Universidade do Estado do Pará
Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação
Centro de Ciências Naturais e Tecnologia
Pós-Graduação em Tecnologia, Recursos Naturais e Sustentabilidade na Amazônia
PPGTEC – Mestrado

Lohana Vieira Souza

Caracterização da casca de espécies arbóreas da Amazônia como matéria-prima para aplicações em biorrefinaria

Belém
2026

Lohana Vieira Souza

Caracterização da casca de espécies arbóreas da Amazônia como matéria-prima para aplicações em biorrefinaria

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de mestre em Tecnologia, Recursos Naturais e Sustentabilidade na Amazônia no Programa de Pós-Graduação em Tecnologia, Recursos Naturais e Sustentabilidade na Amazônia do Centro de Ciências Naturais e Tecnologia da Universidade do Estado do Pará, na linha de pesquisa em Gestão de Recursos Agroflorestais.
Orientador(a): Prof. Dr. Luiz Eduardo de Lima Melo
Coorientador(a): Profa Dra. Graciene da Silva Mota

Belém
2026

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP),
Biblioteca do Centro de Ciências Naturais e Tecnologia, UEPA, Belém - PA.

S729c Souza, Lohana Vieira

Caracterização da casca de espécies arbóreas da Amazônia como matéria-prima para aplicações em biorrefinaria. / Lohana Vieira Souza; Orientador Luiz Eduardo de Lima Melo; Coorientador Graciene da Silva Mota. -- Belém, 2026.
140 f. : il. ; 30 cm

Dissertação (Mestrado em Tecnologia, Recursos Naturais e Sustentabilidade na Amazônia) - Universidade do Estado do Pará, Centro de Ciências Naturais e Tecnologia, Belém, 2026.

1. Árvores - Matéria-prima - Amazônia. 2. Industria madeireira - Desenvolvimento sustentável - Amazônia. 3. Ecologia florestal - Amazônia. I. Melo, Luiz Eduardo de Lima. II. Mota, Graciene da Silva. III. Título.

CDD 582.1609811

Lohana Vieira Souza

Caracterização da casca de espécies arbóreas da Amazônia como matéria-prima para aplicações em biorrefinaria

Defesa de Dissertaçã apresentado como requisito parcial para obtenção do título de mestre em Tecnologia, Recursos Naturais e Sustentabilidade na Amazônia no Programa de Pós-Graduação em Tecnologia, Recursos Naturais e Sustentabilidade na Amazônia do Centro de Ciências Naturais e Tecnologia da Universidade do Estado do Pará.

Data da aprovação: 14/01/2026
Banca Examinadora

Documento assinado digitalmente
gov.br LUIZ EDUARDO DE LIMA MELO
Data: 29/01/2026 11:31:21-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

_____ – Orientador
Prof. Dr. Luiz Eduardo de Lima Melo
Doutor em Ciência e Tecnologia da Madeira
Universidade do Estado do Pará

Documento assinado digitalmente
gov.br GRACIENE DA SILVA MOTA
Data: 29/01/2026 09:30:00-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

_____ – Coorientadora
Profa. Dra. Graciene da Silva Mota
Doutora em Botânica Aplicada
Universidade Federal de Lavras

Documento assinado digitalmente
gov.br ELIAS COSTA DE SOUZA
Data: 29/01/2026 11:07:16-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

_____ – 1º Examinador
Prof. Dr. Elias Costa de Souza
Doutor em Recursos Florestais
Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará

Documento assinado digitalmente
gov.br THAIS BRITO SOUSA
Data: 28/01/2026 19:36:35-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

_____ – 2º Examinadora
Profa. Dra. Thais Brito Sousa
Doutora em Engenharia de Biomateriais
Universidade do Estado de Minas Gerais

_____ – 3º Examinador
Prof. Dr. Marcelo Rodrigo Pace
Doutor em Ciências Biológicas (Botânica)
Universidade Nacional do México

Documento assinado digitalmente
gov.br
LOHANA VIEIRA SOUZA
Data: 29/01/2026 11:41:16-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

_____ – Orientada

Lohana Vieira Souza
Mestranda em Tecnologia, Recursos Naturais e Sustentabilidade na Amazônia
Universidade do Estado do Pará

Dedico este trabalho à memória de minha avó, em reconhecimento à sua sabedoria sobre as práticas tradicionais associadas aos recursos da Amazônia, a qual foi fundamental para minha formação pessoal e acadêmica.

Agradecimentos

Agradeço primeiramente a Deus por me conceder força, sabedoria e perseverança ao longo de toda esta jornada.

Expresso minha profunda gratidão à minha falecida avó, Joana Elza Vieira, minha maior fonte de inspiração, exemplo de bondade, generosidade e amor. Agradeço por todo o cuidado, dedicação, ensinamentos e por ter contribuído de maneira decisiva para a formação do meu caráter, sempre me orientando pelos caminhos corretos. Estendo meus agradecimentos ao meu avô, Raimundo Vieira, pelas valiosas conversas, pelas histórias compartilhadas e, sobretudo, por todo o afeto, apoio e carinho ao longo dos anos.

Agradeço à minha mãe, Joana Vieira, por todas as mensagens diárias, pelo suporte incondicional e pelo amor e carinho dedicados a mim ao longo de toda essa trajetória. Agradeço à minha família pelo apoio e incentivo constantes, pela confiança depositada em mim e por sempre acreditarem no meu potencial, acompanhando e torcendo por cada etapa que escolho seguir. Agradeço ainda aos meus primos, Gabriela, Diogo e Kauê, por serem fonte de leveza e acolhimento em todos os momentos, vocês são verdadeiro refúgio e presença constante na minha vida.

Agradeço quem compartilha a vida comigo, Higor, por cada palavra de apoio, pela presença constante e pelo cuidado nos momentos de maior fragilidade, especialmente quando as adversidades pareciam insuportáveis. Agradeço às minhas amigas de longa data, aos colegas do mestrado e do laboratório pelos momentos de descontração, alegria e companheirismo, que tornaram esta trajetória mais leve e significativa.

Agradeço ao meu orientador, Luiz Eduardo, pelo suporte, orientação e direcionamento ao longo de toda a minha trajetória, bem como por sempre acreditar em mim e no meu potencial. A sua orientação foi fundamental para a minha formação acadêmica e profissional. Agradeço à minha coorientadora, Graciene, pela orientação dedicada e pela presença constante em todos os momentos em que precisei.

Agradeço também à CAPES pela concessão da bolsa, oque possibilitou a realização deste trabalho.

Agradeço ao Grupo Arboris, em nome do Sr. Marco Siviero e Sabrina Benmuyal, por terem fornecido a matéria prima e suporte para o desenvolvimento dessa pesquisa.

Agradeço o Laboratório de Anatomia da Madeira da Universidade Federal de Lavras (UFLA), o Núcleo de Estudos em Anatomia e Produtos Químicos da Madeira e à Laise pela receptividade e por cederem o espaço necessário para a realização da parte química deste estudo.

Agradeço ao Laboratório de Ciência e Tecnologia da Madeira da Universidade do Estado do Pará (UEPA), Campus VIII, Marabá, e à Liga de Ciência e Tecnologia da Madeira, por terem sido minha casa durante anos e por todos os ensinamentos compartilhados.

Por fim, agradeço a todos que, de alguma forma, contribuíram para a realização deste trabalho e manifesto minha sincera gratidão pelo apoio e incentivo recebidos ao longo desta trajetória.

Consagre ao Senhor tudo o que você faz,
e os seus planos serão bem-sucedidos.
Proverbios 16:3

Escopo da dissertação

O Capítulo 1 é composto pela introdução geral do estudo e pela revisão de literatura. A introdução apresenta a contextualização do tema, a justificativa da pesquisa, bem como a relevância científica e tecnológica do trabalho. A revisão de literatura reúne e discute os principais conceitos, fundamentos teóricos e estudos recentes relacionados.....8

O Capítulo 2 é composto pelo primeiro artigo da dissertação, o qual já se encontra publicado. O artigo aborda o potencial da *Bagassa guianensis* como matéria-prima para aplicação em processos de biorrefinaria, destacando suas características, propriedades e viabilidade de aproveitamento no contexto do desenvolvimento sustentável.....21

O Capítulo 3 é composto pelo segundo artigo da dissertação, ainda não publicado, o qual foi desenvolvido a partir dos principais insights obtidos no Artigo I. Este estudo aprofunda e aprimora a investigação sobre o uso de matérias-primas lignocelulósicas, avaliando de forma mais detalhada as propriedades tecnológicas da casca de *Manilkara elata* e *Dipteryx odorata*. O objetivo é ampliar a compreensão sobre o potencial dessas espécies como matérias-primas sustentáveis e contribuir para uma avaliação mais consistente de suas possíveis aplicações industriais.....49

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO GERAL E REVISÃO DA LITERATURA

1. INTRODUÇÃO

O uso intensivo de matérias-primas não renováveis e poluentes são amplamente reconhecido como uma das principais causas do aquecimento global e da degradação ambiental (BUTNARU et al., 2022; CLAUSER et al., 2021). Esse cenário tem impulsionado a busca por alternativas que integrem o desenvolvimento econômico e sustentável (ROTONDO et al., 2025). O aproveitamento de resíduos florestais, como a casca, é uma estratégia promissora para alinhar o uso dos recursos naturais aos conceitos recentes de bioeconomia e economia circular, para a reduzir a dependência de insumos fósseis e para o uso mais racional da biodiversidade (GIURCA; BEFORT, 2023).

A casca é um recurso florestal renovável e disponível, mas ainda pouco utilizada, especialmente em atividades ligadas ao manejo florestal sustentável no Brasil (AMORIM et al., 2021). Apesar de frequentemente descartada, trata-se de uma biomassa não madeireira com elevado potencial de aproveitamento em processos industriais e tecnológicos (KWAN et al., 2022). Entre esses processos, destaca-se o modelo de biorrefinaria, que propõe o uso integrado da biomassa vegetal para gerar energia, materiais e compostos químicos em substituição aos derivados fósseis, e isso contribui para sistemas produtivos mais sustentáveis (CHERUBINI, 2010).

Em escala global, diversos estudos têm destacado o potencial de uso das cascas de espécies dos gêneros *Pinus* e *Quercus*. Embora tradicionalmente utilizadas na indústria madeireira, essas espécies têm despertado crescente interesse quanto ao desenvolvimento de tecnologias voltadas ao aproveitamento sustentável de suas cascas (BAYER; ROGGER, 2024; SHAIKHIEV et al., 2024; SEN et al., 2024A; REGO et al., 2023; ALONSO-ESTEBAN et al., 2022). Um exemplo notável é o extrato Picnogenol, derivado da casca de *Pinus pinaster* ssp. *Atlantica*, que possui propriedades farmacêuticas e já foi patenteado (WEICHMANN; ROHDEWALD, 2024). De forma semelhante, a cortiça extraída da casca de *Quercus suber* é um importante biorrecurso para a bioeconomia portuguesa, sendo amplamente utilizada na fabricação de rolhas, isolantes e painéis (SILVA et al., 2023).

A atenção voltada para novas espécies florestais tem impulsionado estudos sobre o aproveitamento de cascas de outros gêneros tropicais. Os recursos florestais de diversas espécies da Amazônia, como exemplo a *Manilkara*, tem demonstrado potencial para aplicações nutricionais e

farmacológicas (HEGDE; LAKSHMAN, 2023), na produção de biocombustíveis e produtos químicos (MISHRA; MOHANTY, 2020), além de sua utilização na indústria alimentícia (AKOSUNG et al., 2023). De maneira similar, o gênero *Dipteryx* tem se destacado nas indústrias de cosméticos e perfumaria (SOUSA et al., 2022), sendo também valorizado por suas propriedades nutracêuticas (VIANA et al., 2023). Já o gênero *Bagassa* tem se evidenciado por conter compostos bioativos com potencial aplicação na indústria farmacêutica (PINHEIRO et al., 2022). Esses gêneros compartilham uma característica importante, a elevada concentração de compostos fenólicos com potencial antioxidante, o que os torna particularmente atrativos para o desenvolvimento de bioprodutos com alto valor agregado (MIRANDA et al., 2024; KARLE et al., 2021).

A inclusão de espécies amazônicas como biomassa para biorrefinaria ainda é um gargalo, e conhecer as características desse material é uma importante iniciativa para o aproveitamento completo da biodiversidade e para o estabelecimento de uma bioeconomia de base territorial com inclusão social e a geração de valor local (LESENFANTS et al., 2024). As perspectivas futuras são promissoras, estima-se que apenas no estado do Pará, a bioeconomia pode gerar até 35 bilhões de dólares em receitas até 2040, desde que fundamentada em cadeias sustentáveis e inclusivas (COSTA et al., 2021).

Pelo exposto fica clara a necessidade de estudos sobre a composição anatômica e química da casca para promover o aproveitamento integral dos resíduos gerados pela indústria florestal. Este estudo tem como objetivo avaliar se as cascas do caule de *Bagassa guianensis*, *Dipteryx odorata* e *Manilkara elata*. apresentam compostos com potencial para aplicação em processos de biorrefinaria.

A pergunta que orienta esta pesquisa é: essas cascas contêm características estruturais e químicas que as tornam viáveis como matéria-prima para rotas industriais sustentáveis?

A hipótese é que seus perfis anatômicos, físicos e químicos forneçam indicadores relevantes para esse fim, contribuindo para o uso eficiente da biodiversidade amazônica e para o fortalecimento da bioeconomia circular.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Resíduos florestais

A madeira destaca-se como a principal matéria-prima extraída e comercializada das florestas, sendo amplamente utilizada em diversas aplicações, como na construção civil, na fabricação de móveis, na produção de papel e celulose, e também na geração de energia (SILVA et al., 2018). Entretanto, o processo de extração e beneficiamento da madeira resulta na geração de resíduos florestais, compostos por materiais que não são aproveitados durante a colheita e o processamento mecânico, muitas vezes sem destinação final adequada (ZYRYANOV et al., 2023). Entre os principais resíduos florestais descartados ao longo desse processo estão as folhas, os galhos e as cascas (GUO et al., 2024).

A literatura relata que esses resíduos têm potencial para se tornarem uma fonte secundária de matéria-prima, não apenas para a geração de energia, mas também para a fabricação de novos produtos (PANDEY, 2022). Como exemplo, produtos químicos, biomateriais, biocombustíveis e outros materiais lignocelulósicos (MIASSI; DOSSA, 2024, MUJTABA et al., 2023, CHEN et al., 2023). O potencial dos residuos florestais ganha ainda mais relevância diante das crescentes preocupações com as mudanças climáticas e o esgotamento dos recursos fósseis, que têm incentivado a transição global de produtos baseados em fontes fósseis para alternativas sustentáveis de base biológica (MOUSAVI-AVVA et al., 2023)

Dessa forma, é importante destacar que a casca de árvores é considerado um dos subprodutos florestais mais importante disponíveis no campo ou nas indústrias de processamento de madeira, sua produção anual pode alcançar até 400 milhões de metros cúbicos em todo o mundo (SEN et al. 2023). No Brasil estima-se que são produzidos 2,3 toneladas de resíduos florestais para cada tonelada de madeira colhida de forma sustentável (LIMA et al, 2023). Nesse total, está incluída a quantidade correspondente à casca do tronco.

Nesse contexto, destacam-se as três espécies madeireiras comerciais da Amazônia, *Bagassa guianensis*, *Dipteryx odorata* e *Manilkara elata*, que são representativas de acordo com os levantamentos florísticos realizados nos Planos de Manejo Florestal Sustentável da região amazônica (CYSNEIROS et

al., 2018). A comercialização da madeira dessas espécies resulta na geração de um considerável volume de resíduos florestais, como a casca do caule, que podem ser aproveitados de diversas formas.

Dessa forma, o desenvolvimento de tecnologias mais sustentáveis para o reaproveitamento desses resíduos torna-se indispensável, contribuindo para a redução do impacto ambiental e para o uso mais eficiente dos recursos naturais (HAIHAN et al., 2023). Nesse cenário, a biorrefinaria destaca-se como uma solução promissora, capaz de transformar resíduos florestais em produtos de alto valor agregado, fortalecendo práticas da economia circular (CHOJNACKA, 2023)

2.2 Anatomia da casca

A casca do caule é um importante tecido protetor da planta, que pode participar da fotossistese, gerenciar perda de água e transportar assimilados (NIE et al., 2023). A casca é composta pelo córtex e epiderme no crescimento primário e por todos os tecidos fora do cambio vascular no crescimento secundário, este pode ser dividido em casca interna e externa de acordo com sua origem e status de desenvolvimento (SHTEIN et al., 2023).

O crescimento secundário da casca é constituida por tecidos meristemáticos, câmbio e felogênio, o primeiro origina o floema secundário condutor e não condutor (casca interna), e o segundo origina a periderme, que é formado por feloderme e felema (casca externa) (CACCIANIGA et al., 2021). Está quando é formada por peridermes sequenciais é denominada de ritidoma (OHSE et al., 2022). O floema secundário é composto principalmente por células condutoras, esclerenquimáticas e parenquimáticas e a periderme ou ritidoma é constituída majoritariamente por tecido morto com diversas deposições celulares (SAKAI, 2000).

É importante destacar que as diferenças estruturais entre a casca interna e externa do caule podem refletir diretamente em suas composições químicas. Pesquisas relatam que casca interna é rica em carboidratos e extrativos, substâncias que desempenham papel importante no armazenamento e transporte de nutrientes (ROSELL et al., 2021; OZGENC et al., 2017). Enquanto que, a casca externa é caracterizada por possuir maior concentração de lignina, compostos fenólicos e suberina a qual tem a função de proteger a planta contra fatores ambientais adversos e ataques de patógenos (GIANNOTAS et al., 2021)

Com base na diversidade da casca, o passo inicial para o desenvolvimento de métodos eficazes para a utilização e processamento dessa biomassa é realizar uma analise estrutural detalhada (LI et al., 2024). Dessa forma, a caracterização anatômica da casca é de extrema importância para obter insights sobre sua estrutura e características celulares e assim investir em pesquisas aprofundadas sobre determinada característica e tornar mais eficiente o processo de conversão de biomassa em produtos de alto valor agregado (VANGEEL et al., 2021).

2.3 Química da casca

A constituição química da casca apresenta cinco grupos: formado por polissacarídeos (celulose e hemiceluloses), lignina e polifenóis, complexos de hidroxiácidos (suberina), extrativos (gorduras, óleos, fitoesteróis, ácidos resínicos, ceras, taninos, terpenos, flobafenos e flavonoides) e inorgânicos (minerais) (VANGEEL et al., 2021; ROWEL; PETTERSEN, 2012). A composição química da casca varia entre a parte interna e externa: a casca interna normalmente possui maior teor de celulose, cinzas e extrativos solúveis em água e álcool, enquanto a parte externa é rica em polifenóis, ácidos fenólicos, lignina e suberina (KAIN, 2016).

Conhecer a composição química da casca é fundamental para compreender melhor suas diversas aplicações. A análise dos componentes estruturais (como celulose, hemicelulose, lignina e suberina) e não estruturais (como compostos extrativos, químicos orgânicos e inorgânicos) permite otimizar o uso desse material no desenvolvimento de novos produtos e materiais (SCHUCHARTI et al., 2021; MOTA et al., 2016). Dessa forma, a química dos componentes da biomassa lignocelulósica desempenha um papel fundamental na biorrefinação, pois o conhecimento do mesmo, facilita o processo de conversão da biomassa em produtos, como biocombustíveis, bioplásticos, bioquímicos e outros produtos (OKOLIE et al., 2021).

Estudos recentes no Brasil têm avançado na identificação de compostos bioativos presentes em cascas. No caso da casca de *Myrcia eximia*, uma espécie da Amazônia, os resultados indicaram seu potencial como antioxidante natural, podendo substituir antioxidantes sintéticos, como o Butilhidroxitolueno - BHT, amplamente utilizado em produtos alimentícios (ARAÚJO et al., 2020). Outro exemplo é a casca de *Astronium lecointei*, também da Amazônia, que

apresentou resultados promissores devido a presença significativa de extrativos, polissacarídeos e lignina, destacando seu potencial para aplicações industriais em biorrefinarias (MOTA et al., 2021)

Embora o conhecimento sobre a composição química das cascas tenha avançado significativamente, a diversidade e a variação entre as diferentes espécies e regiões ainda demandam mais estudos (GUNNARSDOTTIR et al. 2023; FERREIRA et al., 2018). Acredita-se que, com o avanço das pesquisas, é possível que novas espécies e métodos de aproveitamento das cascas proporcionem soluções inovadoras, tornando esse recurso cada vez mais relevante no cenário de indústrias verdes e na busca por alternativas mais eficiente e sustentável (RIETZLER et al., 2022).

2.4 Biorrefinaria

O consumo excessivo e a geração descontrolada de resíduos são grandes desafios para a gestão ambiental, exigindo a adoção de novos modelos de produção que transformem esses resíduos em matérias-primas para a fabricação de novos produtos (ARIAS et al. 2023). Na busca por um futuro com desenvolvimento sustentável, as biorrefinarias e a bioeconomia surgem como alternativas fundamentais de transformação (WAGH et al., 2023). Esse cenário é impulsionado por pesquisas recentes, tendências tecnológicas e o desenvolvimento de práticas que integram eficiência econômica e responsabilidade ambiental (SOLARTE-TORO et al., 2023)

Nesse contexto, as biorrefinarias são definidas como um processo físico, químico ou biológico que purifica, separa, refina ou transforma os elementos que constituem ativos biológicos dos reinos Monera, Protista, Plantae, Animalia ou Fungi, originários do ambiente terrestre ou oceânico em bioprodutos para uso final ou como matéria-prima para outros bioprodutos (CONTERATTO et al., 2021).

As indústrias que integram a biorrefinaria incluem: biocombustíveis, química, papel e celulose, alimentos e rações, plásticos e materiais, energia, farmacêutica e cosméticos (ALI et al., 2024; LEE et al. 2023, LIU et al. 2024, RAVINDRAN et al., 2021; BHATIA et al., 2022; RAJ et al., 2022; MEIRELLES et al., 2023; CORREIA et al., 2020). Essas indústrias utilizam matérias-primas renováveis à base de carbono, que provêm de quatro setores distintos: agricultura, silvicultura, indústrias e domicílios (resíduos de processos e sobras

e águas residuais), e aquicultura (algas e algas marinhas) (CHATURVEDI et al. 2020).

Embora as biorrefinarias envolva uma variedade de setores, é fundamental destacar a importância e a disponibilidade dos resíduos florestais, especialmente na Amazônia. A região se distingue pela abundância de biomassa lignocelulósica, que, apesar de suas variadas potencialidades, ainda possui propriedades tecnológicas pouco exploradas (BORGES et al., 2024). As tecnologias verdes associadas às biorrefinarias têm o poder de impulsionar o desenvolvimento sustentável na região, promovendo a conservação das florestas, agregando valor aos recursos naturais locais e fomentando a sociobiodiversidade (FREITAS et al., 2024).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AKOSUNG, E. et al. Bioactive constituents from Manilkara obovata (Sabine & G. Don) JH Hemsl. **Natural product research**, v. 35, n. 22, p. 4347-4356, 2021.

ALI, H. E. A. et al. Nanoparticle applications in Algal-biorefinery for biofuel production. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 192, p. 114267, 2024.

ALONSO-ESTEBAN, J. I. et al. Chemical composition and industrial applications of Maritime pine (Pinus pinaster Ait.) bark and other non-wood parts. **Reviews in Environmental Science and Bio/Technology**, v. 21, n. 3, p. 583-633, 2022.

AMORIM, E. P. et al. Aproveitamento dos resíduos da colheita florestal: estado da arte e oportunidades. Research, Society and Development, v. 10, n. 2, p. e4410212175-e4410212175, 2021.

ARAUJO, E. S. et al. Characterisation and valorisation of the bark of Myrcia eximia DC. trees from the Amazon rainforest as a source of phenolic compounds. **Holzforschung**, v. 74, n. 10, p. 989-998, 2020.

ARIAS, A. et al. Biorefineries as a driver for sustainability: Key aspects, actual development and future prospects. **Journal of Cleaner Production**, v. 418, p. 137925, 2023.

BAYER, J.; HÖGGER, P. Review of the pharmacokinetics of French maritime pine bark extract (Pycnogenol®) in humans. **Frontiers in Nutrition**, v. 11, p. 1389422, 2024.

BHATIA, L. et al. Third-generation biorefineries: a sustainable platform for food, clean energy, and nutraceuticals production. **Biomass Conversion and Biorefinery**, v. 12, n. 9, p. 4215-4230, 2022.

BUTNARU, Elena et al. Characterization of bark, needles and cones from silver fir (Abies alba Mill.) towards valorization of biomass forestry residues. **Biomass and Bioenergy**, v. 159, p. 106413, 2022.

CACCIANIGA, M. et al. Contribution of plant anatomy to forensic investigation: Tree bark morphology. **Forensic Science International**, v. 318, p. 110598, 2021.

CHATURVEDI, T. et al. Developing process designs for biorefineries—Definitions, categories, and unit operations. **Energies**, v. 13, n. 6, p. 1493, 2020.

CHEN, Z. et al. Exploitation of lignocellulosic-based biomass biorefinery: a critical review of renewable bioresource, sustainability and economic views. **Biotechnology Advances**, p. 108265, 2023.

CHERUBINI, Francesco. The biorefinery concept: Using biomass instead of oil for producing energy and chemicals. **Energy conversion and management**, v. 51, n. 7, p. 1412-1421, 2010.

CHOJNACKA, K. Valorization of biorefinery residues for sustainable fertilizer production: a comprehensive review. **Biomass Conversion and Biorefinery**, v. 13, n. 16, p. 14359-14388, 2023.

CLAUSER, Nicolás M. et al. Biomass waste as sustainable raw material for energy and fuels. **Sustainability**, v. 13, n. 2, p. 794, 2021.

CONTERATTO, C. et al. Biorefinery: A comprehensive concept for the sociotechnical transition toward bioeconomy. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 151, p. 111527, 2021.

CORREIA, R. et al. Insights for the valorization of biomass from portuguese invasive Acacia spp. in a biorefinery perspective. **Forests**, v. 11, n. 12, p. 1342, 2020.

COSTA, B. P. D. et al. Anxiolytic-Like Effect of Chrysin on Female Zebrafish is Likely Mediated by α5 Subunits of γ-Aminobutyric Acid A Receptors. Chemistry & Biodiversity, v. 22, n. 6, p. e202403140, 2025.

CYSNEIROS, V. C. et al. Espécies madeireiras da Amazônia: riqueza, nomes populares e suas peculiaridades. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 38, 2018.

FREITAS, L. C. et al. Green extraction technologies: A path to the Amazon bioeconomy development. **Trends in Food Science & Technology**, p. 104462, 2024.

GIANNOTAS, G. et al.Tree bark utilization in insulating bio-aggregates: a review. **Biofuels, Bioproducts and Biorefining**, v. 15, n. 6, p. 1989-1999, 2021.

GIURCA, Alexandru; BEFORT, Nicolas. Deconstructing substitution narratives: The case of bioeconomy innovations from the forest-based sector. **Ecological Economics**, v. 207, p. 107753, 2023.

GUNNARSDOTTIR, S. H. et al. Antioxidative and Antimicrobial Evaluation of Bark Extracts from Common European Trees in Light of Dermal Applications. **Antibiotics**, v. 12, n. 1, p. 130, 2023.

GUO, J. et al. Reduction and reuse of forestry and agricultural bio-waste through innovative green utilization approaches: A review. **Forests**, v. 15, n. 8, p. 1372, 2024.

HEGDE, M; M.; LAKSHMAN, K. Phyto-pharmacological review of genus manilkara. **Int J Herb Med**, v. 11, p. 1-13, 2023.

Kain, G. **Design of Tree Bark Insulation Boards: Analysis of Material, Structure and Property Relationships**. Dissertação de doutorado, 2016. Holzforschung München (Pesquisa de Madeira de Munique), Universidade Técnica de Munique.

KARLE, P. P. et al. Optimization of extraction conditions and evaluation of Manilkara zapota (L.) P. Royen fruit peel extract for in vitro α-glucosidase enzyme inhibition and free radical scavenging potential. **Future Journal of**

Pharmaceutical Sciences, v. 7, p. 1-10, 2021.

KWAN, Isabella et al. Bark from Nordic tree species–a sustainable source for amphiphilic polymers and surfactants. **Nordic Pulp & Paper Research Journal**, v. 37, n. 4, p. 566-575, 2022.

LEE, H. et al. Sugarcane wastes as microbial feedstocks: A review of the biorefinery framework from resource recovery to production of value-added products. **Bioresource Technology**, v. 376, p. 128879, 2023.

LESENFANTS, Yves et al. Re-imagining bioeconomy for Amazonia. 2024.

LI, C. et al. Comparative Anatomical Analysis of Bark Structure in 10 Quercus Species. **Plants**, v. 13, n. 13, p. 1871, 2024.

LIMA, M. D. R. et al. Segregating Amazonia logging wastes from sustainable forest management improves carbonization in brick kilns. **Renewable Energy**, v. 211, p. 772-788, 2023.

LIU, B. et al. Preparation of multi-barrier and multi-functional paper-based materials by chitosan, ethyl cellulose and green walnut husk biorefinery products for sustainable food packaging. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 278, p. 134557, 2024.

MEIRELLES, B. et al. Biorefinery as a tool to obtain multiple seaweed extracts for cosmetic applications. **Journal of Applied Phycology**, v. 35, n. 6, p. 3041-3055, 2023.

MIASSI, Y. E.; DOSSA, K. F.. Circular economy initiatives for forest-based bioeconomy: Harnessing the potential of non-wood biomaterials. **Waste Management Bulletin**, v. 2, p. 270-278, 2024.

MIRANDA, B. M. et al. By-products of Baru and Monguba: A Review of their potential. **Food and Humanity**, p. 100477, 2024.

MISHRA, R. K.; MOHANTY, K. Pyrolysis of Manilkara zapota seeds over ZSM-5 to produce high-quality bio-oil and chemicals. **Fuel**, v. 280, p. 118594, 2020.

MOTA, G. S. **Características anatômicas e ecológicas de casca e madeira de Anadenanthera**. 2016. 113 f. Tese (Doutorado em Botânica Aplicada) - Universidade Federal de Lavras, Minas Gerais, 2016.

MOTA, Graciene S. et al. Bark of Astronium lecointei Ducke trees from the Amazon: chemical and structural characterization. **European Journal of Wood and Wood Products**, v. 79, n. 5, p. 1087-1096, 2021.

MOUSAVI-AVVAL, S. H. et al. Environmental impacts and techno-economic assessments of biobased products: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 180, p. 113302, 2023.

MUJTABA, M. et al. Lignocellulosic biomass from agricultural waste to the circular economy: a review with focus on biofuels, biocomposites and

bioplastics. **Journal of Cleaner Production**, v. 402, p. 136815, 2023.

NIE, W. et al. Climatic responses and variability in bark anatomical traits of 23 Picea species. **Frontiers in Plant Science**, v. 14, p. 1201553, 2023.

OHSE, M. et al. Sequent periderm formation and changes in the cellular contents of phloem parenchyma during rhytidome development in Cryptomeria japonica. **Journal of Wood Science**, v. 68, n. 1, p. 19, 2022.

OKOLIE, J. A. et al. Chemistry and specialty industrial applications of lignocellulosic biomass. **Waste and Biomass Valorization**, v. 12, p. 2145-2169, 2021.

ÖZGENÇ, Ö. et al. Chemical analysis of tree barks using ATR-FTIR spectroscopy and conventional techniques. **Bioresources**, v. 12, n. 4, p. 9143-9151, 2017.

PANDEY, S. Wood waste utilization and associated product development from under-utilized low-quality wood and its prospects in Nepal. **SN Applied Sciences**, v. 4, n. 6, p. 168, 2022.

PINHEIRO, W. B. S. et al. The use of Bagassa guianensis aubl. forestry waste as an alternative for obtaining bioproducts and bioactive compounds. **Arabian Journal of Chemistry**, v. 15, n. 6, p. 103813, 2022.

RAJ, T. et al. Lignocellulosic biomass as renewable feedstock for biodegradable and recyclable plastics production: A sustainable approach. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 158, p. 112130, 2022.

RAVINDRAN, R. et al. Production of green biorefinery protein concentrate derived from perennial ryegrass as an alternative feed for pigs. **Clean Technologies**, v. 3, n. 3, p. 656-669, 2021.

REGO, L. et al. Quercus suber Bark as a Sustainable Source of Value-Added Compounds: Experimental Studies with Cork By-Products. **Forests**, v. 14, n. 3, p. 543, 2023.

RIETZLER, B. et al. Fundamental insights on the physical and chemical properties of organosolv lignin from Norway spruce bark. **Biomacromolecules**, v. 23, n. 8, p. 3349-3358, 2022.

ROSELL, J. A. et al. Inner bark as a crucial tissue for non-structural carbohydrate storage across three tropical woody plant communities. **Plant, Cell & Environment**, v. 44, n. 1, p. 156-170, 2021.

ROWELL, R. M. **Handbook of wood chemistry and wood composites**. CRC press, 2005.

SAKAI, K.i. Chemistry of bark. **Wood and Cellulosic Chemistry, 2nd ed.; Hon, DN, Shiraishi, N., Eds**, p. 243-273, 2000.

SCHUCHARDT, U. Et al. A indústria petroquímica no próximo século: como substituir o petróleo como matéria-prima?. **Química Nova**, v. 24, p. 247-251,

2001.

ŞEN, A. U.et al. Bioactivities of Waste Cork and Phloem Fractions of *Quercus cerris* Bark. **Processes**, v. 12, n. 10, p. 2081, 2024. (a)

ŞEN, U. et al. Pyrolysis and extraction of bark in a biorefineries context: A critical review. **Energies**, v. 16, n. 13, p. 4848, 2023.

SHAIKHIEV, I. G. et al. Tree Bark as a Promising Sorption Material to Extract Hydrocarbons from Aquatic Environments: A Review. **Polymer Science, Series D**, v. 17, n. 3, p. 691-697, 2024.

SHTEIN, I. et al. Priorities for bark anatomical research: study venues and open questions. **Plants**, v. 12, n. 10, p. 1985, 2023.

SILVA, J. et al. Quercus suber L. Genetic Resources: Variability and Strategies for Its Conservation. **Forests**, v. 14, n. 9, p. 1925, 2023.

SILVA, L. et al. Aproveitamento energético de resíduos da indústria moveleira. **Revista Brasileira de Engenharia e Sustentabilidade**, v. 5, n. 2, p. 36-42, 2018.

SOLARTE-TORO, J. C.; CARDONA ALZATE, C. A. Sustainability of biorefineries: Challenges and perspectives. **Energies**, v. 16, n. 9, p. 3786, 2023.

SOUSA, T. B. et al. Chemical and structural characterization of *Myracrodruon urundeuva* barks aiming at their potential use and elaboration of a sustainable management plan. **Biomass Conversion and Biorefinery**, p. 1-11, 2022.

VANGEEL, T. et al. Tree bark characterization envisioning an integrated use in a biorefinery. **Biomass Conversion and Biorefinery**, p. 1-15, 2021.

VIANA, H. N. A. C. et al. Characterization of baru (Dipteryx alata Vog.) and application of its agro-industrial by-product in the formulation of cookies. **Journal of Agriculture and Food Research**, v. 12, p. 100577, 2023.

WAGH, M. S. et al. Valorisation of agro-industrial wastes: circular bioeconomy and biorefinery process–a sustainable symphony. **Process Safety and Environmental Protection**, 2024.

WEICHMANN, F.; ROHDEWALD, P. Pycnogenol® French maritime pine bark extract in randomized, double-blind, placebo-controlled human clinical studies. **Frontiers in Nutrition**, v. 11, p. 1389374, 2024.

ZYRYANOV, M. et al. Analysis of the rationality of using a natural resource in the form of wood biomass. In: **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**. IOP Publishing, 2023. p. 012071.

CAPÍTULO 2

(ARTIGO 1) - PUBLICADO

POTENCIAL DA CASCA DO CAULE DE *Bagassa guianensis* Aubl. PROVENIENTE DE MANEJO FLORESTAL SUSTENTÁVEL NA AMAZÔNIA BRASILEIRA COMO MATÉRIA-PRIMA PARA BIORREFINARIA

[1] Este artigo foi publicado no periódico **Industrial Crops and Products**, e seu acesso integral pode ser realizado por meio do DOI: https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2025.120754

Resumo

Os resíduos de casca possuem um fluxo altamente disponível na indústria florestal e tem sido um recurso potencialmente interessante para a biorrefinaria. A casca de árvores de *Bagassa guianensis* (Moraceae), importante espécie madeireira da Amazônia, foi estudada quanto à anatomia, densidade e composição química, tendo em vista seu aproveitamento industrial. Anatomicamente, a casca é caracterizada por ritidoma, floema condutor e não condutor, laticíferos, células secretoras, fibras gelatinosas e septadas, raios multisseriados, e presença de cristais de oxalato de cálcio em células de parênquima. A química somativa é representada por 24% de extrativos totais, 1.97% suberina, 6.6% cinza, 10.46% lignina e 56.97% polissacarídeos. A espécie apresentou valores baixos para conteúdo fenólico (fenóis totais 8.56 mg GAE g^{-1}, flavonoides 10.45 mg CE g^{-1} e taninos condensados 2.24 CE g^{-1}) e na análise da composição mineral o macronutriente que mais se destacou foi o Cálcio (25.42 g kg^{-1}) e o micronutriente foi o Ferro (498.62 mg kg^{-1}). A casca da *B. guianensis* apresentou resultados interessantes para quelação do metal pesado Zinco na concentração 1 mg/ml (72%) e na 0.10 mg/ml (51%), ambas se mostraram mais eficientes que o quelante comercial EDTA. Já o Cobre e Ferro tiveram resultados inferiores ao quelante comercial EDTA. As características químicas da casca de *B. guianensis* mostraram-se promissoras para a utilização do material na indústria de biorrefinaria.

Palavras-chave: Anatomia, densidade básica, produtos florestais, química, Tatajuba.

1. Introdução

A biorrefinaria é uma indústria que converte materiais biológicos em produtos de alto valor agregado. O biocombustível, bioenergia, bioquímicos e biomateriais são exemplos de produtos processados na biorrefinaria, que utilizam biomassa lignocelulósica como matéria prima (Velvizhi et al., 2022). A casca do caule é um recurso florestal abundante e renovável, utilizado principalmente para geração de energia, todavia subaproveitado pelo fato de apresentar grande excedente que poderia também ser utilizado como matéria prima para a produção de produtos químicos (Sartori et al., 2021). Nesse sentido, há uma crescente necessidade de beneficiar esses resíduos, tornando a biorrefinaria uma alternativa promissora, pois a partir do aproveitamento da biomassa podem ser gerados novos produtos com alto valor agregado (Andrew

et al., 2020).

Dentre os produtos que podem ser produzidos na indústria de biorrefinarias, destacam-se a produção de produtos farmacêuticos, fertilizantes, bioetanol, biogás, bioplásticos e biopolímeros (Sandberg et al., 2024; Şen et al., 2023; Banu et al., 2020; Ioannidou et al., 2020). O desenvolvimento de tecnologias sustentáveis é importante para melhorar a utilização dos recursos florestais em operações florestais ou no processamento da madeira (Braz et al., 2014). Na exploração florestal de impacto reduzido (EIR) na Amazônia, estima-se que para cada tonelada de madeira colhida, sejam produzidas aproximadamente 2,13 toneladas de resíduos florestais madeireiros (Numazawa et al., 2017). Nesse sentido, é evidente que a busca por alternativas adequadas para dar aplicabilidade aos resíduos florestais, especialmente à casca de espécies arbóreas amazônicas, é uma iniciativa importante, visto que a casca é uma matéria-prima potencial.

Para qualquer processo de biorrefinaria, é necessário um conhecimento aprofundado das características anatômicas, químicas e físicas (Vangeel et al., 2021). Nesse sentido, a casca apresenta uma anatomia complexa, que inclui tecidos meristemáticos, câmbio e felogênio, floema secundário condutor e não condutor, e periderme, constituída por feloderme e felema (Shtein et al., 2024; Caccianiga et al., 2021). Quimicamente, a casca é mais diversa que a madeira, pois contém polímeros de carboidratos (celulose, hemiceluloses e pectinas), polímeros fenólicos (lignina e taninos condensados), ésteres de ácidos graxos e polímeros de glicerol (suberina), extrativos (ácidos graxos, terpenoides, taninos) e compostos inorgânicos (Sousa et al., 2022; Vangeel et al., 2021). Lidar com todas essas características pode ser um desafio para a utilização industrial da casca; no entanto, isso também amplia seu potencial de uso em diferentes segmentos industriais (Sartori et al., 2021).

A casca é uma biomassa residual com amplo potencial de uso em diferentes produtos, como nos setores medicinal, alimentício e de produção de energia (Santos et al., 2021). De acordo com Vangeel et al. (2021), a casca está se tornando uma matéria-prima atraente para biorrefinarias, pois combina abundância, disponibilidade e baixo custo com características químicas, físicas e bioativas inerentemente ricas para a produção de produtos químicos e materiais. É um material básico utilizado há anos por comunidades tradicionais em todo o mundo para preparações medicinais. Neste último caso, quando o

material é estudado, geralmente há confirmação científica das práticas tradicionais (Liang et al., 2023; Ahmad et al., 2020; Maroyi, 2018).

Apesar das diversas possibilidades de utilização da casca, pouco se sabe sobre o potencial de aproveitamento da casca de espécies encontradas na Amazônia, visto que a maioria dos estudos se concentra nos biomas Cerrado e Caatinga (Araujo et al., 2021). Compreender a composição anatômica e química da casca de novas espécies pode indicar outros usos não madeireiros e introduzir novos produtos no mercado (Sousa et al., 2023).

A *Bagassa guianensis*, pertencente à família Moraceae, é uma das principais espécies madeireiras da Amazônia, conhecida por sua madeira resistente a ataques microbianos e comumente utilizada na construção civil, pisos, móveis e construção naval, gerando grande quantidade de resíduos (Lima et al., 2018; IPT, 2023; Pinheiro et al., 2022). Estudos sobre os resíduos de madeira de *Bagassa guianensis* indicaram que a espécie contém substâncias relevantes para a indústria farmacêutica, como flavonoides, moracinas e estilbenos, compostos bioativos encontrados em espécies de relevância medicinal (Pinheiro et al., 2022).

Contudo, estudos sobre a composição da casca são necessários para o aproveitamento integral dos resíduos da indústria florestal. Assim, a casca da espécie arbórea *Bagassa guianensis*, proveniente de manejo florestal sustentável na Amazônia, foi caracterizada em termos de anatomia, densidade, composição química e capacidade quelante do extrato. A hipótese levantada é que as características anatômicas, físico-químicas, incluindo a capacidade quelante do extrato da casca, podem ser indicadores relevantes para avaliar a viabilidade dessa casca como matéria-prima na produção de produtos derivados da rota biorrefinaria.

2. Material e Métodos

2.1 Amostragem

As cascas de *Bagassa guianensis* foram coletadas em área de manejo florestal sustentável na região amazônica, na Fazenda Shet, localizada no município de Dom Eliseu, no sudeste do Estado do Pará, Brasil Figura 1.

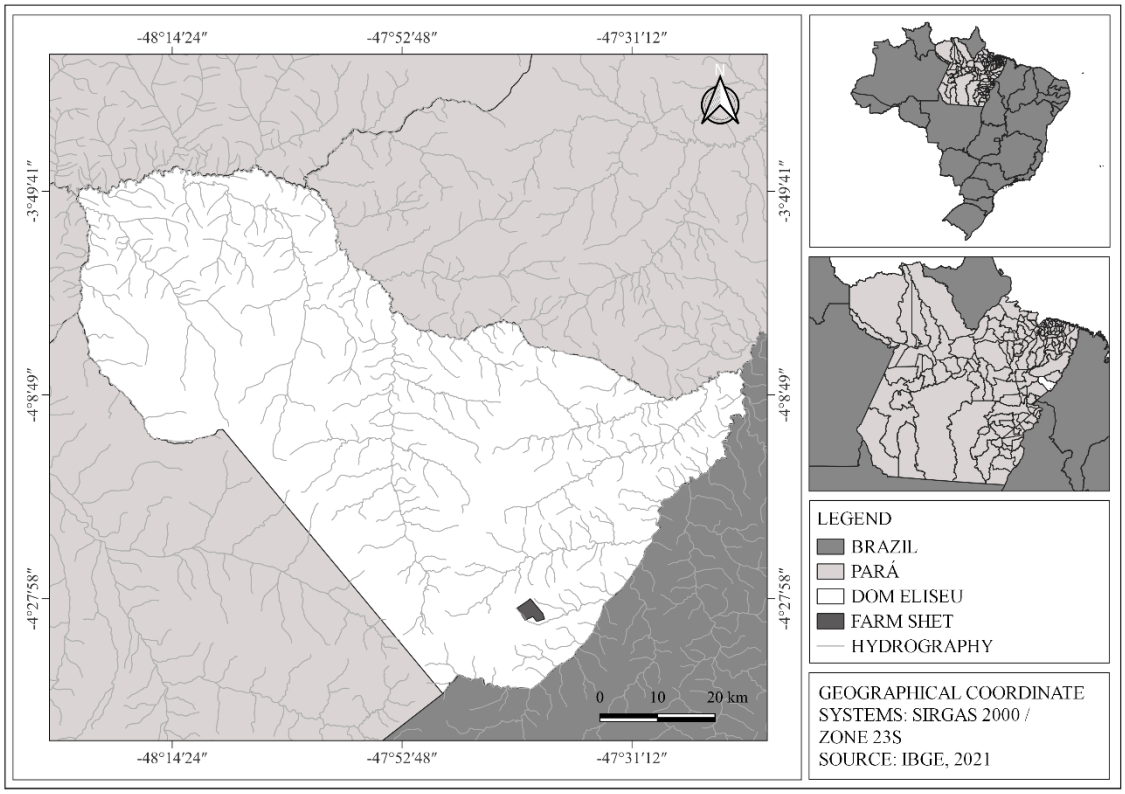


Figura 1 Mapa de localização da área de coleta do estudo.

Foram coletadas cascas de cinco árvores com o Diâmetro a Altura do Peito (DAP) acima de 25 cm. A remoção das cascas foi feita com auxílio de facão, no tronco da árvore até dois metros a partir do solo. Foram retiradas 10 amostras de cascas de várias posições do tronco de um mesmo indivíduo arbóreo com 10 cm de altura e 5 cm de largura. Posterior a remoção das cascas foi aplicada a calda bordalesa (sulfato de cobre e cal) contra xilófagos.

Após a coleta, as cascas foram secas ao ar livre e em seguida armazenadas em sacos de polietileno para encaminhar ao Laboratório de Ciência e Tecnologia da Madeira, localizado na Universidade do Estado Pará (LCTM-UEPA), para realizar a anatomia da casca. A composição química da casca foi feita no Laboratório de Anatomia da Madeira do Departamento de Ciências Florestais da Universidade Federal de Lavras (DCF-UFLA). A confirmação da identificação botânica foi realizada pelo Herbário da Embrapa Amazônia Oriental (IAN).

2.2 Caracterização anatômica da casca

A análise macroscópica da casca ocorreu na superfície da seção transversal das amostras polidas com uma sequência de lixas com granulometrias de 80, 120, 320, 600 e 1200. As fotografias para observar o ritidoma, periderme e floema condutor e não condutor foram obtidas utilizando

um estereomicroscópio de luz Leipzig GZ 800 APO (Leipzig, Alemanha), conectado a uma câmera digital Leipzig.

As lâminas permanentes foram preparadas com cortes transversais e longitudinais radial e tangencial da casca. Para a obtenção dos cortes histológicos, a casca foi impregnada com polietilenoglicol (PEG) 1500 (Quilho et al., 2000). Foram retirados cortes histológicos da casca de aproximadamente 12 – 20 µm de espessura utilizando um micrótomo de deslize Leicam SM 2010R (Leica, Biosystemas, Wetzlar, Alemanha). A dupla coloração foi realizada com crisoidina (1%) e azul de Astra (1%), seguida de desidratação dos cortes em uma série crescente de concentrações de álcool a 20%, 40%, 60%, 80% e 100%, e acetato de n-butila a 100%. Os cortes foram montados em lâminas e fixados com resina sintética Entellan. Fragmentos da casca interna e externa foram removidos e macerados em uma solução de ácido acético e peróxido de hidrogênio 1:1 (v/v) a 60°C, com a metodologia adaptada por 24 horas (Franklin, 1945). As observações microscópicas e a aquisição de dados foram realizadas no microscópio de luz ZEISS Primo Star Hall/LED (Carl Zeiss, Oberkochen, Alemanha), com o software TCapture. A descrição anatômica seguiu a terminologia de Angyalossy et al. (2016).

2.3 Densidade da casca

A densidade básica da casca foi determinada em cinco réplicas por imersão em água, utilizando a massa seca em estufa e o volume verde saturado de acordo com as normas TAPPI (258 om-02, 2002).

2.4 Caracterização química somativa da casca

A casca seca foi moída em um moinho de martelos para obter um material homogêneo com granulometria de 60 mesh (0,250 mm) para análises químicas. Amostras compostas de casca de cinco árvores foram misturadas para a quantificação de extrativos totais, suberina, cinzas e lignina total. Para os extrativos totais, os extrativos solúveis em diclorometano, etanol e água foram determinados após 6 h, 16 h e 16 h, respectivamente. Os extrativos solubilizados por cada solvente foram determinados gravimetricamente de acordo com o padrão TAPPI (T 204 om-88 e T 207 om-93). O teor de suberina foi determinado em uma amostra de 1,5 g do material não extraído, utilizando metóxido de sódio em metanol para despolimerização (Pereira et al., 1988). A amostra foi submetida a refluxo com 100 mL de solução de metóxido de sódio a 3% em metanol, por 3 horas, filtrada e lavada com metanol. O resíduo filtrado foi

submetido a refluxo com 100 mL de metanol por 15 minutos e filtrado novamente. Os filtrados combinados foram acidificados a pH 6 com ácido sulfúrico 2 M e evaporados até ficarem secos. O resíduo foi transferido para um funil de separação e lavado três vezes sucessivas com 50 mL de diclorometano. Os extratos combinados foram secos sobre sulfato de sódio anidro e o solvente evaporado. Os extratos de suberina foram quantificados gravimetricamente.

O teor de cinzas foi determinado pela pesagem do resíduo após a incineração completa de uma amostra de 2,0 g em mufla (Thermo Scientific Heraeus, Waltham, MA, EUA) a 525 °C durante a noite (TAPPI T 211om-93). A lignina total foi determinada pela análise da lignina Klason e da lignina solúvel. A lignina Klason seguiu o padrão TAPPI T222 om-88, enquanto a lignina solúvel foi quantificada a partir do filtrado da lignina Klason, cuja absorbância foi medida a 205 nm utilizando um espectrofotômetro, de acordo com o padrão TAPPI UM 250. Os polissacarídeos foram determinados por diferença. As análises foram realizadas em triplicata.

2.5 Fenóis totais, flavonoides e taninos condensados

Amostras de 0.50 g da casca (base seca) foram extraídas em solução de Etanol/Água 1:1 (v/v) utilizando banho ultrassônico a 50ºC durante 60 min. A solução foi filtrada em cadinho de vidro sinterizado nº 2 e o filtrado teve seu volume completado para 50 ml com água deionizada. O resíduo sólido retido na filtração foi seco e o rendimento de extração calculado com relação à massa do material inicial. Do extrato foi determinado os teores de fenóis totais, flavonoides totais e taninos condensados a partir da leitura de absorbâncias em espectrofotômetro biospectro SP-22. O teor de fenóis totais foi determinado pelo método Folin-Ciocalteau, utilizando ácido gálico como padrão (Singleton & Rossi, 1965) e seu resultado foi expresso em mg de equivalentes de ácido gálico (GAE) / g de extrato seco da casca. Os flavonoides totais foram quantificados por ensaio colorimétrico de cloreto de alumínio com padrão de catequina (Zhishen et al., 1999) e os taninos condensados pelo método de vanilina com ácido sulfúrico (Abdalla et al., 2014). Ambos os resultados foram expressos em mg de equivalentes de catequina (CE)/g de extrato da casca.

2.6 Análise elementar quantitativa da casca

A composição elementar da casca (macro e micronutrientes) foi quantificada por espectrometria de emissão óptica com plasma indutivamente acoplado (ICP-OES, Spectro Analytical Instruments, Alemanha).

2.7 Atividade quelante de Ferro (Fe), Zinco (Zn) e Cobre (Cu)

Para a análise da atividade quelante, foi utilizado o extrato comercial de ácido etilenodiaminotetracético (EDTA).

Para avaliar a atividade quelante de íons de ferro (FIC), foi utilizado e adaptado o método descrito por Gülçin (2005). A adaptação para microplacas envolve a adição de uma alíquota de 100 µl da amostra diluída (realizada em triplicata), seguida da adição de 100 µl de sulfato ferroso 0,10 mM e 100 µl de ferrozina 0,25 mM. A microplaca foi incubada no escuro, à temperatura ambiente, durante 10 minutos, antes de serem realizadas as medições de absorbância a 562 nm. A propriedade quelante de íons de ferro dos extratos foi calculada utilizando a fórmula:

(1)

$$\%\ inibição\ = \frac{Ac - As}{Ac}\ x\ 100$$

Onde: As representa a absorbância na presença das amostras de extrato vegetal e do padrão, e Ac representa a absorbância do controle.

Para avaliar a atividade quelante dos íons de zinco e cobre, foram utilizadas soluções de 1 mg/mL^{-1} e 10 mg/mL^{-1} em Dimetilsulfóxido - DMSO, empregando o método da murexida descrito por Watak e Patil (2012). A adaptação para microplacas consiste na adição de uma alíquota de 143 µl da amostra diluída (realizada em triplicata), seguida da adição de 143 µl de sulfato de cobre 3 mM ou 143 µl de cloreto de zinco 8 mM e 14 µl de murexida 5 mM. A mistura foi então mantida à temperatura ambiente no escuro por 3 minutos, e a absorbância foi medida em 462-520 nm. A porcentagem de inibição do complexo murexida-Zn^{2+} ou Cu^{2+} foi calculada utilizando a fórmula:

(2)

$$\%\ inibição\ = \frac{Ac - As}{Ac}\ x\ 100$$

Onde: As representa a absorbância na presença das amostras de extrato vegetal e do padrão, e Ac representa a absorbância do controle.

2.8 Análise estatística

A análise estatística descritiva e a elaboração do gráfico foram realizadas no software da Microsoft Office Excel® 2016.

3. Resultados e Discussões

3.1 Estrutura anatômica da casca

A espessura média da casca de *Bagassa guianensis* é de 7.10 mm (com

variação de 6.74 a 7.61 mm). Segundo Carvalho (2003), a casca dessa espécie pode atingir até 10 mm. Embora os resultados encontrados para a espessura da casca sejam consistentes com os dados relatados na literatura, é importante destacar que diversos fatores podem influenciar essa característica. Entre eles, incluem-se as características genéticas das plantas, a idade das árvores, a ocorrência de incêndios florestais (particularmente em ecossistemas propensos a incêndios), a topografia do local, a disponibilidade de nutrientes e água no solo, bem como o clima (Zhu et al., 2024; Mosaffaei e Jahani, 2021). A casca interna é de cor creme-rosada, enquanto a superfície é escamosa, variando de cinza a marrom, com algumas manchas brancas e pequenas fissuras (Fig. 2A). Ao cortar a casca, libera-se um látex branco e abundante que coagula imediatamente. A casca inclui floema (condutor e não condutor) e ritidoma (Figs. 2A, 3A-C e 4A e C).

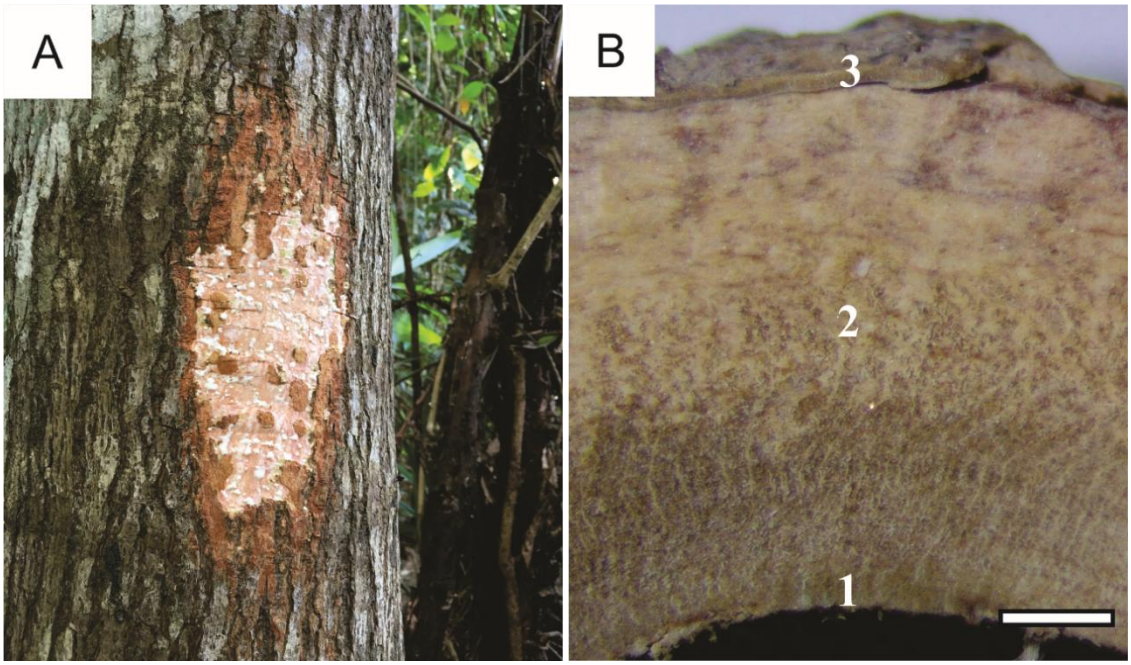


Figura 2 (A) Aspectos macroscópicos da casca externa de *Bagassa guianensis* Aubl.; (B) Sessão transversal macroscópica da casca evidenciando (1) floema condutor, (2) floema não condutor e (3) ritidoma. Barra de escala = 100 µm.

A estrutura anatômica externa da casca é composta por duas ou mais peridermes sequenciais (Fig. 3A). As peridermes são bem desenvolvidas e formam um padrão de ritidoma reticulado. Elas são caracterizadas por camadas contínuas de felema e feloderme originadas do felogênio (Figs. 3B e C). As células do felema são radialmente alongadas e possuem paredes finas. A feloderme é espessa, com mais de três camadas de células parenquimáticas radialmente alongadas. Lenticelas apareceram nas peridermes mais profundas, e floema morto foi observado entre as peridermes (Figs. 3A e C). As lenticelas

nas peridermes mais profundas são semelhantes às das peridermes iniciais, mas seu felogênio é menos ativo (Esau, 1974). É importante destacar que o ritidoma é um tecido essencial para a longevidade das plantas, especialmente em condições de intensas mudanças ambientais. Isso ocorre porque as células do ritidoma formam uma barreira que protege os tecidos internos contra fatores bióticos e abióticos (Brzostowska et al., 2025).

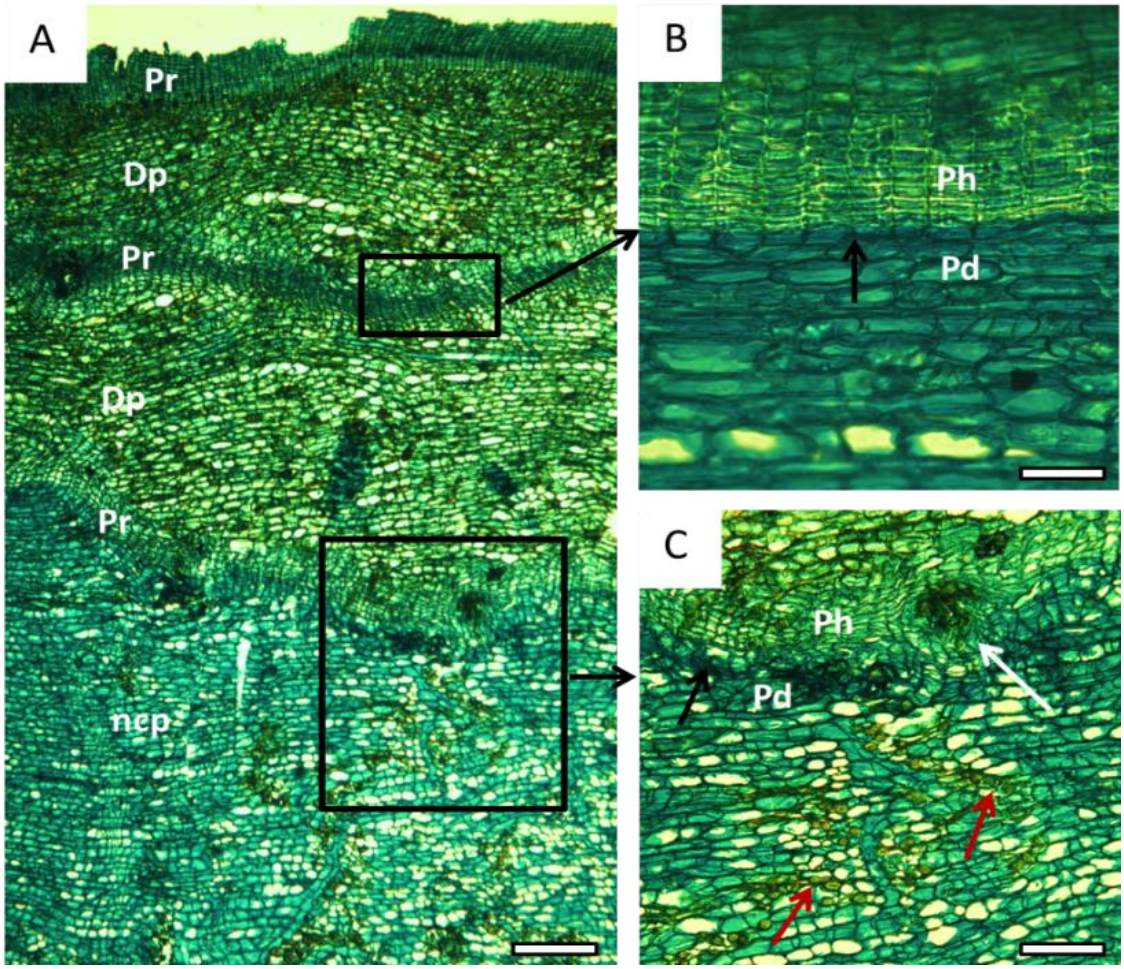


Figura 3 (A-C) Peridermes de *B. guianensis* vistas em corte transversal. (A) periderme [Pe], floema morto (DP) e floema não-condutor (ncp). (B) zona delimitada do ritidoma mostrando felogênio [seta], feloderme [Pd] e felema [Ph]. (C) zona delimitada do ritidoma evidenciando felogênio [seta preta], feloderme [Pd], felema [Ph], lenticela [seta branca] e laticíferos [seta vermelha]. Barra de escala A e C = 100 µm e B = 50 µm

A transição entre os dois tipos de floema em *Bagassa guianensis* é gradual (Fig. 4C). Laticíferos foram observados ao longo de todo o floema não condutor e, por vezes, encontram-se colapsados (Figs. 4A e B). A presença de laticíferos também é observada na madeira de *Bagassa guianensis* (Kribs, 1968).

Contudo, não foi encontrada na literatura uma descrição clara da função dos laticíferos na casca da espécie. Outros estudos relatam que o látex produzido pelas células dos tubos laticíferos de diferentes espécies tem a função

de adaptação e proteção, conferindo-lhes resistência à herbivoria e a patógeno Marques et al., 2023; Medina et al., 2021). No floema condutor, os elementos dos tubos crivados são túrgidos e acompanhados por pequenas células, distribuídas isoladamente e em pequenos grupos com placas de perfuração inclinadas (Figs. 4D-E e 5E). O diâmetro tangencial médio dos elementos do tubo crivado variou de 11.06 a 43.31 µm, e o comprimento médio variou de 41.48 a 205.04 µm. Células secretoras estão presentes tanto no floema condutor quanto no não condutor (Figs. 4A-F).

As fibras de *Bagassa guianensis* apresentam um comprimento médio de 3,668.15 µm (com variação de 626.83 a 11,449.61 µm), uma espessura média de 6.59 µm (com variação de 5.98 a 15.79 µm) e um diâmetro do lúmen de 5.40 µm (com variação de 2.24 a 18.56 µm). Essa característica é significativa, pois o conhecimento do comprimento da fibra é um importante indicador das propriedades físicas e mecânicas de qualquer produto à base de fibras (Angyalossy et al., 2016). Fibras gelatinosas e septadas foram observadas (Figs. 4D e 5F-G). Fibras septadas também foram registradas na casca de *Antiaris toxicaria* (Moraceae) (Angyalossy et al., 2016), e fibras gelatinosas foram registradas na casca de *Brosimum gaudichaudii* (Moraceae) (Palhares et al., 2007).

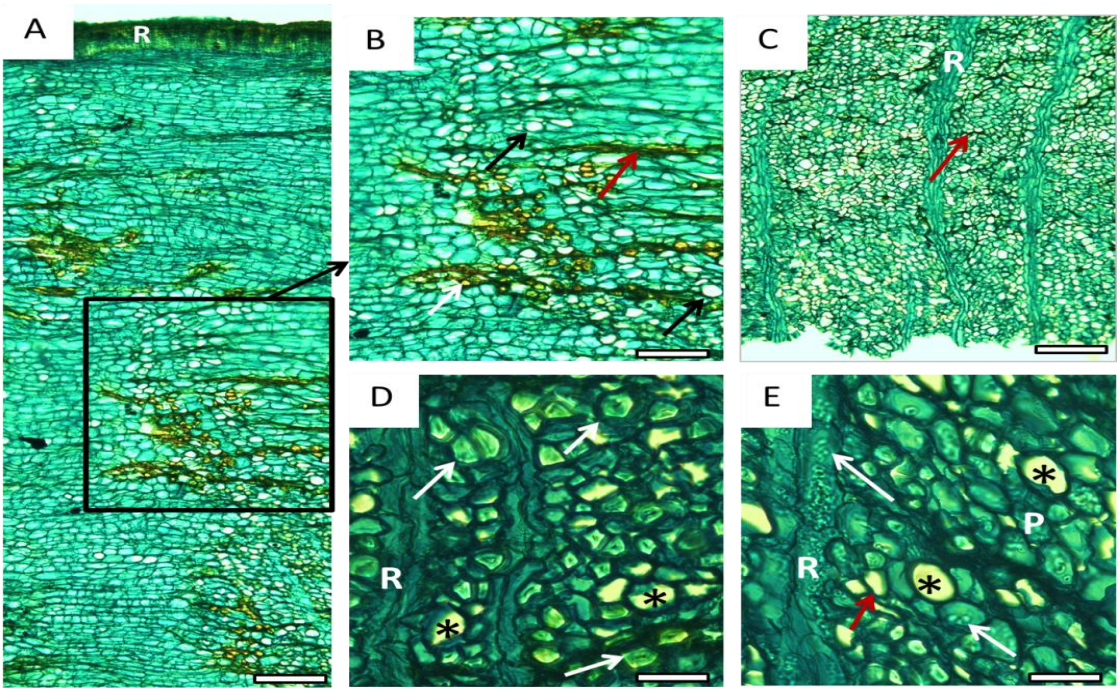


Figura 4 (A-C) Sessão transversal da casca de *B. guianensis.* (A) floema nãocondutor e periderme [R]. (B) zona delimitada do floema não condutor evidenciando laticíferos [seta branca], laticífero colapsado [seta vermelha] e células secretoras [seta preta]. (C) floema condutor com transição para o floema

não condutor evidenciada pelo colapso dos elementos de tubo [seta]. (D) fibras gelatinosas [setas brancas], raio [R] e células secretoras [*]. (E) elemento de tubo [seta vermelha], raio [R], parênquima [P], células secretoras [*] e grãos de amido [setas brancas]. Barra de escala A-C = 100 µm e D-E = 50 µm.

Os raios de *B. guianensis* não são esclerificados, têm um curso ondulado e os fenômenos de dilatação ocorrem por divisão celular anticlinal e expansão celular tanto nos raios quanto no parênquima axial (**Fig.** 4C). Esses raios são multisseriados e o número de células varia entre 8 – 36 em altura e 2 – 4 em largura (**Fig.** 5A). Altura média dos raios foi de 391.55 (119.58 – 871.11) µm e a largura foi de 46.90 (23.30 – 112.19) µm e são formados por células procumbentes (**Fig.** 5C). Cristais de oxalato de cálcio foram observados aderidos nas células de parênquima axial (**Fig.** 5D).

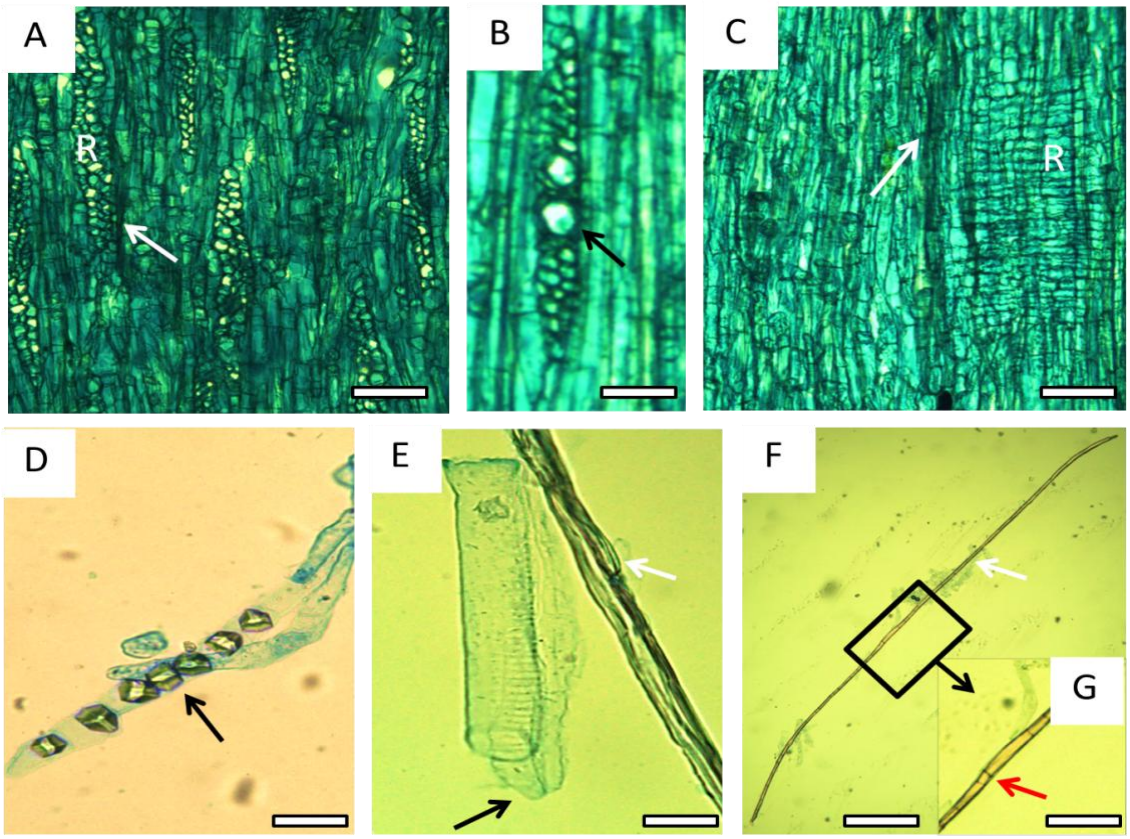


Figura 5 (A-G) sessões longitudinais e elementos dissociados da casca de *Bagassa guianensis* Aubl. (A-B) sessão tangencial mostrando raios [R] laticíferos [seta branca] e células secretoras no raio [seta preta]. (C) sessão radial mostrando raios [R] e laticíferos [seta]. (D) cristais de oxalato de cálcio [seta]. (E) elementos de tubo [seta] e fibras [seta branca]. (F) fibra [seta]. (G) região delimitada da fibra evidenciando os septos da fibra [seta vermelha]. Barra de escala A-G = 100 µm.

A caracterização anatômica da casca é extremamente importante para obter informações sobre sua estrutura e características celulares e, assim, investir em pesquisas aprofundadas sobre uma determinada característica e tornar o processo de conversão de biomassa em produtos de alto valor agregado

mais eficiente (Vangeel et al., 2021).

3.2 Densidade da casca

A densidade básica da casca de *Bagassa guianensis* foi de 330 kg/cm³, resultado diferente foi observada em outras espécies amazônicas, como *Goupia glabra*, com 690 kg/cm³ (Carmo et al., 2016a), e *Copaifera langsdorffii*, com 781 kg/cm³ (Carmo et al., 2016b). É importante avaliar a densidade básica da casca, pois, no processo de produção de energia, propriedades do material como densidade, teor de umidade, granulometria, poder calorífico, teor de cinzas e quantidade de contaminantes presentes são consideradas (Corrandi et al., 2021). Vale ressaltar também que a condutividade térmica da casca é afetada por sua densidade e teor de umidade (Nolan et al., 2020).

3.3 Composição da química somativa

Os resultados encontrados de médias, desvio padrão e coeficiente de variação, para a composição química da casca de *Bagassa guianensis* são apresentados na tabela 2. O conteúdo dos extrativos totais desta espécie foi de 24%, com 85.97% de compostos polares que são solúveis em etanol e água. A *B. guianensis* apresentou 1.97% de suberina, 6.6% de cinza, 10.46% de lignina e 56.97% de polissacarídeos.

Tabela 2 Composição química somativa das cascas de *Bagassa guianensis* Aubl.

Composição química	*Bagassa guianensis*
Extrativos totais %	24
Diclorometano %	3.37 ± 0.41
Etanol %	9.33 ± 0.63
Água %	11.32 ± 1.64
Suberina %	1.97
Cinza %	6.6 ± 0.01
Lignina total %	10.46
Lignina Klason %	8.68
Lignina solúvel %	1.78
Polissacarídeos[a] %	56.97

Os símbolos apresentados na tabela correspondem: (±) desvio padrão da população e ([a]) Determinado por diferença.

Mota et al. (2017), ao avaliarem a composição química da casca de *Anadenanthera peregrina* e *Anadenanthera colubrina*, encontraram valores elevados e semelhantes de extrativos totais para ambas as espécies, correspondendo a 29%. Adicionalmente, foram encontrados 85% e 90% de extrativos polares solúveis em etanol e água, respectivamente. Resultado similar foi encontrado para *Bagassa guianensis*, com 24.02% de extrativos totais e 85.97% de compostos polares solúveis em etanol e água. O alto teor de

extrativos pode indicar que o material é rico em compostos fenólicos (Mota et al., 2021). Resultados diferentes de extrativos totais foram encontrados na casca de *Parinari curatellifolia*, com 12.2%, onde os compostos polares representam 70.5% do total (Malengue et al., 2024). Do ponto de vista de uma rota de biorrefinaria, as altas concentrações de extrativos na casca podem indicar que o material é interessante para a fabricação de sabões, velas, amaciantes de roupas, medicamentos, detergentes sintéticos, emulsificantes, umectantes, estabilizantes e plastificantes. No entanto, para que isso ocorra, além da quantificação, é necessário qualificar cada composto presente no extrato da casca (Hanyin-Li et al., 2023). A quantificação dos extrativos é essencial no processo de caracterização, permitindo que se invista na investigação do material que apresentou resultados promissores.

A casca de *Bagassa guianensis* apresentou baixo teor de suberina (1.97%), corroborado pela pequena proporção de felém observada na anatomia da casca. Valores baixos também foram encontrados para *Albizia niopoides*, com teor de suberina de 0.50%, sendo esses valores atribuídos à pequena proporção de felém, resultando em baixo teor de suberina (Carmo et al., 2016c). A suberina é um biopolímero presente nas camadas externas dos tecidos vegetais primários e secundários, que desempenha um papel fundamental na proteção das plantas e atua como barreira contra fatores abióticos e bióticos (Rains et al., 2022). O teor de suberina varia consideravelmente entre as espécies, e sua produção pode influenciar a resposta das plantas a diversos fatores, como seca, perda de água, disponibilidade de nutrientes, além de sua defesa contra ataques de patógenos e fungos. Portanto, a deposição e a composição da suberina têm impacto direto nas características fisiológicas e de defesa das plantas (Warman-Ware et al., 2021).

A espécie estudada, *Bagassa guianensis*, apresentou um teor de cinzas de 6.60% na casca, considerado intermediário. Esse resultado corrobora as observações anatômicas, que revelam a presença de numerosos cristais nas células do parênquima (Fig. 5D). Resultados diferentes e superiores foram encontrados na casca de *Quercus vulcania*, com 16.4% de cinzas, constituídas principalmente por cristais de oxalato de cálcio (Seen et al., 2024). Neiva et al. (2018), pesquisando o teor de cinzas na casca e na madeira de *Eucalyptus globulus*, encontraram valores de cinzas mais elevados na casca em comparação com a madeira, correspondendo a 5.40% e 0.70%,

respectivamente. Essa diferença se deve às distintas composições químicas da casca e da madeira. Um alto teor de cinzas pode ser prejudicial ao processo de carbonização, uma vez que os materiais não combustíveis presentes nas cinzas consomem parte da energia produzida para manter a temperatura (Neiva et al., 2018). Além disso, as cinzas representam desafios significativos para a operação dos equipamentos durante o processo de combustão, pois seu alto teor pode causar escória, incrustações, corrosão e outros problemas que afetam o desempenho e a durabilidade dos equipamentos, podendo também gerar impactos ambientais, como a geração de pó ultrafino (Lee et al., 2021). É importante ressaltar que o alto teor de cinzas está correlacionado com os cristais observados na estrutura anatômica da casca de *Bagassa guianensis* (Fig. 5D) e com o alto teor de potássio observado na análise elementar (Tabela 4).

Sartori et al. (2016), estudando clones de eucalipto (*Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis*), encontraram valores de lignina total variando de 18 a 21%, com lignina Klason entre 16 e 18% e lignina solúvel variando de 2 a 3%. Em contraste, a espécie *Bagassa guianensis* apresentou valores mais baixos, com lignina total de 10.46%, lignina Klason de 8.68% e lignina solúvel de 1.78%. A lignina demonstra alto potencial para substituir materiais derivados de combustíveis fósseis, por ser um composto aromático natural formado por três álcoois hidroxicinamílicos, coniferil e sinapil (Rietzler et al., 2022). Tradicionalmente, a lignina tem sido considerada um resíduo de baixo valor (Bajwa et al., 2019). No entanto, nas últimas décadas, tem havido uma crescente iniciativa de pesquisa voltada para agregar valor à lignina e mudar as perspectivas em direção à geração de produtos valiosos, como polímeros, adesivos, gás de síntese, fibra de carbono, compostos fenólicos, produtos oxidados e hidrocarbonetos multifuncionais (Yu e Kim, 2020; Bajwa et al., 2019).

A casca de *Bagassa guianensis* apresentou um alto teor de polissacarídeos, de 56.97%. Sen et al. (2010), ao estudarem a cortiça e o floema de *Quercus cerris*, encontraram valores de polissacarídeos mais elevados no floema do que na cortiça, correspondendo a 30.60% e 16.50%, respectivamente. O alto teor de polissacarídeos em *Bagassa guianensis* pode ser interessante para diversas aplicações, como polióis para espumas de poliuretano, oligômeros derivados de hemicelulose ou produção de etanol (Neiva et al., 2018). Na perspectiva da utilização de polissacarídeos em biorrefinarias, os resultados são promissores na fabricação de bioetanol, biogás, bioplásticos e biopolímeros

(Banu et al., 2021; Ioannidou et al., 2020).

3.4 Teor fenólico de extratos da casca

Os polifenóis são produtos vegetais naturais ou metabólitos secundários formados por grupos fenólicos, que incluem ácidos fenólicos, flavonoides, taninos e outros, e são responsáveis pelo aroma, cor e propriedades antioxidantes das plantas (Hano e Tungmunnithum, 2020). Além de serem conhecidos por seus efeitos benéficos à saúde, os polifenóis ganharam destaque nas últimas décadas por seus resultados positivos na prevenção de diversas doenças, como doenças cardiovasculares, diabetes mellitus, cânceres e doenças neurodegenerativas (D'Angelo, 2020). O teor de polifenóis do extrato da casca de *Bagassa guianensis* é apresentado na Tabela 3. O teor total de fenóis foi de 8.56 mg GAE/g^{-1} de extrato, resultados diferentes foram encontrados para outras espécies amazônicas, como *Astronium lecointei* com 77.10 mg GAE/g^{-1} (Mota et al., 2021a) e *Myrcia eximia* com 242.40 mg GAE/g^{-1} de extrato (Araujo et al., 2021). Quando comparado com outras biomassas, observou-se que o uso de diferentes solventes para extrair os fenóis totais foi eficiente nesse processo de rendimento; a espécie *Cupressus lusitanica*, quando extraída com acetona, apresentou um rendimento de 251.30 mg GAE/g^{-1} e com etanol obteve-se 139.7 mg GAE/g^{-1} (Tavares et al., 2020). Do ponto de vista da produção de materiais na indústria de biorrefinarias, o baixo teor de fenóis totais é interessante, pois, em altas concentrações, os fenóis dificultam o processo de conversão da biomassa em açúcares fermentáveis, o que pode reduzir a qualidade dos biocombustíveis e biomateriais (Yao et al., 2022).

Tabela 3 Rendimento da extração de fenólico total, flavonoides e taninos condensados

Analises	*Bagassa guianensis*
Teor fenólico total (mg GAE g^{-1} de extrato)	8.56
Flavonoides (mg CE g^{-1} de extrato)	10.45
Taninos condensados (mg CE g^{-1} de extrato)	2.24

O teor de flavonoides em *Bagassa guianensis* foi de 10.45 mg CE/g^{-1} de extrato. Resultados mais elevados foram encontrados para espécies amazônicas como *Tachigali guianensis*, com 69.50 mg CE/g^{-1} de extrato, e *Tachigali glauca*, com 373 mg CE/g^{-1} de extrato (Mota et al., 2021). Chemetova et al. (2020), ao avaliarem o rendimento de flavonoides da madeira e da casca de *Acacia melanoxylon*, constataram que o maior rendimento de flavonoides foi obtido na biomassa juvenil (madeira: 201.5 mg CE/g^{-1} e casca: 222.6 mg

CE/g^{-1}), enquanto na fase adulta o rendimento foi de 60.4 mg CE/g^{-1} (madeira) e 79.8 mg CE/g^{-1} (casca). Apesar do menor teor de flavonoides em *Bagassa guianensis* em comparação com os valores da literatura, esta ainda foi a análise química mais representativa entre os fenólicos totais. Estudos recentes testaram outros métodos de extração, selecionando solventes mais eficientes, e os resultados foram positivos e surpreendentes, como constatado no trabalho de Sillero (2021a; 2021b). Os flavonoides são amplamente reconhecidos como agentes terapêuticos, com a maioria das aplicações focadas na área médica, sendo utilizados como agentes anticancerígenos, antimicrobianos, antivirais, antiangiogênicos, antimaláricos, antioxidantes, neuroprotetores, antitumorais e antiproliferativos (Ullah et al., 2020).

O teor de taninos condensados de *Bagassa guianensis* foi de 2.24 mg CE/g^{-1} de extrato. Resultado diferente foi encontrado para *Myracrodruon urundeuva*, com 8.50 mg CE/g^{-1} de extrato (Velvizhi et al., 2022). Comparando com outras partes vegetativas e outros métodos de extração, Stefanowicz et al. (2021), pesquisando a biomassa de *Reynoutria japonica*, constataram um rendimento maior de taninos condensados nas folhas (116 mg GTE g^{-1}) e raízes (70 mg GTE g^{-1}) do que no caule (8 mg GTE g^{-1}). Os taninos condensados, também conhecidos como proantocianidinas, são compostos por monômeros de flavan-3-ol. O principal uso de taninos nos últimos anos tem sido na produção de couro. No entanto, devido à sua natureza fenólica, esses produtos químicos podem substituir o fenol derivado de combustíveis fósseis em diversas aplicações, como a produção de espumas isolantes e adesivos (Kemppainen et al., 2014).

Considerando as características químicas apresentadas, é essencial destacar que a casca possui um alto potencial para a formulação de produtos de valor agregado, como antioxidantes, antimicrobianos e nutracêuticos (Hegde e Lakshman, 2023; Akosung et al., 2023; Viana et al., 2023; Miranda et al., 2024; Karle et al., 2021).

3.5 Análise elementar quantitativa da casca

A caracterização da composição mineral da casca de *B. guianensis* é mostrada na tabela 3. O macronutriente mais representativo da casca foi o cálcio 25.42 g kg $^{-1}$, provavelmente resultante da alta quantidade de oxalato de cálcio observada nas células de parênquima (**Fig.** 5B), seguido do Nitrogênio com 12.80 g kg $^{-1}$ e Potássio 9.89 kg $^{-1}$. O micronutriente mais representativo da casca

de *B. guianesis* é o ferro com 498.62 mg kg $^{-1}$, seguido do Manganês 52.53 mg kg $^{-1}$, Cobre 15.36 mg kg $^{-1}$, Zinco 14.60 mg kg $^{-1}$ e Boro 13.90 mg kg $^{-1}$.

Tabela 4 Constituição elementar da casca de *Bagassa guianensis.*

Mineral	Quantidade de elemento
N (g kg $^{-1}$)	12.80
P (g kg $^{-1}$)	0.42
K (g kg $^{-1}$)	9.89
Ca (g kg $^{-1}$)	25.42
Mg (g kg $^{-1}$)	1.13
S (g kg $^{-1}$)	0.55
Cu (mg kg $^{-1}$)	15.36
Zn (mg kg $^{-1}$)	14.60
Fe (mg kg $^{-1}$)	498.62
Mn (mg kg $^{-1}$)	52.53
B (mg kg $^{-1}$)	13.90

Vale ressaltar que as altas concentrações de cálcio, nitrogênio e potássio na casca sugerem que o material pode servir como fonte de bioelementos e ser utilizado como componente de substrato vegetal (Sousa et al., 2022). Em um contexto de biorrefinaria, após a extração de compostos químicos de alto valor agregado da biomassa, os resíduos desse material podem ser utilizados como fertilizantes, contribuindo para um uso mais eficiente e sustentável dos recursos naturais (Sandberg et al., 2024). Nesse sentido, destaca-se o alto teor de cálcio, que pode ser promissor na produção de fertilizantes. Além disso, a presença de cálcio pode ser atribuída à abundante presença de cristais, observada nas células do parênquima. Por outro lado, o alto teor de potássio é prejudicial em processos de combustão, pois o potássio é um mineral formador de cinzas que pode causar corrosão durante a carbonização (Nunes et al., 2016). A elevada concentração de ferro na casca de *Bagassa guianensis* pode ser atribuída à área de coleta estar próxima ao maior depósito de minério de ferro do mundo, localizado na província mineral de Carajás (Justo et al., 2020).

3.6 Atividade quelante da casca

Os resultados da atividade quelante da casca de *Bagassa guianensis* são apresentados na **figura 6**.

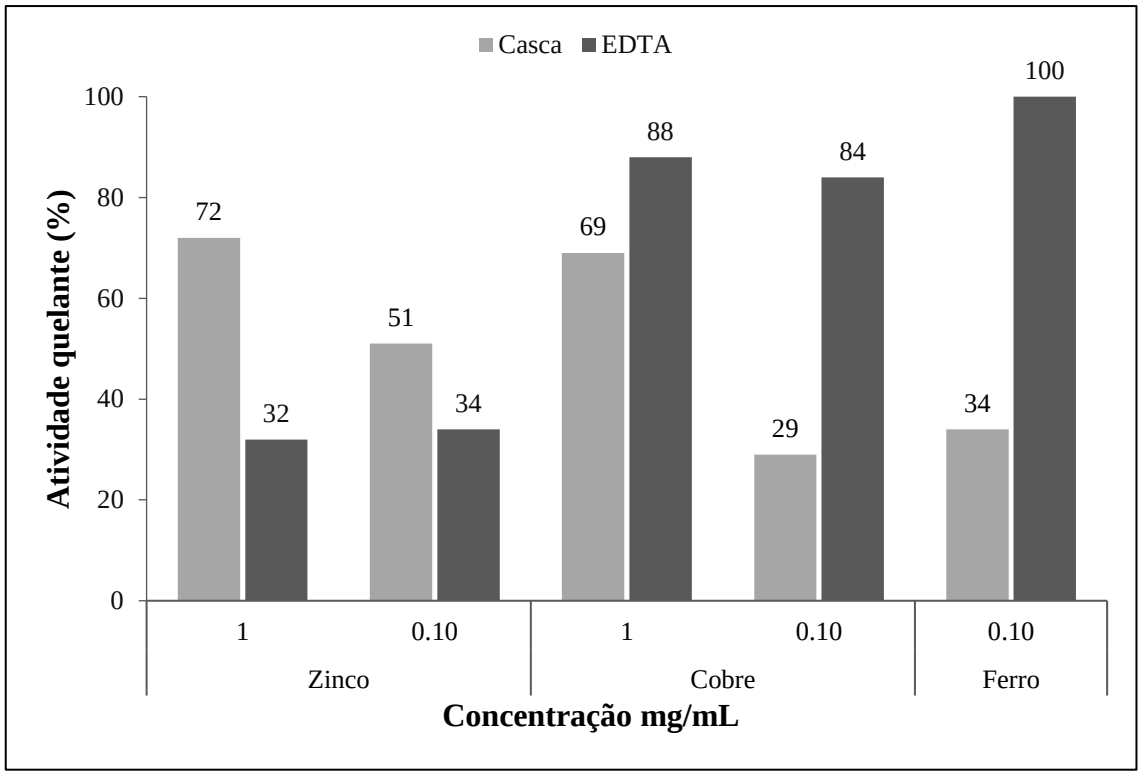


Figura 6. Comparação da capacidade de quelação do Zinco, Cobre e Ferro com o extrato da casca de *Bagassa guianensis* e o quelante comercial EDTA.

Os resultados da capacidade de quelação de zinco mostraram que, tanto na concentração de 1 mg/mL (com atividade quelante de 72%) quanto na de 0.1 mg/mL (com atividade quelante de 51%), o extrato de *Bagassa guianensis* apresentou maior eficácia na quelação do que o agente quelante comercial EDTA em ambas as concentrações. Entretanto, na análise de quelação de cobre, o EDTA mostrou-se superior em ambas as concentrações testadas. Para a quelação de ferro na concentração de 0.1 mg/mL, o agente quelante comercial demonstrou maior eficiência.

É importante destacar que os metais pesados são essenciais para os processos biológicos, mas, acima de quantidades normais, podem ser prejudiciais à saúde humana, afetando principalmente os sistemas respiratório, nervoso, reprodutivo e digestivo (Gulcin e Alwasel, 2022). A intoxicação por metais pesados pode ocorrer devido a atividades como mineração, resíduos industriais, agrícolas e de esgoto (Kim et al., 2019). A terapia de quelação de metais é o tratamento clínico mais crucial e primário em casos de intoxicação por metais pesados (Gulcin e Alwasel, 2022).

Nesse contexto, os agentes quelantes desempenham um papel significativo como antioxidantes, pois induzem o potencial redox e estabilizam a forma oxidada do íon metálico, o que significa que os metais pesados podem ser excretados do organismo após o tratamento com esses agentes (Rodrigues et

al., 2021). Da mesma forma, pesquisas têm avançado no estudo de agentes quelantes presentes na casca de árvores, visando utilizá-los como biossolventes para a remoção de metais pesados em ambientes aquosos. Os resultados destacam a eficácia da adsorção de ferro e cádmio em água contaminada utilizando biossorventes derivados da cortiça de *Quercus suber* L. (sobreiro) e da casca de *Pinus pinaster*, *Pinus radiata*, *Pinus pinea* e *Pinus sylvestris* (pinheiros) (González-Feijoo et al., 2024). É devido a todo o potencial apresentado que a casca deixa de ser uma biomassa sem valor, tornando-se valiosa, atrativa e versátil.

4. Conclusões

A casca de *Bagassa guianensis* foi caracterizada pela primeira vez em termos de sua estrutura anatômica, química e física. A casca da espécie apresenta ritidoma, floema condutor e não condutor, laticíferos, células secretoras, fibras gelatinosas e septadas e raios multisseriados.

As características químicas mais notáveis foram o alto teor de extrativos, polissacarídeos e cálcio. Esses resultados indicam que a casca de *Bagassa guianensis* pode ser uma fonte interessante para a produção de materiais à base de extrativos, polissacarídeos e cálcio, por exemplo, na produção de biocombustíveis, biomateriais e fertilizantes. A atividade quelante do extrato da casca para zinco foi superior à do agente quelante comercial EDTA, indicando que a casca dessa espécie poderia ser usada na produção de produtos farmacêuticos que auxiliam no tratamento do envenenamento causado pelo metal pesado zinco.

A casca da *Bagassa guianensis* pode ser considerada uma matéria-prima promissora para biorrefinarias devido ao seu alto teor de extrativos, cálcio, polissacarídeos e capacidade de quelação de zinco.

Referências bibliográficas

Abdalla, S., Pizzi, A., Ayed, N., Charrier-El Bouhtoury, F., Charrier, B., Bahabri, F., Ganash, A., 2014. MALDI-TOF analysis of *Aleppo pine* (Pinus halepensis) bark tannin. BioResources. 9, 3396-3406. https://doi.org/10.15376/biores.9.2.3396-3406

Akosung, E., Kenmogne, S. B., Lobe Songue, J., Longue Ekon, J. P., Lateef, M., Ngeufa Happi, E., Kamdem Waffo, A. F., 2021. Bioactive constituents from Manilkara obovata (Sabine & G. Don) JH Hemsl. Natural product research, 35, 4347-4356. https://doi.org/10.1080/14786419.2020.1713123

Andrew, J., Masetlwa, J., Tesfaye, T., Sithole, B., 2020. Beneficiation of eucalyptus tree barks in the context of an integrated biorefinery – Optimisation of accelerated solvent extraction (ASE) of polyphenolic compounds using response surface methodology. Sustainable Chemistry and Pharmacy. 18, 100327. https://doi.org/10.1016/j.scp.2020.100327

Angyalossy, V., Pace, M.R., Evert, R.F., Marcati, C.R., Oskolski, A.A., Terrazas, T., Kotina, E., Lens, F., Mazzoni-Viveiros, S.C., Angeles, G., Machado, S.R., Crivellaro, A., Rao, K.S., Junikka, L., Nikolaeva, N., Baas, P., 2016. IAWA List of Microscopic Bark Features. IAWA Jornal. 37, 517-615. https://doi.org/10.1163/22941932-20160151

Araujo, E.D.S., Mota, G.D.S., Lorenço, M.S., Zidanes, U.L., Silva, L.R.D., Silva, E.P., Ferreira, V.R.F., Cardoso, M.D.G. Mori, F. A., 2020. Characterisation and valorisation of the bark of *Myrcia eximia* DC. trees from the Amazon rainforest as a source of phenolic compounds. Holzforschung. 74, 989-998. https://doi.org/10.1515/hf-2019-0294

Araujo, E.D.S.., Lorenço, M.S., Zidanes, U.L., Sousa, T. B., Mota, G.D.S., Reis, V.D.N.D.O., Da Silva, M.G., Mori, F.A., 2021. Quantification of the bark *Myrcia eximia* DC tannins from the Amazon rainforest and its application in the formulation of natural adhesives for wood. Journal of Cleaner Production. 280, 124324. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124324

Ahmad, R., Almubayedh, H., Ahmad, N., Naqvi, A.A., Riaz, M., 2020. Ethnobotany, ethnopharmacology, phytochemistry, biological activities and toxicity of Pistacia chinensis subsp. integerrima: A comprehensive review. Phytotherapy Research. 34, 2793-2819. https://doi.org/10.1002/ptr.6720

Bajwa, D.S., Pourhashem, G., Ullah, A.H., Bajwa, S.G., 2019. A concise review of current lignin production, applications, products and their environmental impact. Industrial Crops and Products. 139, 111526. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2019.111526

Banu, J. R., Kavitha, S., Tyagi, V. K., Gunasekaran, M., Karthikeyan, O. P., Kumar, G., 2021. Lignocellulosic biomass based biorefinery: A successful platform towards circular bioeconomy. Fuel, *302*, 121086. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.121086

Braz, R.L., Nutto, L., Brunsmeier, M., Becker, G., da Silva, D.A., Braz, R.L., Nutto, L., Brunsmeier, M., Silva, D.A., 2014. Resíduos da colheita florestal e do

processamento da madeira na Amazônia–uma análise da cadeia produtiva. Journal of Biotechnology and Biodiversity. 5, 168-181. https://doi.org/10.20873/jbb.uft.cemaf.v5n2.braz

Brzostowska, A., Gola, E.M., Myśkow, E., 2025. Seasonal Dynamics of Periderm Maintenance and Phellogen Re-Initiation in Aesculus hippocastanum. Forests, 16, 176. https://doi.org/10.3390/f16010176

Bryers, R.W., 1996. Fireside slagging, fouling, and high-temperature corrosion of heat-transfer surface due to impurities in steam-raising fuels. Progress in energy and combustion science. 22, 29-120. https://doi.org/10.1016/0360-1285(95)00012-7

Caccianiga, M., Compostella, C., Caccia, G., Cattaneo, C., 2021. Contribution of plant anatomy to forensic investigation: Tree bark morphology. Forensic Science International. 318, 110598. https://doi.org/10.1016/j.forsciint.2020.110598

Carmo, J.F., Miranda, I., Quilhó, T., Carvalho, A.M., Carmo, F.H., Latorraca, J.V.D.F, Pereira, H. 2016a. Bark characterisation of the Brazilian hardwood *Goupia glabra* in terms of its valorisation. BioResources. 11, 4794-4807. https://doi.org/10.15376/biores.11.2.4794-4807

Carmo, J.F., Miranda, I., Quilhó, T., Sousa, V.B., Cardoso, S., Carvalho, A.M., Carmo, F.H., Latorraca, J. V., Pereira, H., 2016b. *Copaifera langsdorffii* bark as a source of chemicals: Structural and chemical characterization. Journal of Wood Chemistry and Technology. 36, 305-317. https://doi.org/10.1080/02773813.2016.1140208

Carmo, J.F., Miranda, I., Quilhó, T., Sousa, V.B., Carmo, F.H., Latorraca, J.V., Pereira, H., 2016c. Chemical and structural characterization of the bark of *Albizia niopoides* trees from the Amazon. Wood Science and Technology. 50, 677-692. https://doi.org/10.1007/s00226-016-0807-3

Carvalho, P.E.R., 2010. Espécies arbóreas brasileiras. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica; Colombo: Embrapa Florestas. primeira ed. Brasília, Distrito Federal.

Chemetova, C., Ribeiro, H., Fabião, A., Gominho, J., 2020. Towards sustainable valorisation of Acacia melanoxylon biomass: Characterization of mature and juvenile plant tissues. Environmental Research, 191, 110090. https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.110090

Corradi, G.M., 2021. Energy quality of different forest biomasses used in western Paraná. Dissertation, University State of Western Paraná.

D'Angelo, S., 2020. Polyphenols: Potential beneficial effects of these phytochemicals in athletes. Current Sports Medicine Reports. 19, 260-265. https://doi.org/10.1249/JSR.0000000000000729

Esau, K., 1974. Anatomy of seed plants. First Ed. California, United States.

Franklin, G.L., 1945. Preparation of thin sections of synthetic resins and wood-resin composites, and a new macerating method for wood. Nature. 155, 51-51.

González-Feijoo, R., Santás-Miguel, V., Arenas-Lago, D., Álvarez-Rodríguez, E., Núñez-Delgado, A., Arias-Estévez, M., Pérez-Rodríguez, P., 2024. Effectiveness of cork and pine bark powders as biosorbents for potentially toxic elements present in aqueous solution. Environmental Research, 250, 118455. https://doi.org/10.1016/j.envres.2024.118455

Gülçin, İ., 2005. The antioxidant and radical scavenging activities of black pepper (Piper nigrum) seeds. International journal of food sciences and nutrition. 56, 491-499. https://doi.org/10.1080/09637480500450248

Gulcin, İ., Alwasel, S.H., 2022. Metal ions, metal chelators and metal chelating assay as antioxidant method. Processes. 10, 132. https://doi.org/10.3390/pr10010132

Hano, C., Tungmunnithum, D., 2020. Plant polyphenols, more than just simple natural antioxidants: Oxidative stress, aging and age-related diseases. Medicines. 7, 26. https://doi.org/10.3390/medicines7050026

Harman-Ware, A. E., Sparks, S., Addison, B., Kalluri, U. C., 2021. Importance of suberin biopolymer in plant function, contributions to soil organic carbon and in the production of bio-derived energy and materials. Biotechnology for Biofuels, 14, 1-21. https://doi.org/10.1186/s13068-021-01892-3

Harun, J., Labosky, P., 1985. Chemical constituents of five northeastern barks. Wood Fiber Science. 17, 274-280.

Hegde, M. M., Lakshman, K., 2023. Phyto-pharmacological review of genus Manilkara. International Journal of Herbal Medicine, 11, 1-13. https://doi.org/10.22271/flora.2023.v11.i5a.882

Instituto de Pesquisa Tecnológica do Estado de São Paulo, 2023. Informações sobre madeiras. https://madeiras.ipt.br/tatajuba/ (Accessed 28 January 2023)

Ioannidou, S. M., Pateraki, C., Ladakis, D., Papapostolou, H., Tsakona, M., Vlysidis, A., Kookos, I. K., Koutinas, A., 2020. Sustainable production of bio-based chemicals and polymers via integrated biomass refining and bioprocessing in a circular bioeconomy context. Bioresource technology, 307, 123093. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.123093

Justo, A.P., Dantas, E.L., Bau, M., Freitas-Silva, F.H., Santos, R.V., Schorscher, J.H.D., 2020. Paleobasinal to band-scale REE+ Y distribution in iron formations from Carajás, Amazon Craton, Brazil. Ore Geology Reviews. 127, 103750. https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2020.103750

Karle, P. P., Dhawale, S. C., Navghare, V. V., Shivpuje, S. S., 2021. Optimization of extraction conditions and evaluation of *Manilkara zapota* (L.) P. Royen fruit peel extract for in vitro α-glucosidase enzyme inhibition and free radical scavenging potential. Future Journal of Pharmaceutical Sciences, *7*, 1-10. https://doi.org/10.1186/s43094-021-00305-4

Kemppainen, K., Siika-aho, M., Pattathil, S., Giovando, S., Kruus, K., 2014. Spruce bark as an industrial source of condensed tannins and non-cellulosic sugars. Industrial Crops and Products. 52, 158-168. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2013.10.009

Kim, J.J., Kim, Y.S., Kumar,V., 2019. Heavy metal toxicity: An update of chelating therapeutic strategies. Journal of Trace elements in Medicine and Biology. 54, 226-231. https://doi.org/10.1016/j.jtemb.2019.05.003

Kribs, D.A., 1968. Commercial foreign woods on the American market. Dover Publications, New York.

Laboratório de Produtos Florestais, 2023. *Bagassa guianensis*. https://lpf.florestal.gov.br/pt-br/?option=com_madeirasbrasileiras&view=especieestudada&especieestudadaid=24 (Accessed 20 January 2023)

Le Normand, M., Rietzler, B., Vilaplana, F., Ek, M., 2021. Macromolecular model of the pectic polysaccharides isolated from the bark of Norway spruce (Picea abies). Polymers. 13, 1106. https://doi.org/10.3390/polym13071106

Lee, D. G., Ku, M. J., Kim, K. H., Kim, J. S., Kim, S. M., Jeon, C. H., 2021. Experimental investigation of the ash deposition characteristics of biomass pretreated by ash removal during co-combustion with sub-bituminous coal. Energies, 14, 7391. https://doi.org/10.3390/en14217391

Liang, T., Gan, X.G.R., Yu, J., Qu, S., Xie, Q., Shama, R., Bao, M., Su, H., Liu, B., Borjigidai, A., 2023. *Ardisia gigantifolia* stapf (Primulaceae): A review of ethnobotany, phytochemistry, pharmacology, clinical application, and toxicity. Journal of Ethnopharmacology. 116079. https://doi.org/10.1016/j.jep.2022.116079

Li, H.; Wang, Y.; Xie, W.; Tang, Y.; Yang, F.; Gong, C.; Wang, C.; Li, X.; Li, C, 2023. Preparation and Characterization of Soybean Protein Adhesives Modified with an Environmental-Friendly Tannin-Based Resin. Polymers, 15, 2289. https://doi.org/10.3390/polym15102289

Lima, T.F.P., Almeida, T.H.D., Almeida, D.H.D., Christoforo, A.L., Lahr, F.A.R., 2018. Physical and mechanical properties of Tatajuba wood specie (*Bagassa guianensis*) from two different Brazilian regions. Matéria (Rio de Janeiro). 23, e12185. https://doi.org/10.1590/S1517-707620180003.0519

Maroyi, A., 2018. Syzygium cordatum hochst. Ex krauss: an overview of its ethnobotany, phytochemistry and pharmacological properties. Molecules. 23, 1084. https://doi.org/10.3390/molecules23051084

Malengue, A., Lourenço, A., Patrício, H., Costa, R. A., Quilhó, T., Gominho, J., 2024. Tropical mobola plum (*Parinari Curatellifolia*): a full characterization of wood and bark within the scope of biorefineries. European Journal of Wood and Wood Products, 82, 1021–1035. https://doi.org/10.1007/s00107-024-02074-2

Marques, H. K. O., Figueiredo, M. G. F., de Souza Pio, W. S., Ribeiro, L. M., De Azevedo, I. F. P., Duarte, L. P., Mercadante-Simões, M. O., 2023. Laticifer ontogenesis and the chemical constituents of *Marsdenia zehntneri* (Apocynaceae) latex in a semiarid environment. Planta, 257, 19. https://doi.org/10.1007/s00425-022-04050-7

Medina, M. C., Sousa-Baena, M. S., Prado, E., Acevedo-Rodríguez, P., Dias, P., Demarco, D., 2021. Laticifers in Sapindaceae: structure, evolution and

phylogenetic importance. Frontiers in Plant Science, 11, 612985. https://doi.org/10.3389/fpls.2020.612985

Miranda, B. M., Tovar, B. C. A., Otero, D. M., da Silva, F. A., Scalize, P. S., de Oliveira, T. F., 2024. By-products of Baru and Monguba: A Review of their potential. Food and Humanity, 100477. https://doi.org/10.1016/j.foohum.2024.100477

Mosaffaei, Z., Jahani, A., 2021. Modeling of ash (Fraxinus excelsior) bark thickness in urban forests using artificial neural network (ANN) and regression models. Modeling Earth Systems and Environment, 7, 1443-1452. https://doi.org/10.1007/s40808-020-00869-9

Mota, G.S., Sartori, C.J., Miranda, I., Quilho, T., Mori, F.A., Pereira, H., 2017. Bark anatomy, chemical composition and ethanol-water extract composition of *Anadenanthera peregrina* and *Anadenanthera colubrina*. PloS one. 12, e0189263. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0189263

Mota, G.S., Araujo, E.S., Lorenço, M., de Abreu, J.L.L., Mori, C.L.O., Ferreira, C. A., Silva, M.G., Mori, F.A., Ferreira, G.C., 2021 a. Bark of *Astronium lecointei* Ducke trees from the Amazon: chemical and structural characterization. European Journal of Wood and Wood Products. 79, 1087-1096. https://doi.org/10.1007/s00107-021-01670-w

Mota, G.S., Sartori, C.J., Ribeiro, A.O., Quilhó, T., Miranda, I., Ferreira, G.C., Mori, F.A. Pereira, H., 2021 b. Bark Characterization of *Tachigali guianensis* and *Tachigali glauca* from the Amazon under a Valorization Perspective. BioResources. 16, 2953-2970. https://doi.org/10.15376/biores.16.2.2953-2970

Neiva, D. M., Araujo, S., Gominho, J., Carneiro, A.C., Pereira, H., 2018. Potential of *Eucalyptus globulus* industrial bark as a biorefinery feedstock: Chemical and fuel characterization. Industrial Crops and Products. 123, 262-270. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2018.06.070

Nolan, R.H., Rahmani, S., Samson, S.A., Simpson-Southward, H.M., Boer, M.M., Bradstock, R. A., 2020. Bark attributes determine variation in fire resistance in resprouting tree species. Forest Ecology and Management. 474, 118385. https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118385

Numazawa, C.T., Numazawa, S., Pacca, S., John, V.M., 2017. Logging residues and CO2 of Brazilian Amazon timber: Two case studies of forest harvesting. Resources, Conservation and Recycling. 122, 280-285. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.02.016

Nunes, L.J.R., Matias, J.C.O., Catalão, J.P.S., 2016. Biomass combustion systems: A review on the physical and chemical properties of the ashes. *R*enewable and Sustainable Energy Reviews. 53, 235-242. https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.08.053

Palhares, D., De Paula, J.E., Pereira, L.A.R., Silveira, C.E.S., 2007. Comparative anatomy of the bark of stems, roots and xylopodia of Brosimum gaudichaudii (Moraceae). IAWA journal. 28, 315-324. https://doi.org/10.1163/22941932-90001643

Pereira, H., 1988. Chemical composition and variability of cork from *Quercus suber* L. Wood science and technology. 22, 211-218. https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1007/BF00386015

Pinheiro, W.B.S., Neto, J.P., Botelho, A.S., Dos Santos, K.I.P., Da Silva, G.A., Muribeca, A.J.B., Pamplona, S.G.S.R., Fonseca, S.S.S, Silva, M.N., Arruda, M.S.P., 2022. The use of *Bagassa guianensis* aubl. forestry waste as an alternative for obtaining bioproducts and bioactive compounds. Arabian Journal of Chemistry. 15, 103813. https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2022.103813

Quilhó, T., Pereira, H., Richter, H. G., 2000. Within–tree variation in phloem cell dimensions and proportions in *Eucalyptus globulus*. IAWA journal. 21, 31-40.

Rains, M. K., Caron, C., Regan, S., Molina, I., 2022. Chemical and molecular characterization of wound-induced suberization in poplar (Populus alba× P. tremula) stem bark. Plants, 11, 1143. https://doi.org/10.3390/plants11091143

Rodrigues, F.A.M., Giffony, P.S., dos Santos, S.B., Guedes, J.A., Ribeiro, M.E.N., Araújo, T.G.D., Da Silva, L.M.R., Zocolo, G.J., Ricardo, N.M., 2021. Spondias purpurea L. stem bark extract: Antioxidant and in vitro photoprotective activities. Journal of the Brazilian Chemical Society. *32*, 1918-1930. https://doi.org/10.21577/0103-5053.20210082

Sandberg, M., Frodeson, S., Brunzell, L., Tumuluru, J. S., 2024. Forest Industrial Waste Materials Upgraded to Fertilizer Pellets for Forest Soil. Sustainability, 16 , 2868. https://doi.org/10.3390/su16072868

Santos, M.G.S., Silva, T.C., da Costa, R.R., Barbosa, J.P.F., Dos Santos, A.F., 2021. Analysis of the phytochemical prospecting of the species *Ziziphus cotinifolia* Reissek. Diversitas Journal. 6, 2839-2858. https://doi.org/10.17648/diversitas-journal-v6i2-1074

Sartori, C. J., Mota, G. S., Mori, F. A., Miranda, I., Quilho, T., Pereira, H., 2021. Bark characterization of a commercial *Eucalyptus urophylla* hybrid clone in view of its potential use as a biorefinery raw material. Biomass Conversion and Biorefinery. 12, 1541-553. https://doi.org/10.1007/s13399-020-01199-7

Sartori, C., da Silva Mota, G., Ferreira, J., Miranda, I., Mori, F. A., Pereira, H., 2016. Chemical characterization of the bark of *Eucalyptus urophylla* hybrids in view of their valorization in biorefineries. Holzforschung. 70, 819-828. https://doi.org/10.1515/hf-2015-0258

Şen, A., Miranda, I., Santos, S., Graça, J., Pereira, H., 2010. The chemical composition of cork and phloem in the rhytidome of *Quercus cerris* bark. Industrial Crops and Products. 31, 417-422. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2010.01.002

Şen, A. U., Simões, R., Yücedağ, C., Quilhó, T., Sousa, V., Miranda, I., Fernandes, A., Pereira, H., 2024. Bark-based biorefineries: anatomical and chemical characterization of the bark of endemic *Quercus vulcanica* of Turkey. Wood Science and Technology, 58, 333-355. https://doi.org/10.1007/s00226-023-01518-x

Shtein, I., Gričar, J., Lev-Yadun, S., Oskolski, A., Pace, M. R., Rosell, J. A., Crivellaro, A., 2023. Priorities for bark anatomical research: study venues and

open questions. Plants, 12, 1985. https://doi.org/10.3390/plants12101985

Sillero, L., Prado, R., Welton, T., Labidi, J., 2021a. Energy and environmental analysis of flavonoids extraction from bark using alternative solvents. Journal of Cleaner Production, 308, 127286. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.126151

Sillero, L., Prado, R., Welton, T., Labidi, J., 2021b. Extraction of flavonoid compounds from bark using sustainable deep eutectic solvents. Sustainable Chemistry and Pharmacy. 24, 100544. https://doi.org/10.1016/j.scp.2021.100544

Singleton, V.L., Rossi, J.A., 1965. Colorimetry of total phenolics with phosphomolybdic-phosphotungstic acid reagents. American journal of Enology and Viticulture, 16, 144-158. https://doi.org/10.5344/ajev.1965.16.3.144

Sousa, T.B., Mota, G.D.S., Araujo, E.D.S., Carréra, J.C., Silva, E.P., Souza, S.G., Lourenço, M.S., Mori, F.A., 2022. Chemical and structural characterization of *Myracrodruon urundeuva* barks aiming at their potential use and elaboration of a sustainable management plan. Biomass Conversion and Biorefinery. 12, 1583-1593. https://doi.org/10.1007/s13399-020-01093-2

Sousa, V., Miranda, I., Quilhó, T., Pereira, H., 2023. The Diversity of Wood and Non-Wood Forest Products: Anatomical, Physical, and Chemical Properties, and Potential Applications. Forests, 14, 1988. https://doi.org/10.3390/f14101988

Stefanowicz, A. M., Kapusta, P., Stanek, M., Frąc, M., Oszust, K., Woch, M. W., Zubek, S., 2021. Invasive plant Reynoutria japonica produces large amounts of phenolic compounds and reduces the biomass but not activity of soil microbial communities. Science of the Total Environment, 767, 145439. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.145439

Rietzler, B., Karlsson, M., Kwan, I., Lawoko, M., Ek, M., 2022. Fundamental insights on the physical and chemical properties of organosolv lignin from Norway spruce bark. Biomacromolecules, 23, 3349-3358. https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.biomac.2c00457

Tavares, C. S., Martins, A., Miguel, M. G., Carvalheiro, F., Duarte, L. C., Gameiro, J. A., Figueiredo, A. C., Roseiro, L. B., 2020. Bioproducts from forest biomass II. Bioactive compounds from the steam-distillation by-products of Cupressus lusitanica Mill. and Cistus ladanifer L. wastes. Industrial Crops and Products, 158, 112991. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2020.112991

Ullah, A., Munir, S., Badshah, S.L., Khan, N., Ghani, L., Poulson, B.G., Jaremko, M., 2020. Important flavonoids and their role as a therapeutic agent. Molecules. 25, 5243. https://doi.org/10.3390/molecules25225243

Vangeel, T., Neiva, D.M., Quilho, T., Costa, R.A., Sousa, V., Sels, B.F., Pereira, H., 2021. Tree bark characterization envisioning an integrated use in a biorefinery. Biomass Conversion and Biorefinery. 13, 2029-2043. https://doi.org/10.1007/s13399-021-01362-8

Velvizhi, G., Balakumar, K., Shetti, N.P., Ahmad, E., Pant, K.K., Aminabhavi, T.M., 2022. Integrated biorefinery processes for conversion of lignocellulosic biomass to value added materials: Paving a path towards circular economy. Bioresource technology, 343, 126151.

https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.126151

Viana, H. N. A. C., Sganzerla, W. G., Castro, L. E. N., de Lima Veeck, A. P., 2023. Characterization of baru (*Dipteryx alata* Vog.) and application of its agro-industrial by-product in the formulation of cookies. Journal of Agriculture and Food Research, 12, 100577. https://doi.org/10.1016/j.jafr.2023.100577

Watak, S., Patil, S.S., 2012. Formation and Evaluation of Herbomineral Complex. *A*sian Journal of Pharmaceutical Analysis. 2, 2231-5667.

Yao, L., Yang, H., Meng, X., Ragauskas, A. J., 2022. Toward a fundamental understanding of the role of lignin in the biorefinery process. Frontiers in Energy Research, 9, 804086. https://doi.org/10.3389/fenrg.2021.804086

Zhu, Q., Liu, Y., Wu, Y., Guo, L., 2024. Variation and Driving Mechanisms of Bark Thickness in Larix gmelinii under Surface Fire Regimes. Forests, 15, 96. https://doi.org/10.3390/f15010096

Yu, O., Kim, K.H., 2020. Lignin to materials: A focused review on recent novel lignin applications. Applied Sciences. 10, 4626. https://doi.org/10.3390/app10134626

Zhishen, J., Mengcheng, T., Jianming, W., 1999. The determination of flavonoid contents in mulberry and their scavenging effects on superoxide radicals. Food chemistry, 64, 555-559. https://doi.org/10.1016/S0308-8146(98)00102-2

CAPÍTULO 3

(ARTIGO 2) - NÃO PUBLICADO

CASCAS DE ÁRVORES DA AMAZÔNIA COMO MATÉRIA-PRIMA RENOVÁVEL: CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA E APLICAÇÕES INDUSTRIAIS

[2] O artigo está de acordo com as normas da revista **Industrial Crops and Products**, à qual será submetido.

Resumo

Os resíduos florestais constituem uma matéria-prima com grande potencial para aplicações em processos industriais sustentáveis, especialmente no contexto de biorrefinarias e valorização integral da biomassa. Este estudo teve como objetivo caracterizar as propriedades morfoestruturais, químicas e o potencial bioativo das cascas de duas espécies arbóreas da Amazônia, visando avaliar sua viabilidade para aplicações industriais sustentáveis. As amostras de casca foram coletadas em uma área de Manejo Florestal Sustentável em Dom Eliseu, Pará, Brasil, e submetidas a análises anatômicas, químicas, histoquímicas e de composição elementar. Os resultados anatômicos evidenciaram diferenças estruturais entre as espécies, associadas à organização do floema e do ritidoma, refletindo padrões morfofuncionais distintos. A casca de *Manilkara elata* apresentou elevado teor de extrativos solúveis em etanol e água (59,60%), bem como altos teores de compostos fenólicos (143,81 mg g^{-1} GAE), sugerindo potencial antioxidante, enquanto a casca de *Dipteryx odorata* se destacou pelo elevado conteúdo de polissacarídeos (56,30%) e lignina (23,30%). A análise elementar indicou composição mineral relevante em ambas as espécies, com destaque para o cálcio (5,60–8,83 g kg^{-1}), enquanto a análise por absorção atômica revelou ausência de contaminação por metais potencialmente tóxicos (Pb, Ni, Cr e Cd). De forma integrada, os resultados demonstram que as cascas de *M. elata* e *D. odorata* constituem matérias-primas promissoras para incorporação em processos de biorrefinaria, com potencial para a obtenção de compostos de alto valor agregado e aproveitamento sustentável de resíduos florestais.

Palavras-chave: Biomassa florestal, Biorrefinaria, Valorização de resíduos.

1. Introdução

O bioma Amazônia abriga a maior floresta tropical do mundo e ocupa aproximadamente 49,3% do território brasileiro (MMA, 2022; SUDAM, 2022). Além de sua relevância ecológica, a região exerce papel estratégico no contexto socioeconômico nacional, sobretudo no que se refere ao uso e à conservação dos recursos florestais (Da Silva et al., 2024).

Nesse cenário, o Manejo Florestal Sustentável, torna-se uma alternativa economicamente viável, a qual contribui para a conservação da floresta e para o uso racional dos recursos (Oliveira et al., 2024; Lima, 2021). No entanto,

mesmo sob sistemas de manejo, a exploração florestal na Amazônia ainda permanece centrada na produção de madeira (EMBRAPA, 2025; IMAZON, 2020). Como consequência, uma parcela significativa dos produtos não madeireiros, que representam até 35% do volume total explorado, é frequentemente descartados ou subutilizados, sendo tratados como resíduos da atividade (Amorim et al., 2021).

Entre os produtos não madeireiros, destaca-se a casca do caule. Que apesar da importância, as pesquisas sobre o potencial de utilização das cascas de espécies amazônicas ainda se encontram em estágio inicial (Souza et al., 2025). Essa lacuna de conhecimento limita a valorização integral da biomassa da amazônia e dificulta a implementação de estratégias eficientes de aproveitamento de resíduos, especialmente em biorrefinarias (Sen et al., 2025, Vangeel et al., 2023).

Diante disso, evidencia-se a necessidade de ampliar o conhecimento científico sobre as cascas de espécies da amazônia, uma vez que, a compreensão de suas características tecnológicas é fundamental para valorizar o material como fonte renovável de compostos naturais (Ranganathan et al., 2025; Bridson et al., 2024). Além disso, a caracterização detalhada das cascas fornece subsídios relevantes para o manejo florestal sustentável, uma vez que a retirada controlada da periderme permite a regeneração da casca e a coleta do floema pode ser realizada de forma não destrutiva, sem comprometer a sobrevivência das árvores (Caglayan et al., 2025; Araújo et al., 2025). O aperfeiçoamento de técnicas de extração possibilita a utilização não destrutiva desses recursos, aumentando a viabilidade econômica e ecológica do manejo (Singh et al., 2025).

Assim, a crescente demanda por matérias-primas renováveis, aliada à necessidade de reduzir o desperdício de biomassa florestal proveniente de atividades de manejo, reforça a importância de pesquisas voltadas à caracterização tecnológica das cascas. Nesse contexto, o objetivo deste trabalho foi investigar as propriedades morfoestruturais, químicas o potencial bioativo das cascas de duas espécies arbóreas da Amazônia, com o propósito de avaliar seu potencial de aplicação em processos industriais sustentáveis.

2. Materiais e métodos

2.1 Área do estudo

O estudo foi realizado na Fazenda Gênesis-Salém, uma área de Manejo Florestal Sustentável localizada no município de Dom Eliseu, no sudeste do estado do Pará, Brasil (Figura 1). A vegetação predominante na região é a floresta ombrófila densa (Veloso, 1991). O clima local é classificado como tropical úmido, com temperatura média anual de aproximadamente 25 °C, a precipitação média anual é de 1638 mm, e a altitude da área é de 247 metros (Hijmans et al. 2005).

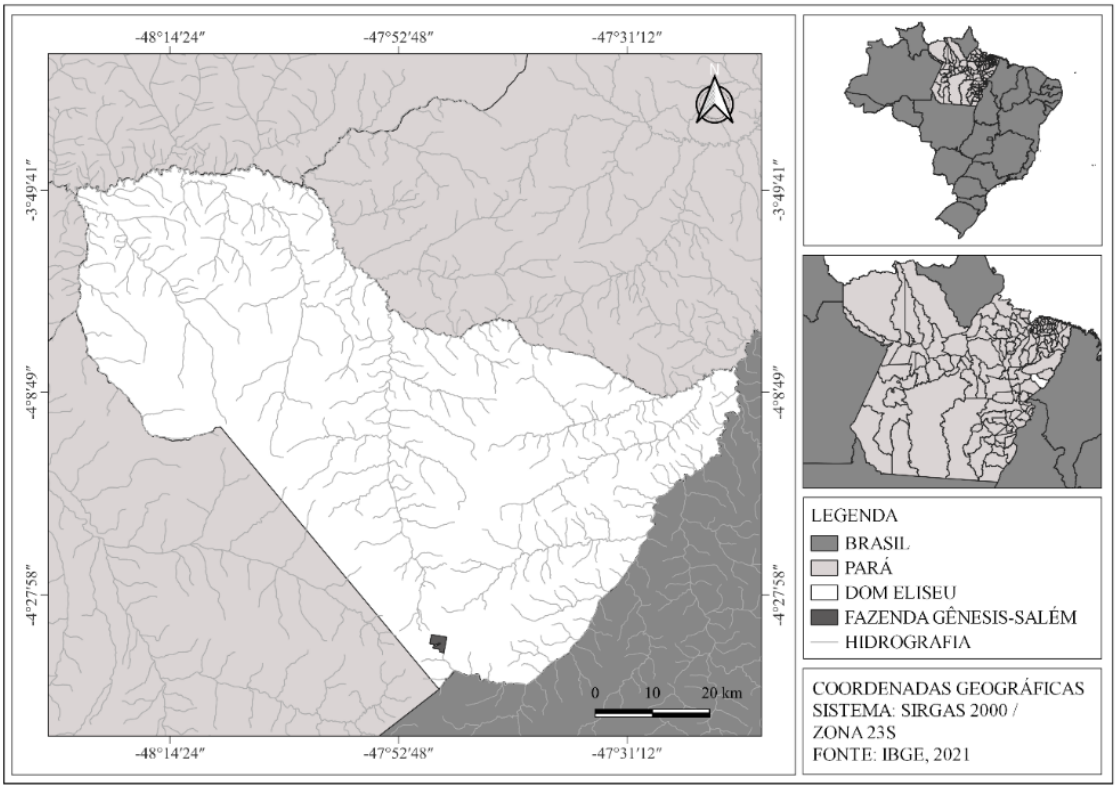


Figura 1. Mapa de localização da área de coleta do estudo
Fonte: Autora, 2025.

2.2 Amostragem

Foram coletadas as cascas do caule das espécies *Manilkara elata* (Allemão ex Miq.) Monach. e *Dipteryx odorata* (Aubl.) Forsyth F. As espécies foram selecionadas com base na lista do Inventário Florestal disponibilizada pelo Grupo Arboris. Para cada espécie, foram coletadas amostras de casca de cinco indivíduos. De cada indivíduo, foram removidas 10 amostras com dimensões de 10 cm de comprimento por 5 cm de largura. Todas as espécies selecionadas tem diâmetro à altura do peito (DAP) superior a 40 cm. Foram adotadas técnicas que minimizem os impactos nas plantas e, após a remoção da casca, foi aplicada a calda bordalesa (mistura de sulfato de cobre e cal) para auxiliar no processo de regeneração.

2.3 Analise anatômica

Para a análise macroscópica, as amostras foram seccionadas e as superfícies da seção transversal foram polidas com uma sequência de lixas com granulometrias de 80, 120, 320, 600 e 1200. Foram obtidas fotomacrografias da superfície transversal das cascas para observar o ritidoma, a periderme e o floema condutor no estereomicroscópio (aumentos de 10–20x) de luz Leipzig GZ 800 APO (Leipzig, Alemanha), conectado a uma câmera digital de Leipzig.

Para a análise microscópica, as cascas foram impregnadas com uma solução composta por polietilenoglicol (PEG) 1500 e água destilada. Em um becker de 1 L, foram adicionados 200 mL de PEG e 800 mL de água destilada. A mistura foi levada à estufa a 60 °C, onde o processo de impregnação das amostras ocorreu gradualmente até que toda a água evapore completamente. Após esse procedimento, as amostras impregnadas foram transferidas para um becker limpo contendo PEG puro. Nesse estágio, foi aplicado vácuo às amostras para melhorar a eficiência do processo de impregnação, conforme descrito por Barbosa et al. (2010).

Foram realizados cortes histológicos nas seções transversal, radial e tangencial, com espessura variando entre 12 e 20 µm. Os cortes foram obtidos utilizando um micrótomo de deslize Leica SM 2010R (Leica, Biosystems, Wetzlar, Alemanha). Para evitar danos ou rasgos durante a confecção dos cortes histológicos, foi utilizada espuma de poliestireno como suporte. Os cortes foram corados com uma solução de azul de astra e safranina (safrablau). Em seguida, o material foi desidratado gradualmente em uma série alcoólica crescente (20%, 40%, 60%, 80% e 100%), finalizando com desidratação em acetato de n-butila a 100%. Após esse processo, as lâminas permanentes foram montadas com resina sintética (Entellan).

Pequenos fragmentos das cascas interna e externa foram removidos e macerados em uma solução de ácido acético glacial e peróxido de hidrogênio (1:1), mantida a 60 °C por 48 horas, conforme descrito por Franklin (1945). O material macerado foi corado com azul de astra e safranina, e as lâminas semipermanentes foram montadas em glicerina. As observações microscópicas e a aquisição de dados foram realizadas em um microscópio de luz ZEISS Primo Star HAL/LED (Carl Zeiss, Oberkochen, Alemanha). A descrição seguiu a terminologia proposta por Angyalossy et al. (2016).

2.4 Densidade da casca

A densidade básica da casca foi determinada em cinco réplicas por imersão em água, utilizando a massa seca em estufa e o volume verde saturado de acordo com as normas TAPPI (258 om-02, 2002).

2.5 Caracterização da química somativa da casca

As cascas secas da espécie foram reduzidas em moinho martelo para obter um material homogêneo com granulometria de 60 mesh para as análises químicas, e então quantificação de extrativos totais, suberina, cinzas e lignina total. Os extrativos totais foram quantificados de acordo com as normas TAPPI (T 204 om-88 e T207 om-93), Suberina (Pereira, 1988), Cinzas (TAPPI T211 om-93), Lignina de Klason (TAPPI T222 om-88) e Lignina Solúvel (TAPPI UM 250). Os polissacarídeos foram determinados por diferença.

2.6 Conteúdo fenólico dos extratos das cascas

Amostras de 0,50 g da casca (base seca) foram extraídas em quatro soluções distintas, dentre elas estão, extração em Água, Água/Etanol 1:1 (v/v), Água/Metanol 1:1 (v/v), Água/Acetona 1:1 (v/v), a qual foi utilizado o banho ultrassônico a 50ºC durante 60 min. A solução foi filtrada em cadinho de vidro sinterizado nº 2 e o filtrado teve seu volume completado para 50 mL com água deionizada. O resíduo sólido retido na filtração foi seco e o rendimento de extração calculado com relação à massa do material inicial. Do extrato foi determinado os teores de fenóis totais, flavonoides totais e taninos condensados a partir da leitura de absorbâncias em espectrofotômetro biospectro SP-22. O teor de fenóis totais foi determinado pelo método Folin-Ciocalteau utilizando ácido gálico como padrão (Singleton & Rossi, 1965) e seu resultado foi expresso em mg de equivalentes de ácido gálico (GAE) / g de extrato seco da casca. Os flavonoides totais foram quantificados por ensaio colorimétrico de cloreto de alumínio com padrão de catequina (Zhishen et al 1999) e os taninos condensados pelo método de vanilina com ácido sulfúrico (Abdalla et al 2017). Ambos os resultados foram expressos em mg de equivalentes de catequina (CE)/g de extrato da casca.

2.7 Analise de Histoquímica

Os cortes histológicos foram confeccionados utilizando um micrótomo de deslize Leica SM 2010R (Leica, Biosystems, Wetzlar, Alemanha). As amostras foram submetidas a diferentes testes histoquímicos para identificação de

compostos específicos, conforme descrito a seguir:

1 - Lugol: identificação de amido (Johansen, 1940).

2 - Sudan III e IV: identificação de suberina (Pearse, 1980).

3 - Cloreto Férrico: detecção de compostos fenólicos (Johansen, 1940).

4 - Cloreto de Alumínio: identificação de flavonoides (Mace; Howell, 1974).

5 - Vanilina Clorídrica: detecção de taninos (Mace; Howell, 1974).

6 - Reagente de Wagner: identificação de alcaloides (Svendsen; Verpoorte, 1983).

7 - Floroglucinol acidificado: detecção de lignina (Johansen, 1940).

2.8 Análise dos inorgânicos presente na casca

As cascas foram moídas, e as partículas que passaram por peneira de 60 mesh foram utilizadas. Para cada espécie, foi preparada uma amostra composta de 100 g, obtida a partir da mistura homogênea de material proveniente das cinco árvores amostradas. A composição elementar das cascas (macro- e micronutrientes) foi determinada por espectrometria de emissão óptica com plasma indutivamente acoplado (ICP-OES; Spectro Analytical Instruments, Alemanha), seguindo o procedimento descrito por Araújo et al. (2020). As análises foram realizadas em triplicata analítica para controle instrumental, e os resultados foram interpretados de forma descritiva, uma vez que não houve replicação biológica.

2.9 Análise de absorção atômica

A determinação dos elementos químicos chumbo (Pb), cádmio (Cd), cromo (Cr), cobre (Cu), níquel (Ni), zinco (Zn) e manganês (Mn) foi realizada por espectrometria de absorção atômica de alta resolução com fonte contínua e atomização em chama (HR-CS FAAS). As análises foram conduzidas utilizando um espectrômetro modelo ContrAA 800 (Analytik Jena, Alemanha).

2.10 Análise estatística

Para cada espécie, os efeitos dos solventes de extração sobre os teores de teor de fenóis, teor de taninos e flavonoides foram avaliados separadamente. Variáveis contínuas com distribuição aproximadamente simétrica (teor de fenóis e taninos) foram analisadas por modelos lineares com erros Gaussianos. A normalidade e a homogeneidade dos resíduos desses modelos foram verificadas pelos testes de Shapiro–Wilk e Bartlett ($\alpha = 0,05$). Em contraste, os dados de flavonoides, por apresentarem valores estritamente positivos e assimetria à

direita, foram analisados por modelos lineares generalizados com distribuição Gama. A significância do efeito de solvente foi avaliada por análise de deviance e, quando significativa, as médias marginais estimadas foram comparadas pelo teste de Tukey (α = 0,05). Todas as análises foram realizadas no software R.

3. Resultados

3.1 Anatomia da casca de *Manilkara elata* e *Dipteryx odorata*

A espessura média da casca de *M. elata* é de 18.11 mm (14.44– 20.44 mm). Segundo Carvalho (2010), a casca de espécies desse gênero botânico pode atingir até 20 mm. A casca externa da *Manilkara elata* possui tonalidade marrom-acinzentada, escura ou avermelhada, com superfície do ritidoma marcada por fissuras descontínuas, enquanto a casca interna apresenta coloração vermelha, (**Fig. 2A**). O corte na casca libera um látex branco e abundante, com gotas irregulares e pegajosas **(Fig. 2B)**. As cascas incluem floema (condutor e não condutor) e ritidoma (**Fig. 2C**).

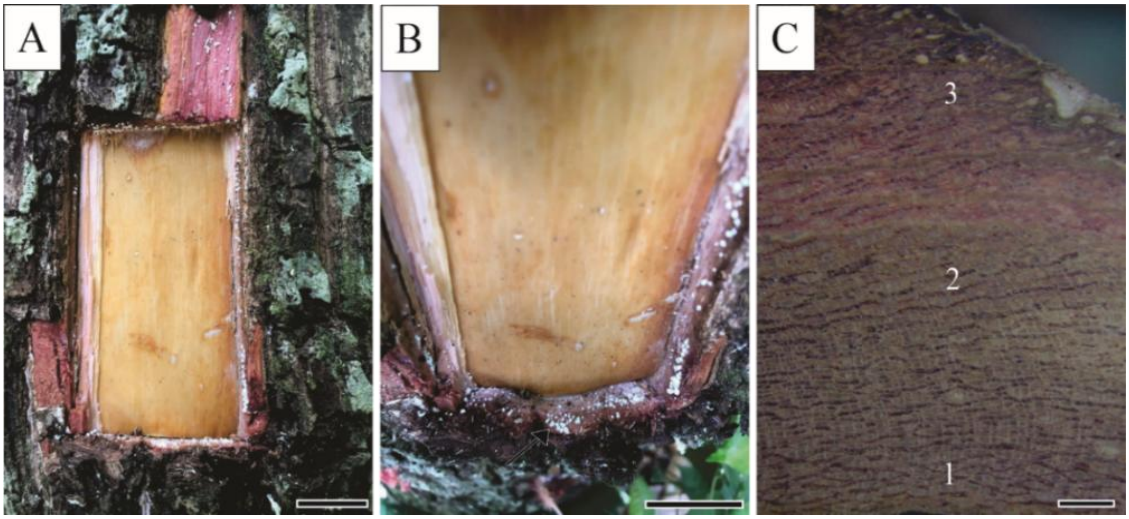


Figura 2. Aspectos macroscópicos da casca de *Manilkara elata* (A), exsudação de látex (B), Seção transversal macroscópica da casca (C) (1) floema condutor, (2) floema não condutor e (3) ritidoma. Barra de escala: (A-B) = 25 mm; (C)= 100 µm.

A estrutura anatômica externa da casca é caracterizada por múltiplas peridermes sequenciais, com pelo menos oito camadas identificadas nas amostras estudadas. As peridermes são bem desenvolvidas e formam um padrão de ritidoma reticulado, no qual se observa floema morto intercalado entre as camadas peridérmicas (**Fig. 3A**). Células secretoras estão presentes e muitas células exibem conteúdos celulares evidentes, indicativos de acúmulo de compostos específicos. Destaca-se ainda a presença abundante de células esclerificadas O felema exibe o arranjo radial característico das células

derivadas do felogênio, com organização compacta e ausência de espaços intercelulares. A feloderme, por sua vez, é delgada, constituída por 1 a 3 camadas celulares (**Fig. 3A**).

Na casca interna, a transição entre os dois tipos de floema é gradual (**Fig. 3B**). Células secretoras foram observadas em toda extensão do floema condutor e não condutor, com conteúdo no lúmen, possivelmente de mucilagem (**Figs. 3B-3D**). No floema condutor, os elementos do tubo são túrgidos com placa crivada composta e estão acompanhados por pequenas células companheiras, distribuídos em grupos aglomerados (**Fig**. **3B e 3E; 4B**).

No floema não condutor, ocorre o colapso dos elementos crivados, acompanhado pelo desenvolvimento do tecido de dilatação, resultante da divisão e expansão das células do parênquima axial e da expansão do parênquima radial (**Fig. 3B–C**). Os raios de *M. elata* são compostos por raios multisseriados (com 2–3 células de largura) e são formados por células procumbentes e quadradas, sendo que, ocasionalmente, algumas células apresentam esclerificação (**Fig. 3F–G**). Foram observados no floema, fibras e outras células esclerenquimáticas, como fibras-esclereides e esclereides **(Figs. 3C-D e 4D-4F).**

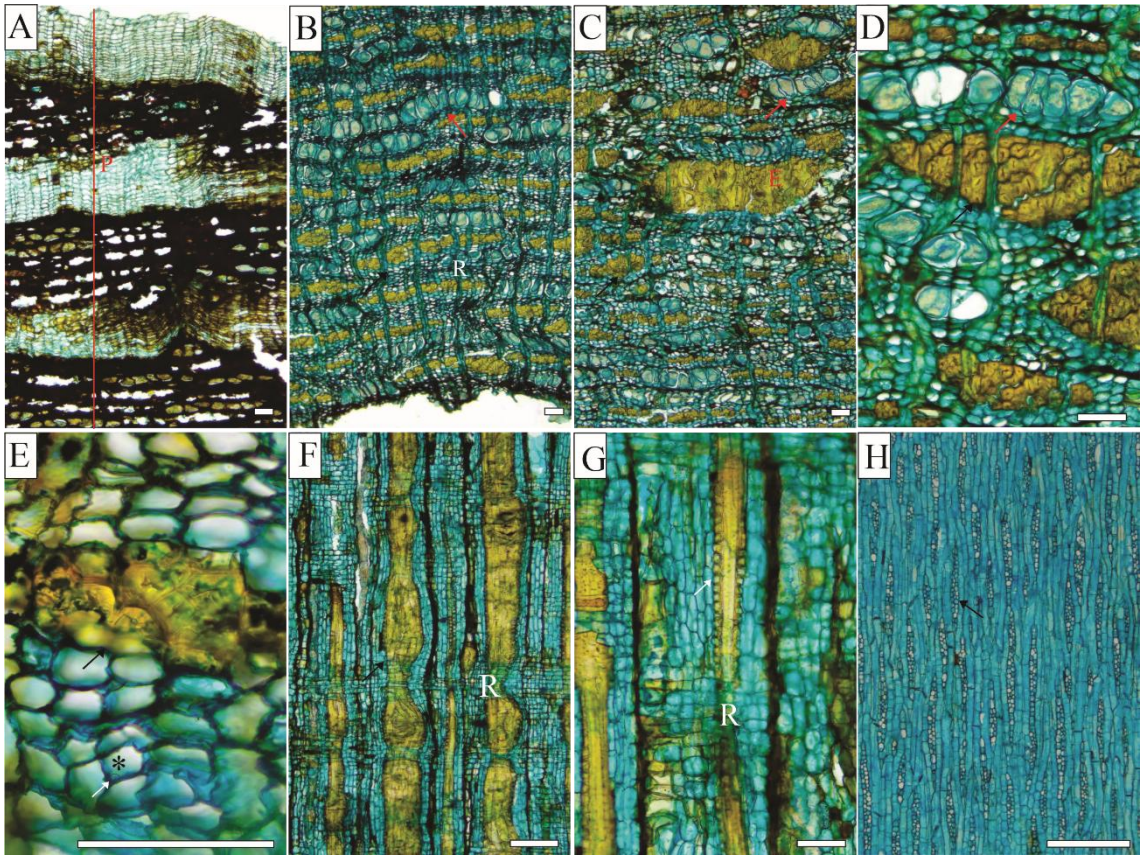
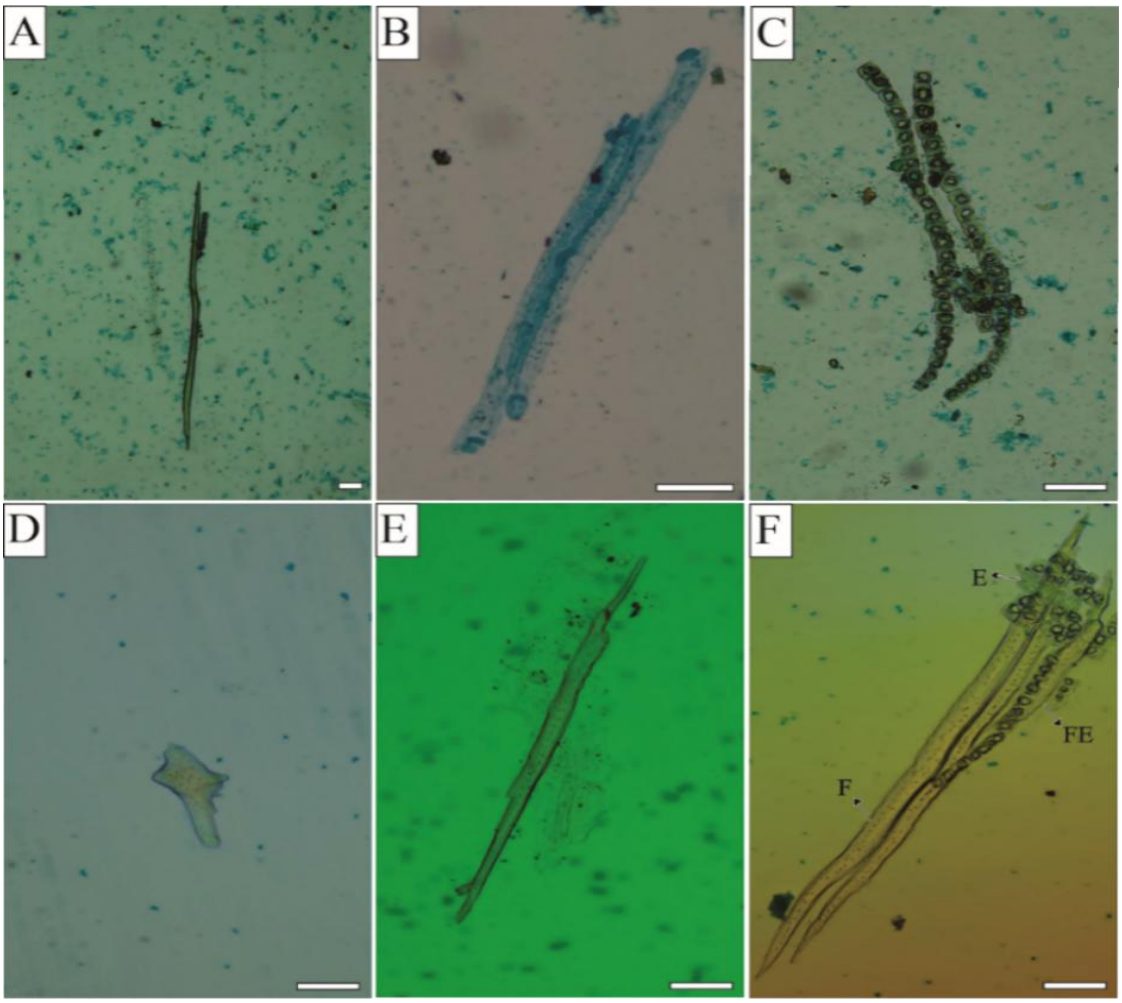


Figura 3. Estrutura anatômica da casca de *Manilkara elata*. Secção transversal: (A) peridermes sequenciais (Pr). (B-D) Delimitação do floema condutor e não condutor, evidenciando células de raio (R), Parênquima (P), estrutura secretora

(seta vermelha), fibras (seta preta), esclereídes (E), elemento de tubo (*) e células companheiras (seta branca). Secção longitudinal radial (F-G) evidenciando os raios (R) e critais de oxalato observado dentro das células de parênquima axial (seta branca). Secção longitudinal tangencial (H) células de raio (R). Barra de escala (A-I) 100 µm.

Cristais de oxalato de cálcio foram observados dentro nas células de



parênquima axial e organizados em câmaras (**Fig. 4C).**

Figura 4. Anatomia microscópica do material macerado. Células da casca: fibra (A), elemento de tubo (B), cristais de oxalato em câmaras (C), esclereides (D), fibra-esclereídes (E), (E) esclereides, (F) fibras (FE) fibra-esclereídes. Barra de escala (A-F) 100 µm.

A espessura média da casca de *D. odorata* é de 9.34 mm (6.16 – 12.01 mm). Segundo Roth (1981) e carvalho (2010), a casca de espécies desse gênero botânico pode atingir até 15 mm. A casca externa da *Dipteryx odorata* possui tonalidade amarelo, cinza e também bege, e forma placas que se desprendem com facilidade, enquanto a casca interna apresenta coloração laranja-escura. (**Fig. 5A**). O corte na casca libera uma resina vermelha-escura e translúcida (**Fig. 5B**). As cascas incluem floema (condutor e não condutor) e ritidoma (**Fig. 5C**).

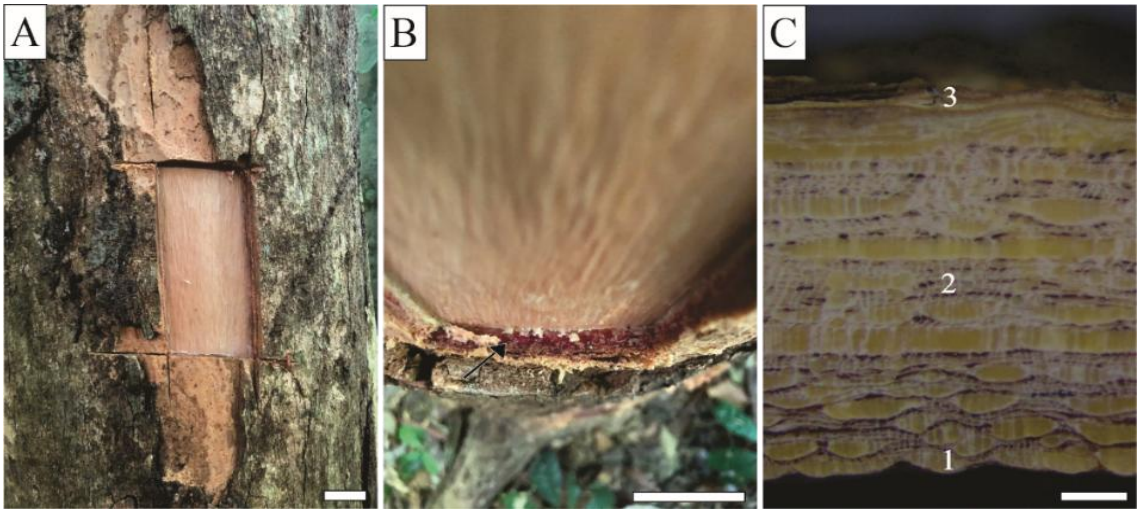


Figura 5. Aspectos macroscópica da casca de *Dipteryx odorata* (A), resina vermelha exsudada (B), Sessão transversal macroscópica da casca (C) (1) floema condutor, (2) floema não condutor e (3) ritidoma. Barra de escala (A-B) 25 mm (C)= 100 µm.

A estrutura anatômica externa da casca foi composta por duas peridermes sequenciais (**Fig. 6A**). O felema apresenta células com espessamentos de parede em forma de U, além da presença de células pheloides e células não suberizadas, com potencial para apresentar paredes espessas e se diferenciar em esclereides. A feloderme é formada por 1 a 2 camadas de células de paredes finas (**Fig. 6A**).

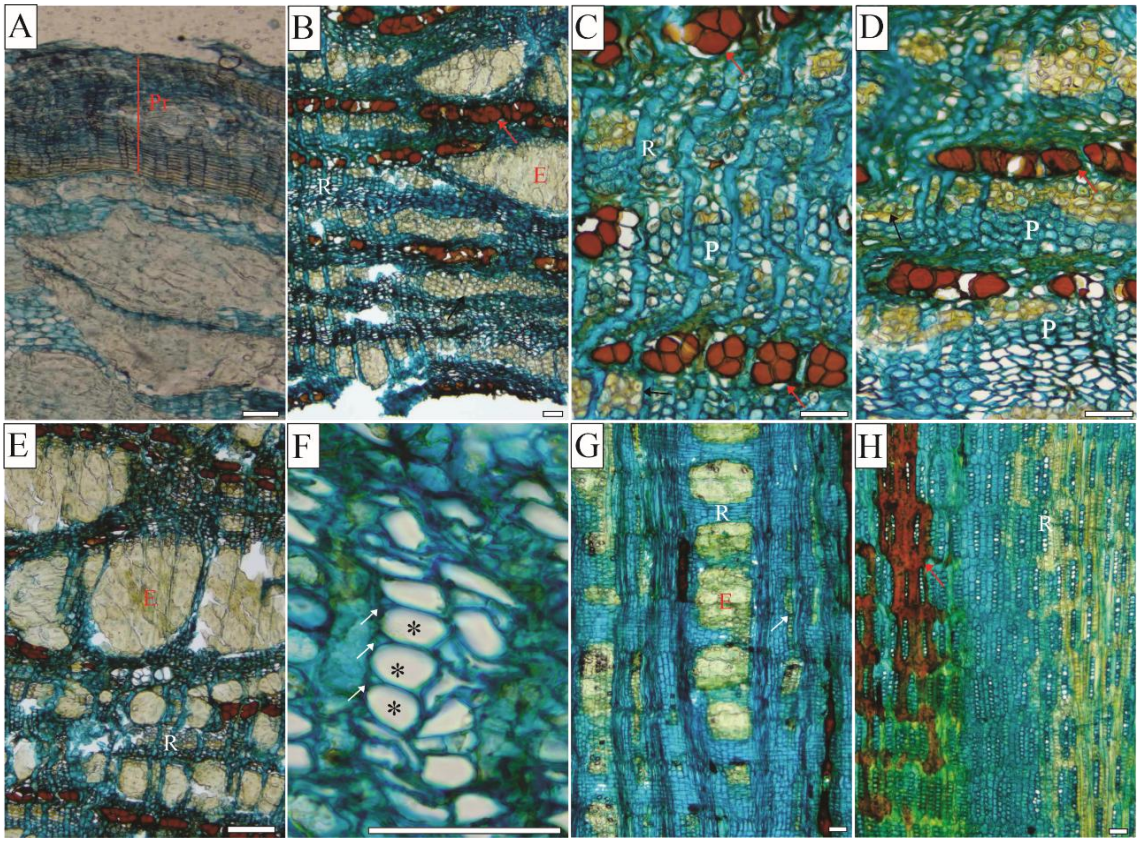


Figura 6. Estrutura anatômica da casca de *Dipteryx odorata*. Secção transversal (A) peridermes (P), (B-E) Delimitação do floema condutor e não condutor, evidenciando células de raio (R), estrutura secretora (seta vermelha), fibras (seta preta), esclereídes (E), parênquima (P), elemento de tubo (*) e células companheiras (seta branca). Secção longitudinal radial (G) evidenciando os raios (R), esclereides (E) e critais de oxalato observado dentro das células de parênquima axial (seta branca). Secção longitudinal tangencial (H) células de raio (R), estruturas secretoras (seta vermelha) e cristais (seta branca). Barra de escala (A-I) 100 µm.

Na casca interna de *D. Odorata*, a transição entre os dois tipos de floema é abrupta, marcada pelo colapso dos elementos de tubo crivados, acompanhado pelo desenvolvimento de células esclereídes (**Fig.6B**). O fenômeno de dilatação decorre da divisão e subsequente expansão das células do parênquima axial, constituindo uma resposta adaptativa ao crescimento radial do caule (Angyalossy et al., 2016). Células secretoras foram observadas ao longo de toda extensão do floema condutor e não condutor, assemelhando-se com células taníferas (**Figs.6B-D**). No floema condutor, os elementos do tubo crivado apresentam-se túrgidos e são acompanhados por pequenas células companheiras, distribuídos em grupos radiais (**Fig**. **6F e 7B**).

Foram observados no floema, fibras, e agrupamentos de células esclereídes dispersas por toda a extensão do floema não condutor **(Figs. 6B-E e 7D).**

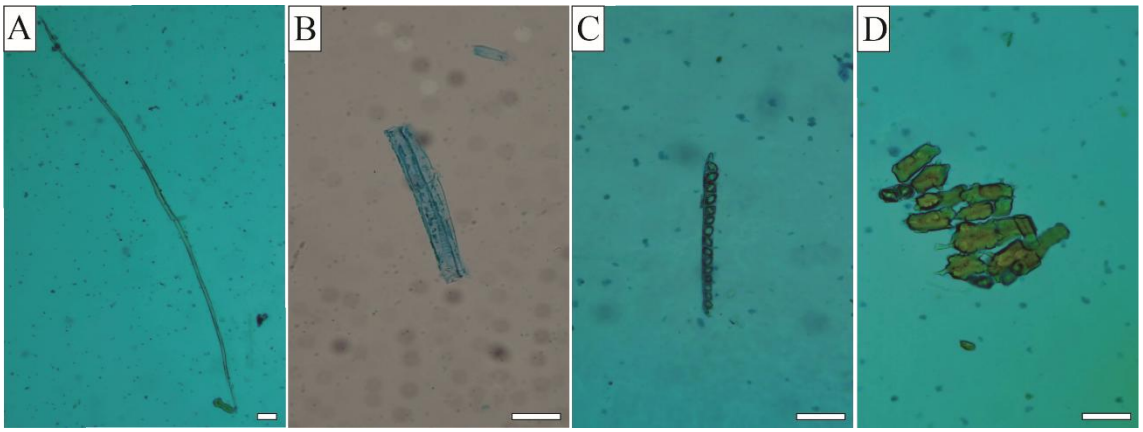


Figura 7. Anatomia microscópica do material macerado. Células da casca: fibra (A), elemento de tubo (B), cristais de olaxato (C), esclereides (D). Barra de escala (A-D) 100 µm.

Os raios de *D. odorata* são estratificados, compostos por células unisseriadas e bisseriadas (**Figs. 6H-I**). A qual são formados por células procumbentes e quadradas (**Fig. 6G**). Cristais de oxalato de cálcio foram observados aderidos às células do parênquima axial (**Fig. 6G-H e 7C**).

A Tabela 1 apresenta as características quantitativas da estrutura e das células da casca, englobando parâmetros anatômicos macroscópicos e microscópicos.

Tabela 1. Quantificação das estruturas e células presentes na casca das espécies.

Características	**Macroscópica (mm)**	**Microscópica (µm)**						
Espécies	**EC**	**CF**	**CET**	**LF**	**LLF**	**PF**	**DET**	**AR**	**LR**
Dipteryx odorata	9.34 ±2.23	1,637.73 ±237.69	313.71 ±38.70	21.82 ±5.22	6.52 ±1.64	7.65 ±2.22	34.94 ±4.07	214.65 ±38.64	20.77 ±5.37
Manilkara elata	18.11 ±2.04	1,150.74 ±194.90	312.72 ±67.50	27.31 ±5.85	2.48 ±1.01	12.43 ±2.84	34.56 ±3.55	352.74 ±127.44	37.45 ±8.95

Características quantitativas da estrutura e das células da casca. As características anatômicas foram divididas em macroscópicas e microscópicas: espessura da casca (EC); comprimento da fibra (CF); comprimento do elemento de tubo (CET); largura da fibra (LF); largura do lúmen da fibra (LLF); espessura da parede da fibra (PF); diâmetro do elemento de tubo (DET); altura do raio (AR); largura do raio (LR).

Com base nos dados anatômicos, observa-se que *Dipteryx odorata* e *Manilkara elata* apresentam diferenças nos parâmetros celulares avaliados, incluindo dimensões e características estruturais das células. Essas diferenças eram esperadas, uma vez que as espécies pertencem a famílias e gêneros botânicos distintos; assim, diferenças nas características genéticas e, consequentemente, nos padrões anatômicos celulares são compatíveis com a divergência taxonômica das espécies.

Como exemplo dessas distinções, destacam-se as diferenças observadas nas peridermes das duas espécies, evidenciadas tanto na análise anatômica microscópica quanto na caracterização quantitativa. Anatomicamente, os tipos de casca diferenciam-se de acordo com a dinâmica de formação da periderme e do ritidoma (Kotina et al., 2018). Em algumas espécies, a atividade sucessiva do felogênio promove o acúmulo de peridermes, o que influencia na formação de ritidomas mais espessos; em outras, o desenvolvimento de camadas de separação na periderme facilita a descamação periódica, oque resulta em ritidomas menos espessos (Shtein et al., 2023). Foi possivel observar que a *M. elata* apresenta peridermes sequenciais, ao passo que a *D. odorata* apresenta processo de descamação, esses fatores genéticos observados nas espécies também influenciam a espessura das cascas. Dessa forma, a caracterização das células do floema secundário e da periderme é essencial, pois auxilia a investigação de atributos anatômicos específicos, e essas informações podem ser fudamental no processo de otimização da conversão da biomassa em produtos de maior valor agregado nos processos industriais (Souza et al., 2025).

3.2 Histoquímica

A análise histoquímica da *Manilkara elata* encontra-se apresentada na Figura 8. Observou-se que a espécie apresentou reação positiva para a presença de amido, suberina, compostos fenólicos, flavonoides, taninos, alcaloides e lignina.

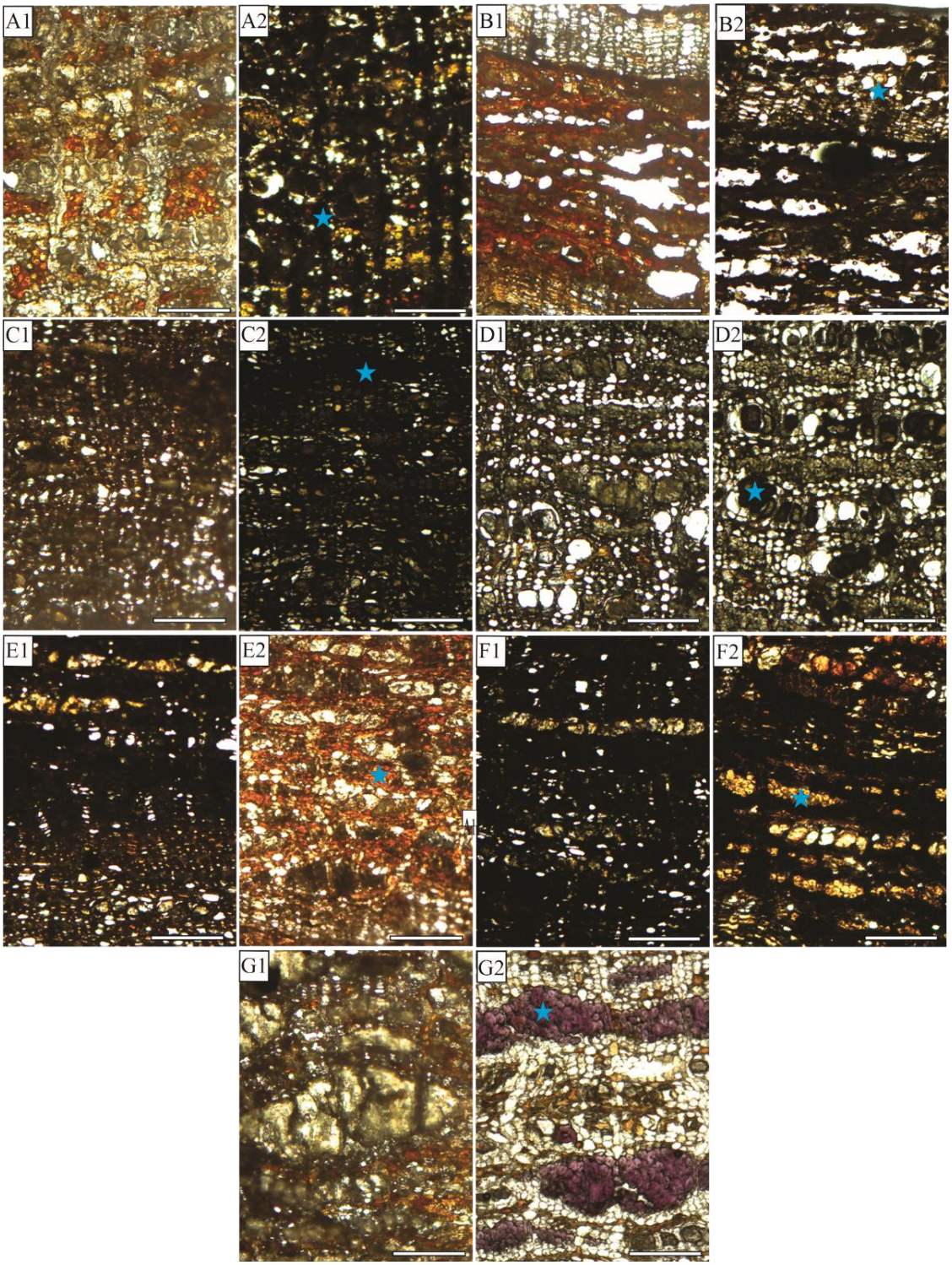


Figura 8. Secções transversais da casca de *Manilkara elata* submetidas a testes histoquímicos. A1-G1 [controle] e A2-G2 [testes histoquímicos], A2 (teste com lugol, detectando amido), B2 (teste com Sudam, detectando suberina), C2 (teste com cloreto férrico, detectando compostos fenólicos), D2 (teste com cloretode alumínio, detectando flavonoides), E2 (teste com vanilina cloridrica, detectando taninos), F2 (teste com reagente de wagner, detectando alcaloides), G2 (teste com floroglucinol acidificado, detectando lignina). Estrelas (exemplos de locais com reação positiva). Barras de escala: 100 µm.

A análise histoquímica da *Dipteryx odorata* encontra-se apresentada na Figura 9. Observou-se que a espécie apresentou reação positiva para a presença de amido, compostos fenólicos, taninos, alcaloides e lignina.

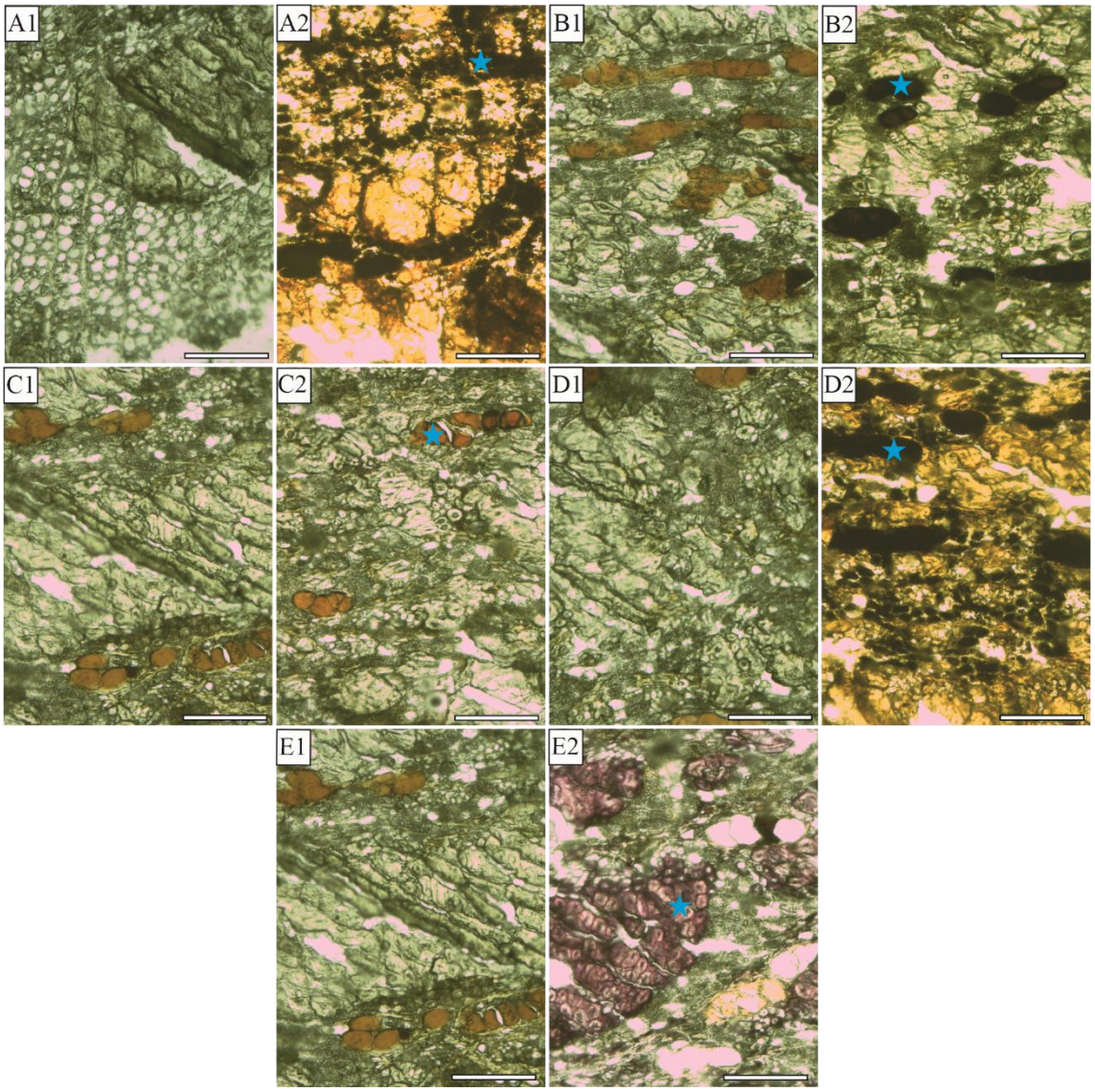


Figura 9. Secções transversais da casca de *Dipteryx odorada* submetidas a testes histoquímicos. A1-E1 [controle] e A2-E2 [testes histoquímicos], A2 (teste com lugol, detectando amido), B2 (teste com cloreto férrico, detectando compostos fenólicos), C2 (teste com vanilina cloridrica, detectando taninos), D2 (teste com reagente de wagner, detectando alcaloides), E2 (teste com floroglucinol acidificado, detectando lignina). Estrelas (exemplos de locais com reação positiva). Barras de escala: 100 µm.

Os resultados dos testes histoquímicos realizados no floema e no ritidoma de *Manilkara elata* e *Dipteryx odorata* estão apresentados na Tabela 2.

Tabela 2. Teste histoquímicos

Parâmetros	*Manilkara elata*		*Dipteryx odorata*	
	Floema	Peridermes	Floema	Peridermes
Amido	+	-	+	-
Suberina	0	+	0	-
Compostos fenólicos	+	+	+	+
Flavonoides	+	+	-	-
Taninos	+	+	+	-
Alcaloides	-	+	+	-
Lignina	+	+	+	-

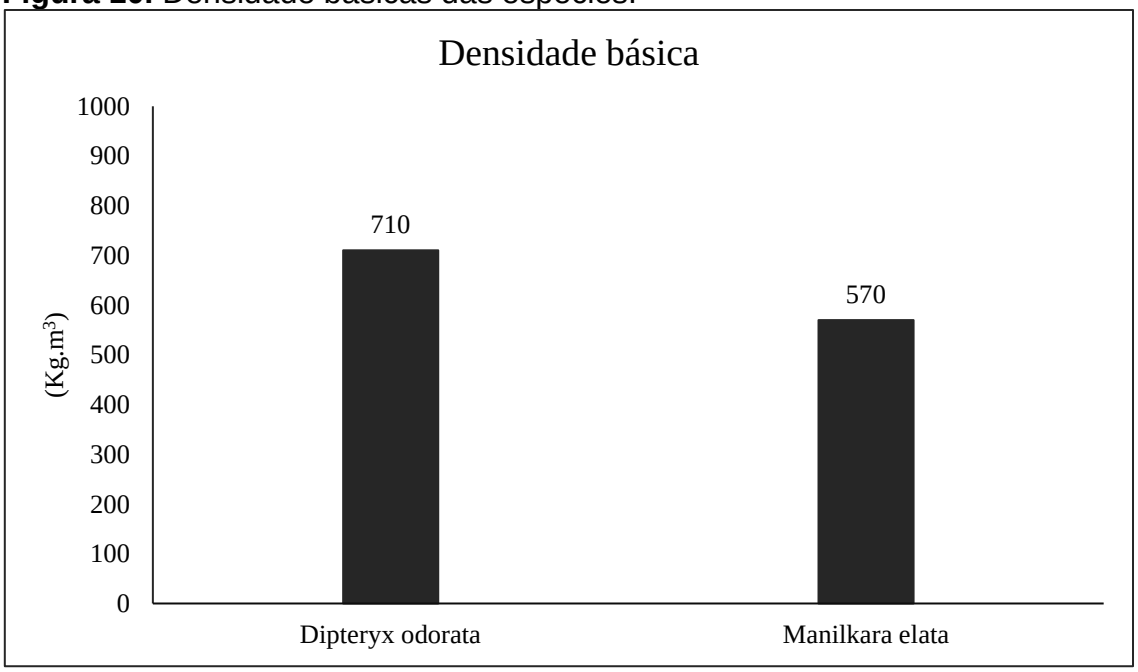
– ausente; + presente; 0 não testado

A detecção de compostos fenólicos entre as reações histoquímicas destacou-se por sua presença tanto no floema quanto nas peridermes das espécies analisadas. Essa classe de metabólitos secundários compreende grupos químicos como flavonoides, ácidos fenólicos e taninos, os quais desempenham papel essencial no desenvolvimento vegetal e constituem componentes fundamentais dos mecanismos de defesa das plantas contra fatores bióticos e abióticos (Sharma et al., 2019). É importante destacar que as observações anatômicas e os testes histoquímicos são fundamentais para a melhor compreensão das características da casca. Essas informações possuem implicações práticas relevantes, especialmente quando o objetivo é o uso sustentável das cascas, uma vez que a periderme, por ser o tecido mais externo da casca, apresenta rápida regeneração e pode ser incorporada a práticas de manejo sustentável das árvores (Araújo et al., 2025).

3.3 Densidade das cascas

Os resultados de densidade básica estão apresentados no Figura 10 . As espécies estudadas exibiram densidades médias diferentes. A *Dipteryx odorata* apresentou 710 kg/m³ (± 60) e a *Manilkara elata* obteve 570 kg/m³ (± 30).

Figura 10. Densidade básicas das espécies.



Fonte: Autora, 2025.

A densidade básica das cascas apresentou diferenças marcantes entre as espécies, sendo que a *Dipteryx odorata* destacou-se por apresentar alta densidade, enquanto que, a *Manilkara elata* apresentou densidade moderada.

Em contraste, na madeira, as densidades dessas espécies são relativamente próximas, com valores de aproximadamente 910 kg/m³ para *D. odorata* e 890 kg/m³ para espécies do gênero *Manilkara* (LPF, 2025). Dessa forma, observa-se que, embora a densidade da madeira seja semelhante entre as espécies, a densidade da casca apresenta variação significativa.

3.4 Composição da química somativa

A composição química total das cascas é apresentada na Tabela 3. Os resultados mostraram diferenças marcantes na composição química das cascas de *Manilkara elata* e *Dipteryx odorata*.

Tabela 3. Quantificação dos constituites químico da casca das espécies.

Composição química	*Manilkara elata*	*Dipteryx odorata*
Extrativos totais	59.60	20.40
Diclorometano	14.82 ± 0.37	2.65 ± 0.14
Etanol	33.13 ± 0.90	9.78 ± 0.70
Água	11.58 ± 1.80	7.99 ± 0.80
Suberina	2.13 ± 0.06	1.03 ± 0.07
Cinzas	4.70 ± 0.11	6.00 ± 0.25
Lignina total	14.90	23.30
Lignina Klason	13.54 ± 0.85	18.21 ± 3.79
Lignina Solúvel	1.41 ± 0.12	5.04 ± 0.008
Polissacarídeos	25.50	56.30

Os símbolos apresentados na tabela correspondem: (±) desvio padrão da população e ([a]) Determinado por diferença
Fonte: Autora, 2025.

A casca de *Manilkara elata* destacou-se pelo elevado teor de extrativos totais (59.60%). Esse resultado corrobora com os dados obtidos nas análises de determinação de compostos fenólicos (Tabela 4), bem como as observações histoquímicas (Figura 8, C2), que evidenciaram intensa presença dessas substâncias nas células da casca. Resultados semelhantes foram relatados por Mota et al. (2025), que, ao estudarem a casca, em especial a periderme de *Erythrina mulungu* e *Enterolobium gummiferum*, encontrou teores elevados de extrativos totais, correspondentes a 38.4% e 20.3%, respectivamente. O elevado teor de extrativos totais em *M. elata* indica alta concentração de metabólitos secundários, como compostos fenólicos, esses resultados evidenciam o potencial antioxidante da espécie. No entanto, a *Dipteryx odorata* apresentou valores intermediários de extrativos totais, com 20.40%, embora esse valor seja inferior ao observado para *M. elata*, é importante destacar que espécies do gênero *Dipteryx* apresentam constituintes químicos de elevada relevância industrial, com destaque para a cumarina, amplamente utilizada nos setores

farmacêutico, cosmético e de fragrâncias, o que reforça a importância econômica e biotecnológica da espécie (Souza et al., 2023)

O teor de suberina foi baixo em ambas as espécies, com valores de 2.13% para *Manilkara elata* e 1.03% para *Dipteryx odorata*. Esses resultados químicos estão em concordância com as observações anatômicas e histoquímicas, que revelaram proporção reduzida de felema nas peridermes. A suberina desempenha papel funcional essencial, pois atua como barreira à troca de água, nutrientes e gases, além de contribuir para a proteção da planta contra de agentes xilofagos (Serra; Geldner, 2022)

A determinação de lignina apresentou maior teor na casca de *Dipteryx odorata* (23.30%), já *Manilkara elata* apresentou menor concentração desse componente estrutural (14.90%). Valores semelhantes aos de *D. odorata* foram relatados para *Quercus vulcanica*, com 21.88% de lignina (Gominho et al., 2021). Atualmente, cresce o interesse em pesquisas sobre a lignina devido ao seu potencial como material estrutural, sendo adequada para a síntese de biopolímeros, incluindo bioplásticos e materiais leves (Grzybek et al., 2021).

O teor de polissacarídeos, estimado pela diferença da composição total somativa, foi maior em *Dipteryx odorata* (56.30%), enquanto que, a *Manilkara elata* apresentou menor conteúdo (25.50%). Valores comparáveis aos de *D. odorata* foram relatados para *Quercus cerris*, com 44.21% de polissacarídeos (Sen et al., 2025). Os polissacarídeos vêm sendo amplamente estudados, uma vez que estão entre os biopolímeros mais utilizados nas indústrias alimentícia, farmacêutica e médica, devido à sua renovabilidade, biocompatibilidade e biodegradabilidade (Benalaya et al., 2024)

3.5 Conteúdo fenólico dos extratos das cascas

Os teores de compostos fenólicos totais, flavonoides e taninos condensados dos extratos da casca de *Manilkara elata* e *Dipteryx odorata*, obtidos por diferentes solventes, estão apresentados na Tabela 2.

Tabela 4. Quantificação dos grupos químicos da *Manilkara elata*.

Variáveis	Média	Devio padrão	Erro padrão	F/χ^2	p-*value*
Teor de fenois					
Água	82.00^{b}	3.56	2.05	157.22*	1.89 e^{-07}
Água:Etanol	143.81^{d}	4.78	2.76		
Água:Metanol	71.11^{a}	6.60	3.81		
Água:Acetona	123.93^{c}	3.29	1.90		

Teor de taninos					
Água	4.34[a]	0.54	0.31		
Água:Etanol	8.97[b]	0.63	0.36	20.76*	0.00039
Água:Metanol	5.15[a]	0.54	0.31		
Água:Acetona	9.44[b]	1.70	0.98		
Flavonoides					
Água	11.90[a]	0.31	0.18		
Água:Etanol	23.09[c]	0.20	0.11	1.0415*	$2.2\ e^{-16}$
Água:Metanol	12.06[a]	0.32	0.18		
Água:Acetona	19.86[b]	0.37	0.21		

Concentração dos solventes (1:1). F = valores derivados de modelos lineares generalizados ajustados com distribuição Gaussiana, avaliados pelo teste F. χ^2 = valores derivados de modelos lineares generalizados ajustados com distribuição Gama, avaliados por meio do teste de razão de verossimilhança (qui-quadrado). p-value (α = 0,05).

Fonte: Autora, 2025.

Os resultados da quantificação de compostos fenólicos, flavonoides e taninos condensados demonstram que a eficiência da extração está fortemente relacionada ao tipo de solvente utilizado. Para *Manilkara elata*, o solvente água:etanol mostrou-se o mais promissor, apresentando os maiores rendimentos de fenóis totais (143.81 mg/g), flavonoides (23.09 mg/g) e taninos condensados (8.97 mg/g), seguido das extrações realizadas com água e acetona. Resultados semelhantes foram encontrados no estudo de Abilleira et al. (2021), onde a casca de *Pinus pinaster* e *Acacia dealbata*, apresentou melhores rendimentos de extração com o uso do solvente água:etanol. Por outro lado, os extratos obtidos com água e água:metanol apresentaram menores rendimentos de extração. É importante destacar que, além do etanol apresentar maior capacidade de extração, a substância extrativa integra o grupo de solventes verdes. Dessa forma, os resultados obtidos podem ser considerados promissores para a extração de compostos bioativos da espécie estudada, especialmente em processos voltados a aplicações industriais e ambientalmente responsáveis (Sut et al., 2022).

Tabela 5. Quantificação dos grupos químicos *da Dipteryx odorata*

Variáveis	Média	Devio padrão	Erro padrão	F/χ^2	p-*value*
Teor de fenois					
Água	3.05[a]	2.05	1.18		
Água:Etanol	15.03[b]	2.45	1.41	64.653*	$5.9\ e^{-06}$
Água:Metanol	4.14[a]	1.24	0.72		

Água:Acetona	20.47^{c}	1.24	0.72		
Teor de taninos					
Água	2.52^{c}	0.11	0.06		
Água:Etanol	2.48^{bc}	0.17	0.1	5.0904*	0.02924
Água:Metanol	2.02^{ab}	0.17	0.1		
Água:Acetona	1.98^{a}	0.35	0.2		
Flavonoides					
Água	1.08^{a}	0.15	0.08		
Água:Etanol	2.76^{b}	0.09	0.05	1.9244*	2.2 e^{-06}
Água:Metanol	2.63^{b}	0.07	0.04		
Água:Acetona	3.33^{c}	0.2	0.11		

Concentração dos solventes (1:1). F = valores derivados de modelos lineares generalizados ajustados com distribuição Gaussiana, avaliados pelo teste F. χ^2 = valores derivados de modelos lineares generalizados ajustados com distribuição Gama, avaliados por meio do teste de razão de verossimilhança (qui-quadrado). p-value (α = 0,05).
Fonte: Autora, 2025.

Em *Dipteryx odorata*, o padrão de extração apresentou diferenças marcantes em relação a *M. elata*. Para os fenóis totais e flavonoides, a acetona destacou-se como o solvente mais eficiente, apresentando os maiores rendimentos (20.47 mg/g e 3.33 mg/g, respectivamente), seguido pelos solventes água:etanol, com (15.03 mg/g) para fenóis e (2.76) mg/g para flavonoides. Por outro lado, as extrações realizadas com água e água:metanol apresentaram rendimentos de extração menores. O processo de extração é fundamental para obter compostos bioativos, sendo que, diferentes métodos e a escolha do solvente influenciam significativamente tanto a eficiência quanto o perfil dos compostos extraído (Nisca; Tanase, 2025). Dessa forma, esses resultados evidenciam diferenças no perfil fitoquímico entre as espécies estudadas, além disso, percebe-se que há maior afinidade dos compostos de *D. odorata* por solventes como a acetona e de *M. elata* por solventes à base de etanol, oque reforça a importância de escolher solventes específicos para cada espécie vegetal.

3.6 Analise elementar

As frações médias de cinzas nas cascas variaram de 4.7 a 6.0%, correspondendo respectivamente a *Manilkara elata* e *Dipteryx odorata* (Tabela 3). Entre os principais macronutrientes, o cálcio ocorreu em maior concentração na casca de *D. odorata* (8.83 g kg^{-1}), seguido pelo potássio (2.67 g kg^{-1}) e magnésio (2.50 g kg^{-1}), enquanto que, o fósforo e o enxofre apresentaram menores teores (0.11 e 0.79 g kg^{-1}, respectivamente. Em *M. elata*, os macronutrientes mais abundantes foram o cálcio (5.60 g kg^{-1}), potássio (2.02 g kg^{-1}) e magnésio (1.96 g kg^{-1}), com fósforo (0.06 g kg^{-1}) e enxofre (0.38 g kg^{-1}) em menores concentrações.

Tabela 6. Quantificação de macro e micronutrientes presenta na casca

Espécies	Ca	K	Mg	P	S	Fe	Zn	Mn	Cu	Ni	Cl	Al
	g/kg^{-1}					mg/kg^{-1}						
Manilkara elata	5.60	2.02	1.96	0.06	0.38	159.80	65.21	6.56	3.41	0.79	231.00	142.40
Dipteryx odorata	8.83	2.67	2.50	0.11	0.79	285.7	15.48	55.5	4.85	0.52	71.64	146.8

Entre os micronutrientes, o ferro apresentou maior concentração na espécie *Dipteryx odorata* (285.70 mg kg^{-1}), seguido pelo alumínio (146.80 mg kg^{-1}), cloro (71.64 mg kg^{-1}), manganês (55.5 mg kg^{-1}), zinco (15.48 mg kg^{-1}), cobre (4.85 mg kg^{-1}) e níquel (0.52 mg kg^{-1}). Na *Manilkara elata*, os principais micronutrientes foram o cloro (231.00 mg kg^{-1}), ferro (159.80 mg kg^{-1}), alumínio (142.40 mg kg^{-1}), zinco (65.21 mg kg^{-1}), manganês (6.56 mg kg^{-1}), cobre (3.41 mg kg^{-1}) e níquel (0.79 mg kg^{-1}).

As cascas das espécies estudadas apresentam quantidade interessante de material inorgânico. Entre os macronutrientes, destacam-se cálcio, potássio e magnésio, essenciais para funções estruturais e fisiológicas das plantas (De Bang et al., 2021). Além disso, as cascas contêm micronutrientes, como ferro, zinco e cloro, que atuam nas funções regulatórias no metabolismo vegetal. O alumínio, embora presente, não participa de processos essenciais às plantas e ocorre em concentrações consideradas baixas (Afrim et al., 2024; Ofoe et al., 2023). Nesse contexto, pesquisas demonstram que as cascas constituem fontes importantes de nutrientes essenciais, cuja composição química permite sua utilização como componente em substratos naturais com potencial funcional para processos agrícolas e industriais (Dias et al., 2025). Os nutrientes identificados nas cascas constituem frações relevantes passíveis de incorporação em substratos naturais.

3.7 Absorção atômica

O resultado da análise por absorção atômica das cascas das espécies estudadas encontra-se na Tabela 6. Na *Manilkara elata*, os constituintes químicos mais evidentes foram o zinco (89,30 ± 0,80 mg kg^{-1}), o manganês (3,25 ± 0,06 mg kg^{-1}) e o cobre (1,78 ± 0,02 mg kg^{-1}). Na espécie *Dipteryx odorata*, os principais elementos encontrados foram o manganês (67,17 ± 2,20 mg kg^{-1}), o zinco (25,06 ± 0,05 mg kg^{-1}) e o cobre (3,24 ± 0,20 mg kg^{-1}).

Tabela 7. Determinação de toxicidade dos constituites químicos presente na casca de *D. odorata* e *M. elata*

Espécies	Zn	Mn	Cu	Pb	Ni	Cr	Cd
			mg/kg				
Manilkara elata	89,30 ± 0,80	3,25 ± 0,06	1,78 ± 0,02	< 1,40	<1,06	< 0,57	< 0,42
Dipteryx odorata	25,06 ± 0,05	67,17± 2,20	3,24 ± 0,20	< 1,41	<1,07	< 0,58	< 0,43

Com relação aos constituites químicos potencialmente tóxicos, como chumbo (Pb), níquel (Ni), cromo (Cr) e cádmio (Cd), as concentrações encontradas em ambas as espécies ficaram abaixo dos limites de detecção do equipamento. É importante ressaltar que ainda não existe uma norma específica definindo quais concentrações de metais pesados seriam consideradas tóxicas para utilização de cascas. Contudo, utilizando como referência os limites estabelecidos pelo CONAMA (Resolução nº 420/2009) para solos, as concentrações encontradas nas cascas estão abaixo desses valores. A análise por absorção atômica é essencial para a detecção e quantificação de elementos potencialmente tóxicos presentes no material estudado. No contexto industrial, a técnica permite avaliar a composição mineral com precisão, contribuindo para o controle de qualidade, segurança do produto e eficiência nos processos de beneficiamento (Perelonia et al., 2021).

4. Potenciais usos da casca em biorrefinárias

O estudo das cascas das duas espécies arbóreas da Amazônia, com base em sua constituição anatômica, química e física, representa a base inicial para a definição de estratégias de valorização. A pricinpio, destaca-se o elevado teor de extrativos totais em *M. elata* e as concentrações moderadas observadas em *D. odorata* (Tabela 3). Os testes rápidos de histoquímica já indicavam o potencial dessas espécies quanto à presença de constituintes químicos (Figs. 8-9). Ademais, os ensaios de detecção de compostos fenólicos indicaram altos teores de compostos fenólicos, sugerindo potencial antioxidante de *M. elata* em extratos obtidos com água e etanol (Tabela 4). Os compostos fenólicos configuram-se como potenciais substitutos de agentes bioativos sintéticos, com aplicações relevantes nas áreas farmacêutica e medicinal (Sun & Shahrajabian, 2023). Além disso, o solvente utilizado destacou-se por se enquadrar na categoria de solventes verdes, sendo menos poluente que alternativas convencionais (Mokaizh et al., 2025). Dentre as caracteristicas identificadas, os extrativos foi oque mais se destacou para a *M. elata*. Esses resultados indicam que a casca de *M. elata* apresenta elevado potencial para a extração de compostos fenólicos e sua incorporação em processos de biorrefinaria.

Em *D. odorata*, a primeira característica mais relevante identificada foi o teor de polissacarídeos (Tabela 3), os quais têm sido amplamente estudados para aplicação em biomateriais, como bioplásticos (Sahin et al., 2024). Outra propriedade relevante é o teor de lignina presente na espécie (Tabela 3). A

lignina, segundo polímero mais abundante após a celulose, tem se mostrado promissora para aplicação em materiais fototérmicos, devido ao seu baixo custo, facilidade de obtenção e maior compatibilidade ambiental quando comparada a materiais convencionais, que geralmente apresentam alto custo e processos de fabricação complexos (Sun et al., 2025). Adicionalmente, a casca de *D. odorata* apresentou elevada densidade básica, o que indica maior massa por unidade de volume e reforça o potencial estrutural da espécie. Assim, as estratégias de valorização da espécie podem contemplar tanto a produção de biomateriais quanto o desenvolvimento de materiais fototérmicos.

No contexto de uma biorrefinaria, após a extração de compostos químicos de maior valor agregado (como extrativos, lignina e polissacarídeos) a biomassa residual das duas espécies pode ser utilizada como fertilizante, devido ao seu elevado teor de minerais (Tabela 6). Dessa forma, o aproveitamento dos recursos naturais torna-se mais eficiente e sustentável (Araújo et al., 2025). Além disso, é importante destacar que ambas as espécies não apresentaram contaminação por constituintes químicos, o que as torna ainda mais promissoras para processos industriais sustentáveis de conversão da biomassa em produtos.

5. Conclusão

As características anatômicas da casca de *Manilkara elata* e *Dipteryx odorata* foram fundamentais para a compreensão das variações estruturais associadas ao desenvolvimento das espécies analisadas. As características morfoestruturais das espécies refletem diferenças ontogenéticas marcantes entre famílias botânicas, isso reforça o papel da anatomia vegetal como ferramenta relevante na investigação de padrões evolutivos, funcionais e taxonômicos. Além disso, as espécies também diferiram quanto à densidade básica da casca, visto que a *D. odorata* apresentou maior massa por unidade de volume em comparação à *M. elata.*

Diante da investigação das propriedades químicas e bioativas das cascas de *Manilkara elata* e *Dipteryx odorata*, foram identificadas características específicas em cada espécie, o que evidencia potenciais diferenciados de uso industrial. Na espécie *M. elata*, observa-se maior potencial para o aproveitamento de compostos bioativos, enquanto que, a *D. odorata* se destaca na valorização de componentes estruturais, especialmente lignina e polissacarídeos. Ademais, os ensaios de quantificação de compostos fenólicos indicaram elevados teores de fenóis totais em extratos de *M. elata* obtidos com água e etanol, sugerindo potencial antioxidante desses extratos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Abdalla, S., Pizzi, A., Ayed, N., Charrier-El Bouhtoury, F., Charrier, B., Bahabri, F., & Ganash, A., 2014. MALDI-TOF analysis of Aleppo pine (*Pinus halepensis*) bark tannin. BioResources, *9*, 3396-3406.

Abilleira, F., Varela, P., Cancela, Á., Álvarez, X., Sánchez, Á., & Valero, E., 2021. Tannins extraction from Pinus pinaster and Acacia dealbata bark with applications in the industry. Industrial Crops and Products, 164, 113394.

Afrin, S., Islam, N., Mustaki, S., Araf, T., & Choudhury, S., 2024. Impact of Micronutrients and plant growth regulators on brinjal (Solanum melongena L.) growth, yield and quality. Asian Journal of Soil Science and Plant Nutrition, 10, 72-79.

Amorim, E. P., Pimenta, A. S., & de Souza, E. C., 2021. Aproveitamento dos resíduos da colheita florestal: estado da arte e oportunidades. Research, Society and Development, 10, e4410212175-e4410212175.

Angyalossy, V., Pace, M.R., Evert, R.F., Marcati, C.R., Oskolski, A.A., Terrazas, T., Kotina, E., Lens, F., Mazzoni-Viveiros, S.C., Angeles, G., Machado, S.R., Crivellaro, A., Rao, K.S., Junikka, L., Nikolaeva, N., Baas, P., 2016. IAWA List of Microscopic Bark Features. IAWA Jornal. 37, 517-615.

Araujo, E. D. S., Mota, G. D. S., Lorenço, M. S., Zidanes, U. L., Silva, L. R. D., Silva, E. P., ... & Mori, F. A., 2020. Characterisation and valorisation of the bark of Myrcia eximia DC. trees from the Amazon rainforest as a source of phenolic compounds. Holzforschung, *74*, 989-998.

Araujo, E. D. S., Mota, G. D. S., Almeida, R. M. D., Zidanes, U. L., Carréra, J. C., Lorenço, M. S., ... & Mori, F. A., 2025. Valorisation the bark of forest species as a source of natural products within the framework of a sustainable bioeconomy in the Amazon. Holzforschung, (0).

Barbosa, A. C., Pace, M. R., Witovisk, L., & Angyalossy, V., 2010. A new method to obtain good anatomical slides of heterogeneous plant parts. IAWA journal, *31*, 373-383.

Benalaya, I., Alves, G., Lopes, J., & Silva, L. R., 2024. A review of natural polysaccharides: sources, characteristics, properties, food, and pharmaceutical applications. International Journal of Molecular Sciences, 25, 1322.

Brasil. Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA, 2009. Resolução nº 420, de 28 de dezembro de 2009. Dispõe sobre limites máximos de contaminantes em solos e orientações para manejo ambiental. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 10 dez. Disponível em: https://conama.mma.gov.br/index.php?option=com_sisconama&task=documento.download&id=25954. Acesso em: 07 dez. 2025.

Bridson, J. H., Thumm, A., Cooke-Willis, M., Campion, S., Tutt, K., & West, M., 2024. Comparison of near infrared and mid infrared spectroscopy for the prediction of Pinus radiata bark chemical properties relevant to a

biorefinery. Biomass and Bioenergy, *185*, 107235.

Caglayan, İ., Kabak, Ö., & Ucal Sari, I., 2025. Comparative cost analysis for bore hole and bark streak tapping methods in resin production from Pinus brutia. Agroforestry Systems, 99, 45.

Carvalho, P. E. R. Espécies arbóreas brasileiras Brasília: Embrapa Informação Tecnológica; Colombo/PR: Embrapa Florestas, 2003.

da Silva, A. L. C., Benini, S. M., & de Godoy, J. A. R. (2024). da Silva, A. L. C., Benini, S. M., & de Godoy, J. A. R., 2024. Economic development and sustainability in the amazon: a big data analysis based on the triple bottom line. Revista de Gestão Social e Ambiental, 18, 1-19.

De Bang, T. C., Husted, S., Laursen, K. H., Persson, D. P., & Schjoerring, J. K., 2021. The molecular–physiological functions of mineral macronutrients and their consequences for deficiency symptoms in plants. New Phytologist, 229, 2446-2469.

Dias, G. C., Machado, R. M., Alves-Pereira, I., Ferreira, R. A., & Gruda, N. S., 2025. Potential of Pine Bark to Replace Perlite in Coir-Based Substrates: Effects on Nutrient Uptake, Growth, and Phytochemicals in Lettuce Under Two Salinity Levels. Plants, 14, 2577.

Embrapa – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, 2025. Aumento da pressão pelo uso e conservação da biodiversidade, dos recursos florestais madeireiros e não madeireiros. Disponível em: https://www.embrapa.br/visao-de-futuro/sustentabilidade/sinal-e-tendencia/aumento-da-pressao-pelo-uso-e-conservacao-da-biodiversidade-e-recursos-florestais-madeireiros-e-nao-madeireiros. Acesso em: 05 dez. 2025.

Franklin, G. L. 1945. Preparation of thin sections of synthetic resins and wood-resin composites, and a new macerating method for wood. Nature, 155, 51-51.

Grzybek, J., Sepperer, T., Petutschnigg, A., & Schnabel, T., 2021. Organosolv lignin from european tree bark: influence of bark pretreatment. Materials, 14, 7774.

Hijmans, R. J., Cameron, S. E., Parra, J. L., Jones, P. G., & Jarvis, A., 2005. Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas. International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society, 25, 1965-1978.

Imazon – Instituto do Homem e do Meio Ambiente da Amazônia, 2020. A atividade madeireira na Amazônia brasileira: produção, receitas e mercados. Disponível em: https://imazon.org.br/a-atividade-madeireira-na-amazonia-brasileira-producao-receita-e-mercados/. Acesso em: 02 fev. 2024.

Johansen, D. A., 1940. Plant microtechnique. New York: McGraw-Hill, 523.

Lima, M. D. R., Patrício, E. P. S., Junior, U. D. O. B., Silva, R. D. C. C., Bufalino, L., Numazawa, S., ... & de Paula Protásio, T., 2021. Colorimetry as a criterion for

segregation of logging wastes from sustainable forest management in the Brazilian Amazon for bioenergy. Renewable Energy, 163, 792-806.

Kotina, E. L., Tilney, P. M., Van Wyk, A. E., Oskolski, A. A., & van Wyk, B. E., 2018. “Hairy” bark in Lannea schweinfurthii (Anacardiaceae): hyperhydric-like tissue formed under arid conditions. IAWA Journal, 39, 221-233.

Mace, M. E., & Howell, C. R., 1974. Histochemistry and identification of condensed tannin precursors in roots of cotton seedlings. Canadian journal of botany, 52, 2423-2426.

MMA – Ministério do Meio Ambiente, 2022. No Dia da Amazônia, conheça curiosidades da maior floresta tropical do mundo e ações que unem preservação e desenvolvimento. Disponível em: https://www.gov.br/mma/pt-br/assuntos/noticias/no-dia-da-amazonia-conheca-curiosidades-da-maior-floresta-tropical-do-mundo-e-acoes-que-unem-preservacao-e-desenvolvimento. Acesso em: 30 nov. 2025.

Mota, G. S., Nery, F. C., da Silva Araujo, E., Lorenço, M. S., Pereira, H., & Mori, F. A., 2025. Characterization of cork features of Erythrina mulungu and Enterolobium gummiferum in view of a potential valorization and conservation of forest species in the Cerrado bioma. European Journal of Wood and Wood Products, 83, 2.

Mokaizh, A. A. B., Nour, A. H., Ali, G. A., Ukaegbu, C. I., & Hawege, E. F., 2025. Eco-friendly and efficient extraction of phenolic compounds from Commiphora gileadensis bark using microwave-assisted extraction. Journal of Industrial and Engineering Chemistry, 142, 321-328.

Nisca, A., & Tanase, C., 2025. Approaches to Extracting Bioactive Compounds from Bark of Various Plants: A Brief Review. Plants, 14, 2929.

Ofoe, R., Thomas, R. H., Asiedu, S. K., Wang-Pruski, G., Fofana, B., & Abbey, L., 2023. Aluminum in plant: Benefits, toxicity and tolerance mechanisms. Frontiers in plant science, 13, 1085998.

Oliveira, A. H. M., Matricardi, E. A., de Aragão, L. E. O. E. C., Felix, I. M., Chaves, J. H., Magliano, M. M., ... & Martorano, L. G., 2024. Assessing Forest Degradation Through Remote Sensing in the Brazilian Amazon: Implications and Perspectives for Sustainable Forest Management. Remote Sensing, 16, 4557.

Pearse, A., 1980. Theoretical and applied histochemistry. 4th ed. London: Churchill Livingstone, 456 .

Pereira, H., 1988. Chemical composition and variability of cork from *Quercus suber* L. Wood science and technology, *22*, 211-218.

Perelonia, K. B. S., Benitez, K. C. D., Banicod, R. J. S., Tadifa, G. C., Cambia, F. D., & Montojo, U. M., 2021. Validation of an analytical method for the determination of cadmium, lead and mercury in fish and fishery resources by graphite furnace and Cold Vapor Atomic Absorption Spectrometry. Food Control, 130, 108363.

Ranganathan, S., Campion, S. H., Dale, R. A., Tanjay, Q. L., Murray, R. H., de Lena, A., ... & West, M., 2025. Determining the sequence of extracting Pinus radiata bark to maximize the total yield of extractives–towards the development of a bark-based biorefinery. Bioresources and Bioprocessing, 12, 49.

Şahin, S., Eyüboğlu, S., Karkar, B., & Ata, G. D., 2024. Development of bioactive films loaded with extract and polysaccharide of Pinus brutia bark. Journal of food science, 89, 3649-3665.

Şen, U., Balcı, B., Arıcı, Ş., Şat, B., Miranda, I., & Pereira, H., 2025. Chemical Composition and Reactivity of Quercus pubescens Bark and Bark Fractions for Thermochemical Biorefinery Applications. Processes, 13, 3484.

Sen, U., Fonseca, F. G., Chi, Y., Pereira, H., & Funke, A., 2025. Fast pyrolysis of the waste lignocellulosic phloem fraction of Quercus cerris bark in a twin-screw reactor. Biomass Conversion and Biorefinery, *15*, 10251-10260.

Serra, O., & Geldner, N., 2022. The making of suberin. New Phytologist, *235*, 848-866.

Singh, H., Arya, A., & Kumar, S., 2024. Sustainable Techniques for the Harvest and Conservation of Antimalarial Plant Species. In Antimalarial Medicinal Plants (pp. 77-89). CRC Press.

Singleton, V. L., & Rossi, J. A., 1965. Colorimetry of total phenolics with phosphomolybdic-phosphotungstic acid reagents. American journal of Enology and Viticulture, 16, 144-158.

Shtein, I., Gričar, J., Lev-Yadun, S., Oskolski, A., Pace, M. R., Rosell, J. A., & Crivellaro, A., 2023. Priorities for bark anatomical research: study venues and open questions. Plants, 12, 1985.

Sousa, B. C. M. D., Gomes, D. D. A., Viana, A. F. D. S., Silva, B. A. D., Barata, L. E. S., Sartoratto, A., ... & Vieira, T. A., 2023. Phytochemical analysis and antioxidant activity of ethanolic extracts from different parts of *Dipteryx punctata* (SF Blake) Amshoff. Applied Sciences, 13, 9600.

Souza, L. V., dos Santos, L. D. J., Ferreira, L. P., da Silva Araujo, E., Lorenco, M. S., Vieira, S. B., ... & de Lima Melo, L. E., 2025. Potential of the stem bark of *Bagassa guianensis* Aubl. from sustainable forest management in the Brazilian Amazon as a raw material for biorefineries. Industrial Crops and Products, *227*, 120754.

Sudam – Superintendência do Desenvolvimento da Amazônia, 2025. Legislação da Amazônia. Disponível em: https://www.gov.br/sudam/pt-br/acesso-a-informacoes/institucional/legislacao-da-amazonia. Acesso em: 02 fev. 2025.

Sun, W., & Shahrajabian, M. H., 2023. Therapeutic potential of phenolic compounds in medicinal plants—Natural health products for human health. Molecules, 28, 1845.

Sut, S., Maccari, E., Zengin, G., Ferrarese, I., Loschi, F., Faggian, M., ... & Dall'Acqua, S., 2022. "Smart extraction chain" with green solvents: Extraction of bioactive compounds from Picea abies bark waste for pharmaceutical, nutraceutical and cosmetic uses. Molecules, 27, 6719.

Sun, Z., Shao, C., Hao, S., Zhang, J., Ren, W., Wang, B., ... & Sun, R. C., 2025. Lignin-Based Photothermal Materials: Bridging Sustainability and High-Efficiency Energy Conversion. Advanced Science, 12, 2501259.

Svendsen, B. A., Verpoorte, R., 1983. Chromatography of alkaloids Part A: thin-layer chromatography. New York: Elsevier Science, 533.

Vangeel, T., Neiva, D. M., Quilho, T., Costa, R. A., Sousa, V., Sels, B. F., & Pereira, H., 2023. Tree bark characterization envisioning an integrated use in a biorefinery. Biomass Conversion and Biorefinery, 13, 2029-2043.

Veloso, H. P., Rangel-Filho, A. L. R., Lima, J. C. A., 1991. Classificação da vegetação brasileira, adaptada a um sistema universal. IBGE.

Zhishen, J., Mengcheng, T., & Jianming, W., 1999. The determination of flavonoid contents in mulberry and their scavenging effects on superoxide radicals. Food chemistry, *64*, 555-559.

CRONOGRAMA																						
Anos das atividades	**2024**									**2025**												**2026**
Meses das Atividades	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**	**11**	**12**	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**	**11**	**12**	**1**
Revisão de literatura e escrita do projeto	**X**	**X**	**X**	**X**	**X**	**X**	**X**	**X**	**X**													
Seminário I										**X**												
Publicação do Artigo 1												**X**										
Caracterização química de duas espéces												**X**	**X**			**X**	**X**					
Seminário II															**X**							
Caracterização anatômica de duas espécies								**X**	**X**	**X**	**X**				**X**	**X**	**X**	**X**	**X**			
Qualificação																		**X**				
Escrita do artigo 2																			**X**	**X**	**X**	**X**
Defesa da dissertação																						**X**
Submissão do artigo 2																						**X**

Universidade do Estado do Pará
Centro de Ciências Naturais e Tecnologia
Programa de Pós-Graduação em Tecnologia, Recursos Naturais e Sustentabilidade na Amazônia PPGTEC – Mestrado
Tv. Enéas Pinheiro, 2626, Marco, Belém-PA, CEP: 66095-100
http://ccnt.uepa.br/ppgtec/