5,2	1,211	4,3	1,147	4,6	1,154	4,3	1,184	4,6

A média geral do CF, entre clones e locais foi igual a 1,079 mm (Tabela 3), o que está dentro do intervalo de CF para madeira de *Eucalyptus*, que vai de 0,75 mm a 1,30 mm (Barrichelo & Brito, 1976). O comprimento médio das fibras foi maior para madeira do SBA (1,141 mm) e menor para SM2 e ARA (1,051 mm). O CV (%) do CF variou entre 5,9% (ARA) e 6,8% (SBA). Isto denota que a amplitude do CF entre os clones é pequena para os quatro locais amostrados. O Clone 3 exibiu as fibras mais longas (média entre locais = 1,184 mm) enquanto o Clone 10 exibiu as mais curtas (1,017 mm). A diferença entre o maior e o menor CF foi máxima em SM1 (28% entre o clone 3 e o clone 9) e mínima em ARA (16,8% entre o clone 5 e o clone 6).

A EP média foi igual a 3,8 μm (Tabela 3). Esse valor está contido no intervalo de EP entre 2,5 μm e 6,0 μm para madeira de *Eucalyptus* (Barrichelo & Brito, 1976). A maior EP foi observada na madeira do SBA (4,0 μm) e a menor em SM1 (3,6 μm). Essas EP são maiores que a EP média (três locais e cinco clones) de *Eucalyptus* com cinco anos de idade encontrados por Demuner e Bertolucci (1993). O CV da EP, entre clones em cada local, oscilou de 12,1% (ARA) a 19,9% (SBA) (Tabela 3). A variação média da EP (CV = 10,5%) foi maior do que a do CF (CV = 5,1%). O CV médio (três locais e nove clones) da EP da madeira de clones de *Eucalyptus* encontrado por Demuner & Bertolucci (1993) foi igual a 12,1%. O clone 9 exibiu a parede das fibras mais espessa entre os locais (4,6 μm), o clone 2 exibindo a menor (3,2 μm) (Tabela 3). A amplitude total da EP foi maior no SBA (79% entre o clone 2 e o clone 9) e menor em SM1 (43% entre o clone 9, ou 18, e o clone 2).

Os valores de LF e DL por clone foram determinados, mas não são apresentados neste texto. Apesar disso, a seguir os resultados dessas características são descritos.

A LF média geral encontrada nesta investigação foi igual a 18,68 μm. Pela classificação de Panshin & De Zeeuw (1970) essa fibra pode ser considerada como de largura média. Esse valor está incluído no intervalo para LF de madeira de *Eucalyptus*, que vai de 12 μm a 20 μm (Barrichelo e Brito, 1976). A LF foi maior na madeira do SBA e menor na madeira de ARA. O CV da LF entre clones em cada local indicou baixa variação dos clones nos quatro locais. O clone 3, entre os 11, exibiu a fibra mais larga em SM1, enquanto o clone 5 exibiu a fibra mais estreita em ARA. A amplitude total da LF foi maior em SM1 e menor em SM2.

O DL médio foi igual a 11,1 μm. Esse valor está além do máximo para a madeira de *Eucalyptus* (Barrichelo & Brito, 1976) (de 6,0 a 10,0 μm), mas, está próximo daqueles de *E. grandis* (11,1 μm), *E. saligna* (10,1 μm) e *E. urophylla* (10,6 μm) (Shimoyama, 1991). O DL médio foi maior para madeira do SBA e menor para madeira de SM2. Por sua vez, o CV do DL

entre clones para cada local indicou que SM2 produziu DL ligeiramente mais homogêneos que ARA, SM1 e SBA. A amplitude total do DL foi maior em ARA e menor em SM2.

A Tabela 4 mostra que existem diferenças significativas ($p \leq 0,01$) entre clones e entre locais para o CF, LF e DL. Para a EP a diferença foi significativa somente entre clones. Esse resultado é parcialmente corroborado por Demuner & Bertolucci (1993) que encontraram que o CF de nove clones de *Eucalyptus* com cinco anos de idade, cultivados em três locais apresentaram diferenças significativas entre locais, mas não entre clones. A EP desses nove clones mostrou diferença significativa entre locais e entre clones. Diferentemente, Malan & Verryn (1996) verificaram para *E. grandis* que as diferenças em CF entre 26 locais e entre 37 clones foram altamente significantes.

Tabela 4 – Análise de variância balanceada das dimensões das fibras de onze clones de *Eucalyptus* em função de clone e local. (ns- não significante; ** $P \leq 0,01$).

Propriedade	Fonte	G.L.	SQ	QM	F	P
Comprimento da fibra	Clone	10	0,118532	0,011853	4,49	**
	Local	3	0,059538	0,019846	7,52	**
	Erro	30	0,079214	0,002640		
	Total	43	0,257284			
Largura da fibra	Clone	10	48,3516	4,8352	5,46	**
	Local	3	36,1506	12,0502	13,61	**
	Erro	30	26,5628	0,8854		
	Total	43	111,0649			
Diâmetro do lúmen	Clone	10	80,962	8,096	5,30	**
	Local	3	25,492	8,497	5,56	**
	Erro	30	45,858	1,529		
	Total	43	152,312			
Espessura da parede	Clone	10	6,1491	0,6149	2,91	**
	Local	3	0,8389	0,2796	1,32	ns
	Erro	30	6,3436	0,2115		
	Total	43	13,3316			

4. Conclusões

O estudo das dimensões das fibras de madeira de 11 clones de *Eucalyptus* com oito anos de idade, plantados experimentalmente em quatro locais no Brasil, permitiram concluir que o

comprimento (CF) e a espessura da parede (EP) das fibras aumentaram da madeira mais interna para a mais externa. As variações radiais médias do CF e da EP, foram de 19% e 18%, respectivamente. As diferenças nas dimensões entre as posições radiais foram estatisticamente significantes ($p \leq 0,01$). A largura (LF) e o diâmetro do lúmen (DL) das fibras não mostraram um padrão claro de variação entre as posições radiais de amostragem, nem apresentaram diferenças estatísticas significativas entre as posições de amostragem. Somente em um dos quatro sítios (São Mateus 2) foi encontrada uma diferença estatística significativa para a LF entre as três posições radiais. As ANOVA mostraram que houve diferenças significativas no CF, na LF e no DL entre clones e entre locais. A EP apresentou diferença significativa apenas entre clones.

5. Referências bibliográficas

a.

Baldin, T.; Marchiori, J . N. C. & Talgatti, M. (2017). Morfologia radial das fibras no lenho de quatro espécies de *Eucalyptus* l'her. In: Congresso Brasileiro de Ciência e Tecnologia da Madeira, III. CBCTEM, Florianópolis. 7p.

Bamber, R. K. & Humphreys, F. R. (1963). A preliminary study of some wood properties of *Eucalyptus grandis* (Hill), Maiden. J. Inst. Wood Sci, v.11, p. 66-70.

Barrichelo, L. E. G. & Brito, J. O. (1976). A madeira das espécies de eucalipto como matéria-prima para a indústria de celulose e papel. PRODEPEF. Série Divulgação, Brasília, v.13, p. 1-45.

Bhat, K. M.; Bhat, K. V. & Dhamodaran, T. K. (1990). Wood density and fibre length of *Eucalyptus grandis* grown in Kerala. Wood Fiber Sci, v.22, n 1, p. 54-61.

Brasil, M. A. M. & Ferreira, M. (1979). Características das fibras da madeira de *Eucalyptus grandis* Hill (ex-Maiden), aos 3 anos de idade. IPEF, v.19, p. 80-97.

Carpim, M. A.; Souza, V. R. & Barrichello, L. E. G. (1985). Comparação das características da madeira de *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus saligna* de diferentes procedências. *In*: Congresso Anual da ABCP, 18th, São Paulo, Vol. I., p. 57-68.

Carrillo-Varela, I.; Aguayo, M.G.G.; Valenzuela, S. & Elissetche, J. (2015) Variations in wood anatomy and fiber biometry of Eucalyptus globulus genotypes with different wood density. Wood Research, 60(1):1-10.

Chalk, L. Fibres. (1983). In: METCALFE, C. R. & CHALK, L.(eds.), Anatomy of dicotyledons, Vol. II. Wood structure and conclusion of the general introduction: 2nd ed. Clarendon Press, Oxford., p. 28-38.

Demuner, B. J. & Bertolucci, F. L. G. (1983). Seleção florestal: uma nova abordagem a partir de estimativas de parâmetros genéticos e fenotípicos para características da madeira e polpa de eucalipto. In: Anais 26th Congresso Anual de Celulose e Papel da ABTCP. ABTCP, São Paulo, Brasil. p. 22-26.

Hudson, I.; Wilson, L. & Van Beveren, K. (1998). Vessel and fibre property variation in *Eucalyptus globulus* and *Eucalyptus nitens*: some preliminary results. IAWA J. v.19, n.2, p. 111-130. https://doi.org/10.1163/22941932-90001514

Malan, F. S. (1991). Variation, association and inheritance of juvenile wood properties of *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden with special reference to the effect of rate of growth. South. Afr. For. J., v.157, p. 16-23. https://doi.org/10.1080/00382167.1991.9629094

Malan, F. S. & Gerischer, G. F. R. (1987). Wood property differences in South African grown *Eucalyptus grandis* trees of different growth stress intensity. Holzforschung, v.41, n.6, p. 333-335. https://doi.org/10.1515/hfsg.1987.41.6.331

Malan, F. S. & Verryn, S. D. (1996). Effect of genotype-by-environment interaction on the wood properties and qualities of four-year-old *Eucalyptus grandis* and *E. grandis* Hybrids. South. Afr. For. J. v.176, p. 47-53. https://doi.org/10.1080/00382167.1996.9629709

Mauri, R; Alves, J. A.; Oliveira, J. T. S.; **Lima, J. T.;** Tomazello Filho, M. & Calegario, N. (2017). Morfologia das fibras do lenho de clones de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis* em diferentes topografias e altitudes. Scientia Forestalis, v. 45, p. 1-10, 2017. https://doi.org/10.1515/dx.doi.org/10.18671/scifor.v45n113.07.

Panshin, A. J. & De Zeeuw, C. (1980). Textbook of wood Technology. 4th Ed. New York, McGraw-Hill. 574 p.

Ramos, L.M.A.; Latorraca, J.V.F.; Pastro, M.S.; Souza, M.T.; Garcia, A.R. & Carvalho, A.M. (2011). Variação radial dos caracteres anatômicos da madeira de *Eucalyptus grandis* W. Hill Ex Maiden e idade de transição entre lenho juvenil e adulto. Sci. For., v. 39, n. 92, p. 411-418.

Shimoyama, V. R. S. (1991). Variações da densidade básica da madeira e características anatômicas e químicas da madeira em *Eucalyptus* spp. Piracicaba: ESALQ/USP, 93 p. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) ESALQ-USP.

Tomazello Filho, M. (1987). Variação radial da densidade básica e da estrutura anatômica da madeira do *Eucalyptus globulus*, *E. pellita* e *E. acmenioides*. IPEF, v.36, p. 35-42.

Wardrop, A.B. (1964). The structure and formation of the cell wall in xylem. *In*: M.H.

Wilkes, J. (1988). Variations in wood anatomy within species of *Eucalyptus*. IAWA Bulletin, v.9, n.1, p. 13-23. 1988.


UFV


SOCIEDADE BRASILEIRA
DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA
DA MADEIRA


Pós-graduação em
Ciência Florestal – UFV


Engenharia Florestal
DEF-UFV