

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS DA AMAZÔNIA - INPA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS DE FLORESTAS TROPICAIS

PROPRIEDADES TECNOLÓGICAS DE ESPÉCIES FLORESTAIS
DE PEQUENO DIÂMETRO MANEJADAS NA AMAZÔNIA

CRISTIANO SOUZA DO NASCIMENTO

Manaus, Amazonas
Julho, 2022

CRISTIANO SOUZA DO NASCIMENTO

**PROPRIEDADES TECNOLÓGICAS DE ESPÉCIES FLORESTAIS
DE PEQUENO DIÂMETRO MANEJADAS NA AMAZÔNIA**

Orientador: Dr. Joaquim dos Santos

Co-Orientador: Dra. Claudete Catanhede do Nascimento

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências de Florestas Tropicais, do Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Ciências de Florestas Tropicais, com ênfase em Manejo Florestal.





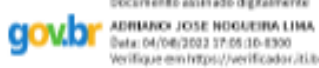
Manaus, Amazonas
Julho, 2022

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS DE FLORESTAS TROPICAIS

**ATA DE DEFESA PÚBLICA DE TESE
DOUTORADO**

Ata da Defesa Remota de **CRISTIANO SOUZA DO NASCIMENTO**, ocorrido no dia 26/07/2022, via Plataforma Videoconferência Zoom.

Aos vinte e seis dias de julho de 2022, às 09h (horário de Manaus/AM), realizou-se a Defesa Pública de Tese de **CRISTIANO SOUZA DO NASCIMENTO**, aluno do Programa de Pós-Graduação *Stricto sensu* em Ciências de Florestas Tropicais, intitulada "Propriedades tecnológicas de espécies florestais de pequeno diâmetro manejadas na Amazônia", sob a orientação do Dr. Joaquim dos Santos (INPA) e coorientação da Dra. Claudete Catanhede do Nascimento (INPA), em conformidade com o Art. 52 do Regimento Geral da Pós-Graduação do Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia (MCTI/INPA) e Art. 67 do Regimento Interno do Programa de Pós-Graduação em Ciências de Florestas Tropicais, como parte das atividades para conclusão e obtenção do Título de Doutor em Ciências de Florestas Tropicais. A **Banca Examinadora** foi constituída pelos seguintes membros: Alberto Carlos Martins Pinto (UFAM), Maria da Paz Lima (INPA), Eduardo de Souza Mafra (UEA), Gabriel Henrique Pires de Mello Ribeiro (UFMT) e Sâmia Valeria dos Santos Barros (IBAMA) e tendo como suplentes os seguintes membros: Estevão Vicente Cavalcanti Monteiro de Paula (UEA) e Adriano José Nogueira Lima (INPA). O Presidente da Banca Examinadora deu início à Seção e informou os procedimentos do exame. O aluno fez uma exposição do seu estudo e ao término foi arguido oralmente pelos membros da Comissão. Após as arguições os membros da banca se reuniram para avaliação e chegaram ao seguinte parecer:

Nome	Parecer	Assinaturas
Alberto Carlos M. Pinto	(X) Aprovou () Reprovou	
Maria da Paz Lima	(X) Aprovou () Reprovou	
Eduardo de Souza Mafra	(X) Aprovou () Reprovou	
Gabriel H. P. de M. Ribeiro	(X) Aprovou () Reprovou	
Adriano J. Nogueira Lima	(x) Aprovou () Reprovou	 Documento assinado digitalmente ADRIANO JOSE NOGUEIRA LIMA Data: 04/08/2022 17:05:10-0300 Verifique em https://verificador.it.br

Nada mais havendo a tratar, foi lavrada a presente Ata que, após lida e aprovada, foi assinada pela Coordenação:

Documento assinado digitalmente
 JOAQUIM DOS SANTOS
Data: 05/08/2022 12:00:47-0300
Verifique em <https://verificador.it.br>

Joaquim dos Santos
Presidente da Banca / Orientador

Documento assinado digitalmente
 ADRIANO JOSE NOGUEIRA LIMA
Data: 04/08/2022 17:02:43-0300
Verifique em <https://verificador.it.br>

Adriano José Nogueira Lima
Coordenador do PPG-CFT
PO. N° 163/2021

Ficha catalográfica

Catálogo na Publicação (CIP-Brasil)

N244p Nascimento, Cristiano Souza do
Propriedades Tecnológicas de Espécies Florestais de Pequeno Diâmetro Manejadas na Amazônia. / Cristiano Souza do Nascimento; orientador: Joaquim dos Santos; coorientadora Claudete Catanhede do Nascimento; - Manaus: [s. l.], 2022.

3.4 MB
131 p. : il. color.

Tese (Doutorado - Programa de Pós-Graduação em Ciências de Florestas Tropicais) - Coordenação do Programa de Pós-Graduação, INPA, 2022.

1. Madeiras amazônicas. 2. Manejo Florestal. I. Santos, Joaquim dos. II. Nascimento, Claudete Catanhede do. III. Título

CDD 350.55

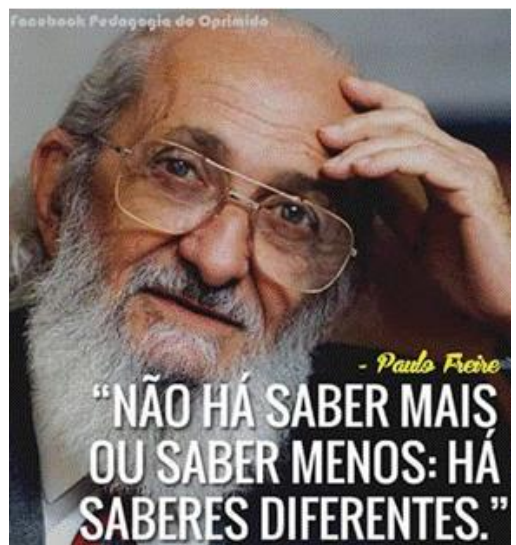
Sinopse:

Foram investigadas as propriedades tecnológicas de dez espécies florestais de pequeno diâmetro manejadas da Amazônia. As propriedades físicas, mecânicas e químicas foram determinadas e ao final foram indicados o uso sustentável.

Palavras-chave: Madeiras amazônicas, árvores de pequeno diâmetro, caracterização tecnológica, espectroscopia no infravermelho próximo, química da madeira, extrativos, qualidade da madeira, manejo florestal

Dedicatória

Dedico este trabalho à minha família, amigos da pesquisa florestal, bem como à comunidade acadêmica, como mais uma contribuição na construção do conhecimento!



Facebook Pedagogia do Oprimido

- Paulo Freire

**“NÃO HÁ SABER MAIS
OU SABER MENOS: HÁ
SABERES DIFERENTES.”**

Agradecimentos

Aos Mentores Espirituais e a Inteligência Suprema que rege minha existência.

À minha Família, Porto Seguro em todos os momentos.

Aos amigos dos laboratórios de Química da Madeira (Irineide de Almeida Cruz) e Engenharia e Artefatos de Madeira (Roberto Daniel de Araújo) pelo companheirismo.

Ao Dr. Joaquim dos Santos e a Dra. Claudete Catanhede do Nascimento, pela confiança e orientação.

Aos amigos de doutorado pela convivência e parcerias, em especial a Claudia Eugênio, Valdiek Menezes e José Carlos Soares.

A família LMF/INPA pela amizade e apoio logístico.

Ao Dr. Niro Higuchi, coordenador do INCT Madeiras da Amazônia/Fapeam/CNPq/MCTI, pelo apoio da pesquisa.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoa de Nível Superior (Capes) pela bolsa de doutorado (88882.4444 19/2019-01)

Por fim, ao PPGCFT/INPA, a secretária do curso (Jéssica Telles) e todos os professores pelo compartilhar de seus mais altos conhecimentos e contribuição para o meu enriquecimento intelectual nas Ciências Florestais.

GRATIDÃO!

RESUMO

A procura por madeiras tropicais de uso consolidado e intenso, pode ocasionar a superexploração de espécies nativas, diminuindo seu estoque na floresta. Por essa razão, a indicação de novas espécies deve estar embasada em informações científicas e o conhecimento das propriedades tecnológicas de espécies de pequeno diâmetro são importantes para subsidiar o manejo sustentável para a Amazônia. O objetivo desta tese foi avaliar as propriedades físicas, mecânicas e químicas de espécies florestais de área manejada da Amazônia utilizando metodologias tradicionais e não destrutivas a fim de indicação de uso racional. As espécies breu-vermelho (*Protium puncticulatum* J.F. Macbr e *P. tenuifolium* Engl.), ingá (*Inga alba* (Sw.) Willd. e *I. paraensis* Ducke), matá-matá (*Eschweilera coriacea* DC. Mart. Ex. Berg., *E. odora* Poepp. e *E. truncata* A.C.Sm.), muirajibóia (*Swartzia recurva* Poepp.), murici (*Byrsonima crispera* A. Juss) e piãozinho (*Micrandropsis scleroxylon* W. Rod.) com diâmetro entre 25-50 cm foram coletadas na área de mata secundária da ZF-2 (EEST/INPA), localizada a margem do km 934 na BR-174 (Manaus - Boa Vista/Brasil). Nesse material foram determinados por metodologia tradicional (metodologia destrutiva) as propriedades químicas (extrativos, polifenóis totais, solubilidade em água, lignina, celulose e cinzas), físico-mecânicas (umidade, poder caloríficos superior - PCS, densidade básica - Db, módulo de elasticidade – MOE e ruptura - MOR), e testes fitoquímicos nos extrativos. Espectros na região do infravermelho próximo (NIR) foram obtidos e modelos preditivos (metodologia não destrutiva) foram desenvolvidos e testados. Na primeira parte do trabalho, os resultados das análises químicas indicaram baixa concentração de cinzas nas madeiras estudadas, e em *E. odora* alto teor de extrativos, enquanto em *M. scleroxylon* alta concentração de lignina. Quanto às propriedades físico-mecânicas, as madeiras apresentam perfil de média a alta densidade, enquanto *M. scleroxylon* teve maior resistência mecânica no estudo. A análise multivariada aplicando o algoritmo K-means indicou a formação de seis classes para as madeiras avaliadas, onde *E. truncata* foi agrupado pelos caracteres MOE, MOR e cinzas, enquanto *I. alba* pelos valores de celulose, Db, MOE e MOR. Na validação de modelos não destrutivos (NIR) para as madeiras de matá-matá, os valores preditos para as propriedades químicas e físico-mecânicas das madeiras foram compatíveis com as determinações destrutivas de espécies tropicais. Na parte do perfil fitoquímico dos extrativos das espécies estudadas *E. odora* e *E. coriacea* foram consideradas espécies ricas em classes químicas. Taninos foi a classe química presente nos extrativos das dez espécies. A presença de alcalóides, antraquinonas e taninos em extrativos estão relacionados à alta resistência biológica natural das espécies. Para extrativos de *M. scleroxylon* o perfil fitoquímico foi composto por antraquinonas, esteróides, flavonóides e taninos condensados, ressaltando que esses resultados são registrados pela primeira vez. Na última parte desta tese foram testados modelos NIR para discriminar tipos de taninos em espécies florestais da Amazônia. A espectroscopia NIR combinada com análise multivariada mostrou-se eficiente (acertos acima de 90%) e detectou taninos condensados em 66% das espécies. A caracterização tecnológica da madeira de pequeno diâmetro de área manejada da Amazônia por meio de metodologia tradicional e não destrutiva é recurso satisfatório na tomada de decisões nos planos de manejo florestais que podem indicar o uso de novas espécies ao setor florestal.

Palavras-Chave: Árvores de pequeno diâmetro, caracterização tecnológica, extrativos, NIR, Manejo Florestal

ABSTRACT

The search for tropical woods with consolidated and intense use can lead to the overexploitation of native species, reducing their stock in the forest. For this reason, the indication of new species must be based on scientific information, and knowledge of the technological properties of small-diameter species is important to subsidize sustainable management of the Amazon. The objective of this thesis was to evaluate the physical, mechanical and chemical properties of forest species in a managed area in the Amazon using traditional and non-destructive methodologies to indicate rational use. The species breu-vermelho (*Protium puncticulatum* J.F. Macbr and *P. tenuifolium* Engl.), ingá (*Inga alba* (Sw.) Willd. and *I. paraensis* Ducke), mata-matá (*Eschweilera coriacea* DC. Mart. Ex. Berg., *E. odora* Poepp. and *E. truncata* A.C.Sm.), muirajibóia (*Swartzia recurva* Poepp.), murici (*Byrsonima crispera* A. Juss) and piãozinho (*Micrandropsis scleroxylon* W. Rod.) with a diameter between 25-50 cm were collected in the secondary forest area of the ZF-2 (EEST/INPA), located at the edge of km 934 on BR-174 (Manaus – Boa Vista/Brazil). In this material, the chemical properties (extractives, total polyphenols, solubility in water, lignin, cellulose, and ash), physical-mechanical (moisture, higher calorific value - PCS, basic density - Db, modulus of elasticity - MOE, and rupture - MOR), and phytochemical tests in extractives. Spectra in the near infrared region (NIR) were obtained and predictive models (non-destructive methodology) were developed and tested. In the first part of the work, the results of the chemical analyzes indicated a low concentration of ash in the studied woods, and in *E. odora* a high content of extractives, while in *M. scleroxylon* a high concentration of lignin. As for the physical-mechanical properties, the wood presents a medium to high density profile, while *M. scleroxylon* had higher mechanical resistance in the study. The multivariate analysis using the K-means algorithm indicated the formation of six classes for the evaluated woods, where *E. truncata* was grouped by the characters MOE, MOR, and ash, while *I. alba* by the values of cellulose, Db, MOE, and MOR. In the validation of non-destructive models (NIR) for mata-matá wood, the predicted values for the chemical and physico-mechanical properties of the woods were compatible with the destructive determinations of tropical species. In the part of the phytochemical profile of the extractives of the studied species, *E. odora* and *E. coriacea* were considered species rich in chemical classes. Tannins were the chemical class present in the extracts of the ten species. The presence of alkaloids, anthraquinones, and tannins in extractives is related to the high natural biological resistance of the species. For *M. scleroxylon* extractives, the phytochemical profile was composed of anthraquinones, steroids, flavonoids, and condensed tannins, emphasizing that these results are recorded for the first time. In the last part of this thesis, NIR models were tested to discriminate types of tannins in Amazonian forest species. NIR spectroscopy combined with multivariate analysis proved to be efficient (over 90% hits) and detected condensed tannins in 66% of the species. The technological characterization of small-diameter wood from a managed area in the Amazon using traditional and non-destructive methodology is a satisfactory resource for decision-making in forest management plans that may indicate the use of new species in the forestry sector.

Keywords: Small diameter trees, technological characterization, extractives, NIR, Forest Management

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO GERAL	1
OBJETIVOS	5
CAPÍTULO 1	
Perfil tecnológico de espécies florestais de pequeno diâmetro de área manejada da Amazônia	6
Resumo	7
Abstract	8
Introdução	9
Material e Métodos	11
Área de estudo	11
Espécies estudadas e amostragem	12
Determinação das propriedades químicas	15
Determinação das propriedades físico-mecânicas	17
Agrupamento de madeiras amazônicas	18
Análise estatística	19
Resultados e Discussão	19
Propriedades químicas da madeira de árvores de pequeno diâmetro	19
Propriedades físico-mecânicas da madeira de árvores de pequeno diâmetro	21
Agrupamento das características tecnológicas de espécies florestais manejadas ..	25
Conclusão	30
Material Complementar	31
CAPÍTULO 2	
Caracterização das propriedades tecnológica da madeira de matá-matá por espectroscopia no Infravermelho próximo	40
Resumo	41
Abstract	42
Introdução	43
Material e Métodos	45
Área de estudo	45
Procedimentos analíticos	45
Análise estatística	48
Resultados e Discussão	48
Caracterização química	48
Caracterização físico-mecânicas	52
Conclusão	60
Material Complementar	61
CAPÍTULO 3	
Prospecção de classes de compostos em extrativos de madeiras amazônicas	63
Resumo	64
Abstract	64
Introdução	65
Material e Métodos	67
Obtenção dos extratos	68
Testes fitoquímicos	68
Testes físico-químicos	71

Resultados	73
Propriedades físico-químicas de espécies florestais da Amazônia	73
Análise fitoquímica	74
Discussão	76
Propriedades físico-químicas de espécies florestais da Amazônia	76
Análise fitoquímica	76
Conclusão	82
CAPÍTULO 4	
Uso da espectroscopia do infravermelho próximo como ferramenta para discriminar taninos de espécies amazônicas	83
Resumo	84
Abstract	84
Introdução	85
Material e Métodos	87
Obtenção de espectros NIR	87
Método de referência para detecção de tipos de taninos	88
Processamento de dados e análise multivariada	89
Resultados e Discussão	93
Análise do componente principal	94
Tipos de taninos em madeiras amazônicas	95
Análise discriminante	97
Análise de cluster das classes de taninos	101
Conclusão	103
Material Complementar	104
CONCLUSÃO GERAL.....	105
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	107

LISTA DE FIGURAS

Capítulo 1

Figura 1. Localização geográfica da área de coleta das amostras	12
Figura 2. Esquema para obtenção dos corpos-de-prova	14
Figura 3. Resultados das propriedades físicas das madeiras de árvores de pequenos diâmetros	22
Figura 4. Resultados do Poder Calorífico Superior de madeiras de árvores de pequenos diâmetros	23
Figura 5. Resultados das propriedades mecânicas das madeiras de árvores de pequenos diâmetros	24
Figura 6. Dendrograma das madeiras de árvores de pequeno diâmetro obtido pela análise de Cluster usando a similaridade (cosseno) em relação às propriedades físicas, mecânicas e químicas	29

Capítulo 2

Figura 1. Localização geográfica da área de coleta das amostras	46
Figura 2. Visão transversal das madeiras de <i>Eschweilera</i> (10X)	50
Figura 3. Distribuição fatorial das variáveis (PCA)	57

Capítulo 3

Figura 1. Localização geográfica da área de coleta da amostra	67
Figura 2. Classes químicas presentes em extrativos de espécies da Floresta Amazônica	74
Figura 3. Corte transversal das madeiras estudadas com chamada aos tipos de parênquima onde os extrativos são depositados (10-40X)	77
Figura 4. Substâncias identificadas nas matas amazônicas	80

Capítulo 4

Figura 1. Área geográfica das coleções de espécies florestais na Amazônia	88
Figura 2. Universo amostral com espectros médios de 100 espécies (332 amostras) de madeira da região amazônica na faixa de 10.000 a 4.000 cm^{-1}	94
Figura 3. Resultados da análise do Componente Principal	95
Figura 4. Resultados da Análise Discriminante de 100 madeiras amazônicas quanto à classe de taninos	98
Figura 5. Perfil dos espectros NIR obtidos a partir do padrão de tanino condensado, e sem padrão de tanino, e das espécies <i>E. schomburgkii</i> e <i>M. guianensis</i> , na faixa de 7.500-4.000 cm^{-1}	101
Figura 6. Dendrograma dos espectros de refletância obtidos pela análise de cluster usando distância euclidiana, em relação às famílias	102

LISTA DE TABELAS

Capítulo 1

Tabela 1. Espécies de pequeno diâmetro coletadas de área manejada	13
Tabela 2. Resultados das propriedades químicas das madeiras de pequeno diâmetro	20
Tabela 3. Coeficiente de correlação de Pearson	27
Tabela 4. Média das propriedades químicas e físico-mecânicas para cada grupo formado pela análise multivariada	28
Tabela 5. Indicação de uso de espécies amazônicas de pequeno diâmetro	30

Capítulo 2

Tabela 1. Modelos NIR utilizados para estimativa das propriedades tecnológicas das madeiras de <i>Eschweilera</i>	47
Tabela 2. Resultados das propriedades químicas das madeiras de <i>Eschweilera</i> por metodologia não destrutiva	49
Tabela 3. Resultado da análise de variância das propriedades químicas das diferentes madeiras de <i>Eschweilera</i>	49
Tabela 4. Resultados das propriedades físico-mecânicas das madeiras de <i>Eschweilera</i> por metodologia não destrutiva	53
Tabela 5. Resultado da análise de variância das propriedades físico-mecânicas das diferentes madeiras de <i>Eschweilera</i>	53
Tabela 6. Resultado da correlação de <i>Pearson</i>	57

Capítulo 3

Tabela 1. Espécies florestais selecionadas para o estudo	68
Tabela 2. Coloração característica para cada tipo de flavonóides	71
Tabela 3. Resultados dos testes quantitativos da madeira	73
Tabela 4. Resultados dos testes qualitativos para a classe dos flavonóides	75

Capítulo 4

Tabela 1. Espécies da Floresta Amazônica utilizadas no estudo	90
Tabela 2. Resumo dos parâmetros quimiométricos utilizados na modelagem FT-NIR	92
Tabela 3. Resultados de testes para detecção de tipos de taninos em madeiras Amazônicas	96
Tabela 4. Parâmetros de avaliação dos modelos quimiométricos	98
Tabela 5. Resultados da classificação das espécies de madeira de acordo com a classe de taninos (conjunto de validação)	100

INTRODUÇÃO GERAL

O potencial biológico da Amazônia é imenso, onde a floresta possui uma variedade de espécies com potencial tecnológico, que vem se destacando mundialmente. As famílias botânicas Leguminosae, Myrtaceae, Lauraceae, Annonaceae, Euphorbiaceae, Sapotaceae e Lecythydaceae representam cerca de 50% de todas as espécies arbóreas da Amazônia (Matta e Scudeller 2012; Steege *et al.* 2016). No entanto, espécies efetivamente exploradas para fins comerciais estão restritas a pouco mais de uma dezena de espécies. Se considerarmos que em um hectare de floresta Amazônica possui em torno de 600 árvores com diâmetro da altura do peito – DAP (> 10 cm) por hectare e que o Diâmetro Mínimo de Corte (DMC) definido pela regulamentação CONAMA/2009 (DAP > 50 cm), e devido à distribuição diamétrica das árvores se tem a princípio a disposição algo entre 5 e 8 árvores por hectare disponíveis para corte (desdobro comercial), em futuro próximo o cenário é de superexploração da floresta (INCT 2017).

Segundo a ITTO (International Tropical Timber Organization) a prática do manejo florestal é uma alternativa para a conservação da biodiversidade que combina o uso da terra de forma sustentável. Nas etapas iniciais do manejo florestal, estudos da composição florística descrevem a quantidade e variedades das espécies, além da estimativa de volume e biomassa. Nas fases seguintes tem-se a seleção das espécies, planejamento e estabelecimento de sistemas de produção sustentável (FAO 2010; Braz e Mattos 2015).

A inclusão de novas espécies nativas com potencial madeireiro pode aumentar a lucratividade dos planos de manejo florestal sustentável (PMFS), com indicação de espécies com grande ocorrência na região, onde a oferta de indivíduos com essa característica seja recurso de equilíbrio a sustentabilidade futura de espécies, onde a exploração daquelas “madeiras comerciais” pode resultar à extinção ou escassez. Contudo, a indicação de novas espécies são relegadas a segundo plano, visto que ainda não se conhece suas potencialidades de uso e sua indicação para mercados. O INCT Madeiras da Amazônia (MCTI/CNPq/FAPEAM/INPA) vem executando estudos de manejo sustentável da floresta visando melhorar a atuação do mercado madeireiro com um menor impacto possível ao meio ambiente. A premissa para criação desse instituto foi de que “*sem tecnologia da madeira não há manejo florestal sustentável na*

Amazônia, sem manejo florestal sustentável não haverá floresta em pé e sem floresta em pé adeus à biodiversidade" (INCT Madeiras da Amazônia 2009).

Sobre as espécies arbóreas chamadas de pequeno diâmetro (< 50 cm) que ocorrem com frequência em florestas nativas, Hampton *et al.* (2008) estimaram a biomassa de árvores em florestas do Arizona/EUA, e definiram a faixa padrão de 15 < DAP < 50 cm para o manejo dessas árvores. Espécies de pequeno diâmetro são uma biomassa pouco explorada em florestas tropicais, e quando ocorre seu uso em geral, não é seletivo quanto a qualidade da madeira, sendo subutilizada para a geração de calor (Wolfslehner *et al.* 2013). Pesquisas acerca dessa biomassa quanto à aptidão tecnológica são escassas e as poucas publicações referem-se à modelagem de volume (LeVan-Green e Livingston 2001; Higuchi *et al.* 2012).

Estudos sobre novas espécies madeireiras devem ser embasados em informações científicas e o conhecimento das propriedades tecnológicas (físicas, mecânicas e químicas) de espécies de pequenos diâmetros são fundamentais para subsidiar o manejo sustentável para a Amazônia, entretanto, esses estudos na região são escassos (Putz *et al.* 2012; Cordeiro *et al.* 2019). Com o conhecimento destas propriedades é possível realizar análises de classificação e/ou agrupamento das características das madeiras tradicionais, método bastante eficaz para aferir as qualidades de novas madeiras (Nascimento *et al.* 1997; Melo *et al.* 2013; Lira *et al.* 2017).

Certas espécies nativas apresentam alta durabilidade natural e características físico-mecânicas, por isso podem ser indicada para uso no mercado local e/ou internacional, pois suas propriedades são adequadas para diversos usos, tais como: estruturas, painéis engenheirados, instrumentos musicais, e na exploração de compostos bioativos (Barbosa *et al.* 2006; Lima *et al.* 2013; Moulin *et al.* 2016; Barros e Politano 2019).

Os traços químicos de espécies florestais nativas são dados importantes para as pesquisas científicas que buscam respostas sobre a geoquímica da floresta, bem como para uso da madeira para fins energéticos, produtos engenheirados e naturais, justificando a importância das pesquisas sobre a química da madeira (Silva *et al.* 2014; Araújo *et al.* 2019; Vleminckx *et al.* 2020; Santos *et al.* 2021). No campo das propriedades anatômicas, físicas e mecânicas, caracteres como tipos de vasos, umidade, densidade básica e módulo de elasticidade da madeira são variáveis de suma importância, pela sua alta correlação com outras propriedades, inclusive

servindo de modelos preditores tanto para a árvore em pé ou como produtos florestais (Santini *et al.* 2013; Christoforo *et al.* 2017).

O desenvolvimento de novas tecnologias é a maneira encontrada para solucionar gargalos econômicos e sociais, e neste caso, soluções tecnológicas compatíveis com peculiaridades de cada região necessitam de um olhar mais apurado. Face ao potencial dos recursos florestais (madeireiros e não madeireiros) amazônicos, aliado ao restrito uso da terra para atividades agrícolas e pecuárias, é necessário implementar ações no sentido de utilizar esses recursos em bases sustentáveis (Araújo 2007; Santana *et al.* 2012; Ribeiro 2017).

As propriedades tecnológicas das madeiras são importantes parâmetros para a definição da qualidade da madeira. A estimativa da qualidade da madeira é apoiada em metodologias confiáveis, assim as inferências são válidas. Os métodos para a avaliação das propriedades da madeira se encontram em uma constante evolução, impulsionada pela busca de maneiras mais rápidas, mais acuradas e de mais baixo custo para se conhecer este material. A avaliação não destrutiva da madeira permite estimar propriedades tecnológicas importantes sem alterar sua estrutura (Bieker e Rust 2010; Silva *et al.* 2014; Reis *et al.* 2019).

A metodologia não destrutiva da madeira permite estimar propriedades tecnológicas importantes sem alterar sua estrutura, preservando o material e desta forma não comprometendo seu uso. Na maioria das vezes os métodos não-destrutivos se baseiam na investigação de correlações, ajuste de modelos de calibração entre as propriedades de interesse e outras de mais fácil mensuração, o que os caracteriza, também, como métodos indiretos. Uma das ferramentas não destrutivas que vem ganhando espaço na pesquisa e na indústria para controle de qualidade nos últimos anos é a espectroscopia de infravermelho próximo (NIR), que possibilita a correlação dos espectros com várias propriedades da madeira, esta técnica é considerada robusta visto que alia a modelagem matemática com a química (quimiometria), associando as propriedades, físicas, mecânicas e biológicas do material madeira (De Paula 2016; Fernandes *et al.* 2017; Nascimento *et al.* 2021).

O presente trabalho teve como objetivo a avaliação das propriedades físicas, mecânicas e químicas de espécies florestais de pequeno diâmetro e pouco conhecidas na Amazônia, sendo este estudo dividido em quatro capítulos em formato de artigos científicos. No Capítulo 1, utilizando metodologias tradicionais, realizou-se a caracterização tecnológica de dez espécies de pequeno diâmetro oriunda de área

de experimentação do INPA. O Capítulo 2, contempla a espectroscopia de infravermelho próximo (NIR) para a determinação das propriedades da madeira de matá-matá (*Eschweilera coriacea*, *E. odora* e *E. truncata*) espécie de grande ocorrência na Amazônia. No Capítulo 3, o foco foi a prospecção de classes de compostos presentes em extrativos de madeiras amazônicas, e três grandes classes foram investigadas, terpenóides, compostos nitrogenados e fenólicos a fim de avaliar o perfil fitoquímico de cada espécie, e no último capítulo (Capítulo 4), testou-se modelo preditivo NIR para discriminação de tipos de taninos em espécies florestais da Amazônia. A soma dos capítulos traz contribuição acerca das propriedades tecnológicas de espécies nativas, que podem auxiliar o manejo florestal na tomada de decisão quanto à indicação de exploração de novas espécies florestais amazônicas.

OBJETIVOS

GERAL: Avaliar espécies florestais de área manejada da Amazônia utilizando metodologias tradicionais e não destrutivas para indicação de uso racional.

ESPECÍFICOS:

- Caracterizar as propriedades tecnológicas (físicas, mecânicas e químicas) de espécies de pequeno diâmetro;
- Desenvolver modelos para predição não destrutiva por meio da espectroscopia NIR de propriedades de madeiras da Amazônia;
- Prospectar classes de compostos em extrativos de espécies de pequeno diâmetro;
- Agrupar características tecnológicas de espécies de pequeno diâmetro manejadas da Amazônia para indicação de uso racional.

Capítulo 1

Nascimento, C.S.; Santos, J.; Nascimento, C.C.; Araújo, R.D. and Freitas, J.A. Technological profile of small-diameter forest species in a managed area in the Amazon. Artigo em revisão para ser submetido a *Wood science and technology*.

PERFIL TECNOLÓGICO DE ESPÉCIES FLORESTAIS DE PEQUENO DIÂMETRO DE ÁREA MANEJADA DA AMAZÔNIA

RESUMO

O reduzido conhecimento tecnológico sobre madeiras amazônicas, aliado à dificuldade de exploração, motivaram a pesquisa na área de tecnologia da madeira, visto que estão intrinsecamente relacionadas à ecologia, economia e aspectos sociais do povo da floresta. Nesse contexto, o objetivo deste estudo foi caracterizar as propriedades tecnológicas das espécies de pequeno diâmetro, breu-vermelho (*Protium puncticulatum* J.F. Macbr e *P. tenuifolium* Engl.), ingá (*Inga alba* (Sw.) Willd. e *I. paraensis* Ducke), matá-matá (*Eschweilera coriacea* DC. Mart. Ex. Berg., *E. odora* Poepp. e *E. truncata* A.C.Sm.), muirajibóia (*Swartzia recurva* Poepp.), murici (*Byrsonima crispera* A. Juss) e piãozinho (*Micrandropsis scleroxylon* W. Rod.). As amostras foram coletadas de área de floresta secundária de terra-firme no Amazonas/Brasil (EEST/INPA). Trinta árvores foram selecionadas (diâmetro ≤ 50 cm) para a determinação das propriedades químicas e físico-mecânicas. O teor de extrativos variou de 2,37 (*M. scleroxylon*) à 7,08% (*E. odora*), e para polifenóis totais foram de 0,19 (*B. crispera*) à 2,63% (*E. odora*). Os macrometabólitos lignina e celulose variaram de 26,65 (*I. alba*) à 34,80% (*M. scleroxylon*), e 39,00 (*P. puncticulatum*) à 55,62% (*B. crispera*), respectivamente, enquanto o teor de cinzas para todas as espécies ficaram abaixo de 0,90%. Quanto às propriedades físico-mecânicas, o teor médio de umidade foi de 12,84%. Para a densidade, as espécies foram classificadas em média a alta, com destaque para as madeiras mais densas *M. scleroxylon* e *E. odora* (0,86 g/cm³). Em geral, as espécies estudadas apresentaram valores elevados de poder calorífico superior (PCS), que variou de 4.253 (*E. odora*) à 4.907 cal/g (*S. recurva*), e para a resistência mecânica *M. scleroxylon* apresentou maior módulo de elasticidade (MOE = 17.137,50 MPa) e ruptura (MOR = 173,93 MPa) e o menor valor no estudo foi verificado para *I. alba* (MOE = 9.219,00 MPa; MOR = 94,43 MPa). A análise multivariada aplicando o algoritmo K-means, baseado no centróide dos dados, indicou a formação de seis grupos, onde o grupo G4 (*E. truncata*) reuniu as características de maior média para MOE, MOR e cinzas, enquanto o G6 (*I. alba*), apresentou alta concentração de celulose, mas baixa densidade, MOE e MOR. A qualidade da madeira de pequeno diâmetro aqui estudadas apresentam potencial para serem indicadas para o manejo, visto que a caracterização tecnológica é uma

ferramenta primaz no auxílio de tomadas de decisões em planos de manejo que podem indicar o uso de novas espécies ao setor florestal.

Palavras-Chave: Madeiras amazônicas, química da madeira, propriedades físico-mecânicas e manejo florestal.

TECHNOLOGICAL PROFILE OF SMALL DIAMETER FOREST SPECIES IN MANAGED AREA IN THE AMAZON

ABSTRACT

The reduced technological knowledge about Amazonian woods, together with the difficulty of exploitation, motivated research in the area of wood technology since they are intrinsically related to the ecology, economy, and social aspects of the people of the forest. In this context, the objective of this study was to characterize the technological properties of the species of small diameters breu-vermelho (*Protium puncticulatum* and *P. tenuifolium*), ingá (*Inga alba* and *I. paraensis*), mata-matá (*Eschweilera coriacea*, *E. odora*, and *E. truncata*), muirajiboa (*Swartzia recurva*), murici (*Byrsonima crispera*) and piãozinho (*Micrandropsis scleroxylon*). The samples were obtained from an area of secondary forest of Terra firme in Amazonas/Brazil (EEST/INPA). Thirty trees were selected (diameter ≤ 50 cm) for the determination of chemical, and physical-mechanical properties. The extractive content ranged from 2.37 (*M. scleroxylon*) to 7.08% (*E. odora*), and for total polyphenols, they ranged from 0.19 (*B. crispera*) to 2.63% (*E. odora*). The lignin and cellulose macrometabolites ranged from 26.65 (*I. alba*) to 34.80% (*M. scleroxylon*), and 39.00 (*P. puncticulatum*) to 55.62% (*B. crispera*), respectively, while the ash content for all species was below $< 0.90\%$. As for the physical-mechanical properties, the average moisture content was 12.84%. For density, the species were classified in the medium to high range, with emphasis on the denser woods *M. scleroxylon* and *E. odora* (0.86 g/cm^3). In general, the species studied present high values of higher calorific value (PCS), which ranged from 4,253 (*E. odora*) to 4,907 cal/g (*S. recurva*), and for mechanical strength, *M. scleroxylon* presented the highest modulus of elasticity (MOE = 17,137.50 MPa), and rupture (MOR = 173.93 MPa) and the lowest value in the study was verified for *I. alba* (MOE = 9,219.00 MPa; MOR = 94.43 MPa). The multivariate analysis applying the K-means algorithm, based

on the centroid of the data, indicated the formation of six groups, where the G4 group (*E. truncata*) had the highest mean characteristics for MOE, MOR, and ash, while the G6 (*I. alba*), showed a high concentration of cellulose, but low density, MOE, and MOR. The quality of the small-diameter wood studied here has the potential to be indicated for management, since the technological characterization is a prime tool in aiding decision-making in management plans that may indicate the use of new species in the forestry sector.

Keywords: Amazonian woods, wood chemistry, physico-mechanical properties and forest management.

INTRODUÇÃO

O território brasileiro é coberto por florestas nativas onde 2/3 desta área é formado pela floresta amazônica, e cobertura abrange 1/3 das florestas tropicais do mundo, resultando em grande interesse para o comércio global de madeiras tropicais. A preferência pelo uso da madeira, nos últimos anos, está relacionada às propriedades dessa matéria-prima, tais como sua elevada resistência mecânica, baixo insumo energético para sua produção, fonte renovável, estética agradável, de cores e texturas variáveis, razões de interesse e intenso desenvolvimento da pesquisa em tecnologia da madeira (Varejão *et al.* 2009; IMAZON 2015; Nascimento *et al.* 2022).

A procura por essências madeireiras nativas de uso consolidado, que apresentam elevado uso, pode ocasionar uma superexploração de espécies e diminuição do seu estoque na floresta. Uma alternativa para essa situação é a substituição dessas espécies por outras, com propriedades da madeira semelhantes e com suficiente estoque de crescimento na floresta. Nesse sentido, intensifica-se o interesse e a busca por estudos de caracterização tecnológica de novas espécies (Souza *et al.* 2016; Araújo *et al.* 2019; Reis *et al.* 2019).

O reduzido conhecimento tecnológico sobre madeiras amazônicas, aliado à dificuldade de exploração, motivaram pesquisas na área de tecnologia da madeira, visto que estão intrinsecamente relacionadas à ecologia, economia e aspectos sociais do povo da floresta. Espécies de pequeno diâmetro oriundas de florestas tropicais não são comumente estudadas, fato esse que impede sua exploração sustentável pela

falta de conhecimentos técnico-científicos sobre a qualidade da madeira (Christoforo *et al.* 2017; Coldebella *et al.* 2018). Hampton *et al.* (2008) definiram árvores de pequeno diâmetro, indivíduos com DAP (diâmetro na altura do peito) na faixa de 15 < DAP < 50 cm, enquanto Siviero *et al.* (2020) apontam DAP de 25 a 55 cm. Oliveira e Amaral (2004) e Oliveira *et al.* (2008) em levantamento florístico em um ambiente florestal de terra firme a noroeste da cidade de Manaus, Amazonas, registraram 771 indivíduos, pertencentes a 50 famílias, 120 gêneros e 239 espécies, e que 70% dos indivíduos arbóreos era do tipo de pequeno diâmetro (> 22,1 cm), das quais indicaram as espécies para fins madeireiros, medicinais e ecológicos.

No PMFS da empresa Mil Madeiras S.A. foram incluídos indivíduos com DAP > 15 cm que não estavam na lista das espécies comerciais, mas teriam potencial indicação de uso em forma de postes, são elas *Chrysophyllum prieurii*, *Eschweilera coriacea* e *Miquartia guianensis*. Ressalta-se que critérios técnicos foram reforçados e aprovados a Câmara Técnica de Floresta, da Gerência Executiva do IBAMA-AM, no dia 2 de julho de 2002, que aprovou a exploração das espécies com diâmetros < 50 cm (PWA 2013).

O grande gargalo dessa matéria-prima é a falta de conhecimento tecnológico, pois o entrave para uso não é seletivo quanto a qualidade da madeira, sendo subutilizada para geração de calor (Wolfslehner *et al.* 2013). LeVan-Green e Livingston (2001) consideram árvores de pequeno diâmetro um resíduo florestal que potencializa incêndios em florestas plantadas nos EUA, e indica o uso dessas árvores para vários fins como uso da madeira maciça em dimensões não convencionais, produtos engenheirados (aglomerado, chapas e painéis), compósitos de fibra de madeira/plástico, energia entre outras aplicações.

Nesse sentido, existe uma preocupação crescente no manejo florestal, especialmente devido a atual mudança de paradigma na indústria florestal para a produção de produtos de madeira de alto valor agregado para otimizar a cadeia de valor e, em última instância, aumentar a competitividade do setor em um contexto de bioeconomia (Mascarenhas *et al.* 2021; Nascimento *et al.* 2021).

Os produtos finais requerem matérias-primas que possuem propriedades específicas, combinação de caracteres para um produto de qualidade, que nesse caso engloba as propriedades anatômicas, físicas, mecânicas e químicas da madeira. Quanto às propriedades químicas, componentes como celulose têm relação com à contração volumétrica e umidade da espécie, e a lignina, responsável pela cimentação

das células, tem relação direta com a resistência ao impacto e compressão, atuando como protetora à microrganismos xilófagos, evitando a penetração de enzimas destrutivas na parede celular (Fengel e Wegener 2003). Na propriedade física, a densidade básica, preditora de demais propriedades, tem relação direta com extrativos, lignina e as propriedades mecânicas da madeira, portanto, o conhecimento das propriedades tecnológicas de novas espécies é primordial para o emprego correto dessa matéria-prima sustentável (Senalik e Farber 2021).

Nesse contexto, o objetivo deste estudo foi caracterizar as propriedades tecnológicas espécies de pequenos diâmetros tais como breu-vermelho (*Protium puncticulatum* e *P. tenuifolium*), ingá (*Inga alba* e *I. paraensis*), matá-matá (*Eschweilera coriacea*, *E. odora* e *E. truncata*), muirajibóia (*Swartzia recurva*), murici (*Byrsonima crispera*) e piãozinho (*Micrandropsis scleroxylon*). Este estudo é importante no sentido de se dá utilização mais adequada da madeira, cujos resultados permitiram a possibilidade para indicar seu uso para fins específicos, além de incentivar estudos de manejo e produtos engenheirados para a espécie de pequeno diâmetro.

MATERIAL E MÉTODOS

Área de estudo

As espécies florestais foram coletadas na área de floresta secundária de terra firme da Estação Experimental de Silvicultura Tropical do Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia – EEST/INPA (02°37'55,5" S e 60°09'11" W), localizada no km 23 da vicinal ZF-2, com acesso no km 934 da BR-174 (Manaus – Boa Vista, Brasil). A estação está distante 60 km da capital do Amazonas e ocupa uma área de 21.000 hectares (Figura 1). O clima da região é do tipo Afi de Köppen, com temperatura média de 26 °C (máxima 39 °C e mínima 19 °C). A precipitação anual média é de 2.000 mm/ano, sendo a estação chuvosa de dezembro a maio e a estação seca de junho a novembro (PELD 2015). Na área da estação, a planície é sedimentar terciária, sendo bastante entrecortada por rede de drenagem, resultando em partes aplainadas (platôs), vales amplos circundados por vertentes íngremes, retas e convexas a dezenas de metros.

A estação se encontra coberta por uma típica floresta tropical úmida de terra firme da Amazônia, segundo a classificação RADAMBRASIL. A cobertura vegetal

ombrófila tem dossel uniforme com altura média de 32 m, com topografia constituída de platôs recortados por riachos, que em certos locais formam planícies de alagação com nascente na área da reserva. Os solos da região são de origem de sedimentos terciário do grupo barreiras, que consistem em arenitos com argilitos intercalados (Ranzani 1980).

Espécies estudadas e amostragem

As amostras foram obtidas de parcela inventariada (sub-parcelas de 100 x 4, 25 m) e definida na proposta do INCT Madeiras da Amazônia – MCTIC/CNPq/FAPEAM, onde foram selecionadas dez espécies de maior frequência na parcela (Tabela 1 e Material complementar MC1).



Figura 1. Localização geográfica da área de coleta das amostras.

Trinta árvores foram selecionadas aleatoriamente para exploração do estudo, com base nas características de proximidade entre indivíduos da mesma espécie, como diâmetro da altura do peito (DAP) e altura comercial. Esses indivíduos foram incluídos na classe de diâmetro de $25 \text{ cm} \leq \text{DAP} \leq 50 \text{ cm}$ e também foram realizadas análises visuais do estado de sanidade de cada árvore (Material complementar MC2). Toretas de 50 cm de espessura no DAP de três indivíduos de cada espécie foram obtidos (Figura 2) e amostras de cada indivíduo foram enviadas ao Laboratório de

Anatomia da Madeira - COTI/INPA para confirmação da identificação feita em campo (Material complementar MC3).

Tabela 1. Espécies de pequeno diâmetro coletadas de área manejada (ZF-2/INPA).

Nome popular	Coleção/ INPA	Características gerais da madeira
Breu vermelho <i>Protium puncticulatum</i> J. F. Macbr	X1.247	Madeira de densidade média a alta, geralmente exsuda resina, cor marrom-acinzentado a marrom-escuro/avermelhado claro, grã direita, e textura média;
<i>Protium tenuifolium</i> (Engl.) – Burseraceae	258.790	Madeira de densidade alta, cor de bege claro à marrom-avermelhado, grã direita ou irregular (entrecruzada), textura fina.
Ingá-branca <i>Inga alba</i> (Sw.) Willd.	X10.118	Madeira de média densidade, cor castanho-claro à avermelhado, grã direita e irregular (entrecruzada), e textura geralmente grossa.
Ingá-vermelha <i>Inga paraensis</i> Ducke - Fabaceae	258.781	Madeira de densidade média a alta, cor castanho-claro à escuro, grã direita e irregular (entrecruzada), e textura média à grossa.
Matá-matá amarelo <i>Eschweilera odora</i> (Poepp.) Miers.	218.387	Madeira de densidade alta, cor marrom-claro, grã irregular (entrecruzada), e textura média à grossa.
Matá-matá branco <i>Eschweilera coriacea</i> (DC.) Mart. ex Berg.	47.813	Madeira de densidade alta, cor castanho-claro opaco, grã direita, e textura média.
Matá-matá preto <i>Eschweilera truncata</i> A.C.Sm. - Lecythidaceae	224.504	Madeira de densidade alta, cor castanho-avermelhado, grã irregular (entrecruzada), e textura fina à média.
Muirajibóia <i>Swartzia recurva</i> Poepp. - Fabaceae	221.367	Madeira de densidade alta, cor do amarelo-claro à castanho-avermelhado, grã direita com maior frequência irregular (entrecruzada) e textura fina.
Murici <i>Byrsonima crispera</i> A. Juss - Malpigiaceae	X8.464	Madeira de média densidade, cor castanho-claro, grã direita e textura média.
Piãozinho <i>Micrandropsis scleroxylon</i> W. Rod. - Euphorbiaceae	X6.145	Madeira de alta densidade, cor do amarelo claro a castanho escuro (enegrecido), grã direita e textura grossa.

Para os estudos químicos, amostras foram encaminhadas para o Laboratório de Química da Madeira – COTI/INPA, onde foram reduzidas a fragmentos menores por meio de picotamento e submetidas à moagem em moinho de facas, para obtenção das serragens. Posteriormente foram peneiradas, separadas por ordem de tamanho

20, 40, 60 e 80 mesh, e armazenadas em sacos plásticos. A serragem utilizada nos testes é a retida em 60 mesh.

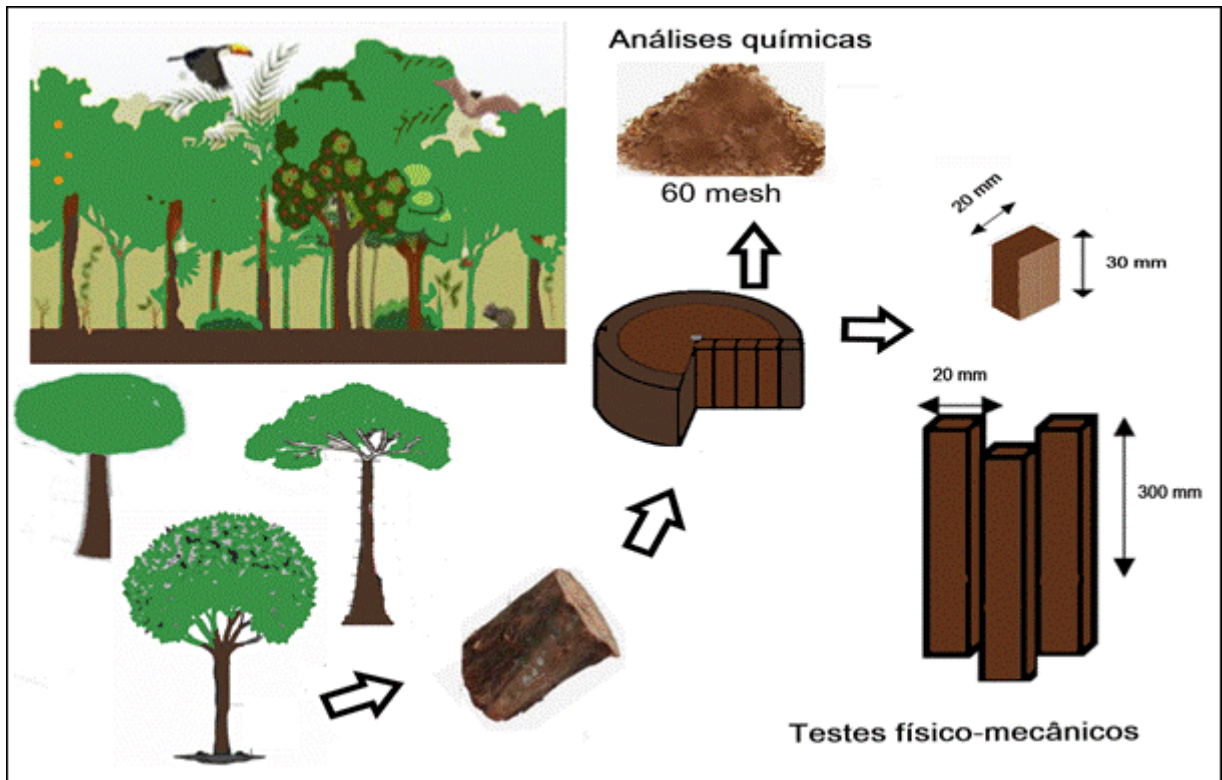


Figura 2. Esquema para obtenção dos corpos-de-prova.

Todas as determinações foram realizadas em duplicata, atendendo as recomendações da Associação Americana de Teste de Materiais (ASTM) Seção 4 – Construção, vol. 04.10 – Madeira. Os ensaios físico-mecânicos foram realizados no Laboratório de Engenharia e Artefatos de Madeira -COTI/INPA. Para tanto, foram confeccionados corpos de prova nas dimensões 20 x 20 x 300 mm e 20 x 20 x 30 mm na seção transversal, no sentido do alburno, conforme Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT e Norma Britânica – BS.

Nas análises de caracterização química foram utilizadas amostras fragmentadas (serragem) de dez espécies, sendo três indivíduos de cada espécie x um torete, onde foram realizadas seis determinações (Extrativos totais, solubilidade em água, lignina, celulose bruta, cinzas e polifenóis) em duplicata. Fez-se delineamento experimental distribuído em esquema fatorial 10 X 3 X 1 X 6 X 2, totalizando um n = 360.

A caracterização física exigiu amostras sólidas e fragmentadas, três

quantificações foram realizadas: umidade, poder calorífico superior (PCS) e densidade básica (Db). Para umidade e PCS foram utilizados o fatorial 10 X 3 X 1 X 2 x 2 com n = 120, e para Db a distribuição foi 10 X 3 X 1 X 1 X 10, n = 300. As determinações das propriedades mecânicas MOE (módulo de elasticidade) e MOR (módulo de ruptura) teve uma distribuição 10 X 3 X 1 X 2 X 3 totalizando um n = 180.

Determinação das propriedades químicas

Determinação do teor de extrativos totais – etanol/tolueno (ASTM D1105, D110/2021)

Nesta análise foram realizadas duas extrações com solventes de diferentes polaridades sucessivamente, conforme descrito a seguir:

1ª extração: foram pesados 5,00 g de serragem e transferidos para o cartucho de celulose. Estes são colocados no interior do extrator Soxhlet e adaptado ao balão de fundo chato (300 mL) contendo aproximadamente 180 mL de solução de etanol-tolueno (1:2) em cada balão (Material complementar MC4A). Foram deixados em refluxo por aproximadamente 8 horas, até a completa extração, feito onde a solução no interior do Soxhlet não apresentava mais coloração. Os cartuchos com amostras foram postos para secar em estufa (100 °C) e armazenados posteriormente em um dessecador. O balão com extrato foi levado à concentração e posteriormente seco em estufa, e pesado até o peso constante. A primeira extração (TE1%) foi determinada pela equação: $TE1\% = (P_f - P_i)/P_s \times 100$, P_i = Peso do balão seco inicial; P_f = Peso do balão com extrativos e P_s = Peso da amostra seca.

2ª extração: o procedimento anterior é repetido, sendo que o solvente de extração nessa etapa é o etanol. Ao final é determinado o TE2%, e somado os índices das duas extrações (TE1 + TE2), este resultado é referido como teor de extrativos totais.

Determinação da solubilidade em água quente (ASTM D1110/2021)

A serragem extraída com etanol-tolueno foi seca e pesada, para a extração em água. Em um Erlenmeyer 1 L foi transferido à amostra extraída e adicionado ~1 L de água destilada fervente e posto em banho-maria por 4 horas, trocando a água de hora em hora (Material complementar MC4B). O material foi filtrado ao final desse período em cadinhos Gooch (M), e posto para secar em estufa (100 °C) por 24 horas e pesado a seguir, até o peso constante. O teor de material solúvel em água quente foi calculado assim: solubilidade em água quente % = $(P_1 - P_2)/P_1 \times 100$, P_1 = Peso da amostra inicial; P_2 = Peso amostra após extração.

Determinação do teor de lignina (ASTM D1106/2021)

Pesou-se 1,00 g da amostra de madeira livre de extrativos, em um béquer, e faz-se o tratamento com H₂SO₄ 72%. O meio é deixado em repouso por 2 horas (banho frio), sendo ao final desse tempo adicionado 560 mL de água (Material complementar MC4C). É levado o frasco ao banho-maria (100 °C) por 4 horas. Após o tempo de reação, filtra-se as amostras em cadinho de Gooch (M). O material é lavado com 500 mL de água destilada aquecida e colocado para secar em estufa (100 °C) por 12 horas, posteriormente, as amostras são pesadas até peso constante e o teor de lignina foi determinado por meio da fórmula: $\text{lignina \%} = P_2/P_1 \times 100$, P_1 = Peso seco inicial da amostra. P_2 = Peso seco de lignina obtida.

Determinação do teor de celulose bruta (Ramadan e Nasser 2008)

A determinação da celulose foi realizada com serragem livre de extrativos (1,00 g). A sofreu um primeiro tratamento com 20 mL de ácido nítrico (3%). O material foi deixado sob refluxo em banho-maria (80 °C) por 30 min. Após esse período a solução foi filtrada, e o material retido foi submetido a um segundo tratamento com 25 mL de hidróxido de sódio (3%), e levado ao aquecimento para nova digestão (Material complementar MC4D). Ao final, o resíduo (celulose) foi lavado com 50 mL de etanol, em seguida com 100 mL de solução etanol-água (1:1), e por fim com água até que apresente meio neutro. A celulose bruta obtida é seca em estufa (100 °C) e depois pesada até peso constante. O teor de celulose é calculado pela seguinte fórmula: $\text{celulose bruta \%} = P_2/P_1 \times 100$, P_1 = Peso seco inicial da amostra. P_2 = Peso seco da celulose obtida.

Determinação do teor de cinzas (ASTM D1102/2021)

Em cadinho de porcelana, 1,00 g de serragem é adicionado e levado à estufa (100 ± 3°C) por 1 hora, para retirada da umidade. Em seguida, o recipiente é levado à mufla para incineração, iniciando com o aquecimento gradativo até 580–600 °C (Material complementar MC4E). Após a incineração o cadinho é pesado até peso constante. O teor de cinzas é determinado pela fórmula: $\text{Cinzas\%} = (P_{\text{cinza}}/P_s) \times 100$, P_{cinza} = Peso da cinza e P_s = Peso da serragem seca.

Determinação de taninos e outros polifenóis (Vetter e Barbosa 1995)

Serragem a 40 mesh (2,00 g) de cada espécie (mistura de três indivíduos) foi

refluxado com água (100 mL) em banho-maria (90 °C, 60 min.). Em seguida, o extrato foi filtrado e reservado, e os resíduos da madeira foram levados novamente para extrair por mais 60 min (Material complementar MC4F). A seguir, o material foi novamente filtrado e acrescentado à primeira fração extrativa, diluindo-se então para uma solução extrativa final de 500 mL (solução-mãe). A seguir, um volume de 100 mL da solução-mãe foi colocado em balão, onde foram adicionados 10 mL de formaldeído 40% (volume/volume) e 5 mL de HCl concentrado. O sistema foi colocado sob refluxo em banho-maria, por 30 min, segundo o método de Stiasny para determinação de taninos. O precipitado foi filtrado, lavado com água, seco em estufa e pesado. A alíquota obtida foi extrapolada para o volume total de extrato e calculou-se o teor de taninos pela equação, $Tan\% = \frac{MT_T}{PM_S} \times 100$, onde MT_T = massa total de taninos (g) e PM_S = peso seco da madeira.

Determinação das propriedades físico-mecânicas

Determinação do teor de umidade (ASTM D2016/2021)

Pesou-se 1,00 g de serragem (60 mesh) em pesa-filtro, e levado à secagem em estufa à 100 ± 2 °C, por um período de 4 horas (Material complementar MC5A), ao final desse tempo o material foi pesado até peso constante. Calculou-se o teor de umidade com o uso da fórmula: $TU\% = \frac{(P_u - P_s)}{P_s} \times 100$, P_u = massa úmida. P_s = massa seca.

Determinação do poder calorífico superior (ASTM D2015/2021)

Os ensaios de poder calorífico superior (PCS) foram realizados em base seca, com auxílio de uma bomba calorimétrica. Cerca de 0,80 g de serragem (60 mesh) foram colocados na cápsula metálica e introduzidos no interior da bomba, um fio de lã é colocado junto ao fio metálico de ignição, a bomba é fechada, sendo injetado gás oxigênio. A bomba é colocada em balde metálico com água, e o sistema de ignição do calorímetro é acoplado à bomba, onde inicia-se a quantificação. Após cerca de 15 min. o sistema operacional do calorímetro PARR imprime o resultado da leitura em cal/g (Material complementar MC5B).

Determinação da densidade básica (NBR 7190/1997)

O método de determinação da densidade básica (Db) consiste no monitoramento do deslocamento da água na madeira. Os corpos de prova (20 x 20 x 30 mm) foram saturados para obter o volume verde, a seguir, foram pesados (balança modelo Marte AS2000, com precisão de 0,001 g), em seguida secos em estufa (100 ± 3 °C) até atingirem peso constante. Posteriormente, calculou-se a densidade básica conforme a fórmula: $Db = P_s/V_v$, onde P_s = peso seco em g, V_v = volume da amostra em estado saturado em cm³.

Determinação da flexão estática da madeira (MOR e MOE) (BS 373/1999)

Corpos-de-prova (20 X 20 X 300 mm) foram armazenados em câmara de climatização (por um período de sete dias, 20 ± 2 °C e umidade relativa de 65 ± 5%) para estabilização da umidade (~12%). Os ensaios de flexão estática foram realizados com três repetições para cada indivíduo. As amostras são acopladas horizontalmente (paralelas às fibras) na máquina universal (20 ton. e velocidade de 1,0 mm/min.) e submetidas a carregamento centralizado, onde a distância de apoio é fixada em 280 mm. O MOR foi calculado a partir da carga máxima em que cada amostra de madeira falhou, $MOR = 3.P.L/2.b.h^2$, onde P = carga/força aplicada (N), L = distância entre os apoios (280 mm), b = largura da amostra de teste (mm), h = espessura da amostra de teste (mm). O MOE foi calculado usando a carga para a curva de deflexão. $MOE = \Delta P.L^3/4. \Delta y.b.h^3$, onde ΔP = mudança na carga necessária ocorre abaixo do limite proporcional e Δy = mudança na deflexão devido à carga - deformação (mm). Modelos quimiométricos foram construídos a partir de metodologia tradicional (MOE e MOR) e espectros NIR, e os resultados foram estimados em MPa.

Agrupamento de madeiras da Amazônia

A estatística multivariada foi utilizada para as análises de agrupamentos das madeiras de árvores de pequeno diâmetro da Amazônia, considerando como universo amostral os resultados da caracterização tecnológica (propriedades físico-mecânicas e químicas). Nesse tipo de análise é possível determinar uma estrutura racional (grupos) a um conjunto de informações (propriedades), classificando-as e permitindo analisar as similaridades entre cada grupamento (Nascimento *et al.* 1997; Araújo 2007; Melo *et al.* 2013; Silveira *et al.* 2013).

O programa estatístico PAST (versão 4.06b – Hammer *et al.* 2001) foi utilizado

nesta etapa do estudo, analisando o conjunto das propriedades físicas, mecânicas e químicas. A análise dos dados foi realizada por comparação entre as médias obtidas para as propriedades de cada espécie. Posteriormente foi realizada a análise de correlação entre as propriedades e análise de similaridade por meio do agrupamento de espécies (análise de Cluster). Os grupos formados possibilitam entender a inter-relação das diferentes características tecnológicas correlacionado ao final as espécies padrão (média e alta densidade) e indicação de usos finais.

Análise estatística

Foram realizados testes estatísticos dos dados brutos das propriedades físicas, mecânicas e químicas, para satisfazer os pressupostos de normalidade, homogeneidade e independência dos resíduos (Material complementar MC6). A ANOVA foi aplicada e quando $p \leq 0,05$ indicou a ocorrência de diferença estatisticamente significativa na propriedade avaliada, foi aplicado o teste de *Tukey* (Minitab® 21.1). Ao final, foi realizada uma matriz de correlação entre as propriedades previstas. Para isso, os dados que não atendiam à premissa de normalidade sofreram as seguintes transformações nos dados, Log_{10} e Box Cox para atender ao pressuposto da análise de correlação de *Pearson*. As correlações foram classificadas em forte ($r^2 > 0,70$), moderada ($0,40 < r^2 < 0,69$), e fraca ($r^2 < 0,39$) segundo *Baba et al.* (2014).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A caracterização da madeira consiste na determinação dos traços anatômicos, químicos e físico-mecânicos, que definem a qualidade e seu uso sustentável. Na Tabela 2, Figuras 3 e 4 são apresentados os resultados da caracterização química e físico-mecânica das espécies de pequeno diâmetro *Byrsonima crispera* (Malphigiaceae), *Eschweilera coriacea*, *E. odora* e *E. truncata* (Lecythidaceae), *Inga alba*, *I. paraensis* e *Swartzia recurva* (Fabaceae), *Micrandropsis scleroxylon* (Euphorbiaceae), *Protium puncticulatum* e *P. tenuifolium* (Burseraceae).

Propriedades químicas da madeira de árvores de pequeno diâmetro

Os resultados de extrativos, polifenóis e solubilidade em água fornecem informações quantitativas da composição de metabólitos secundários na madeira

(Tabela 2). O teor de extrativos solúveis em tolueno-etanol, variou de 2,37 (*M. scleroxylon*) à 7,08% (*E. odora*), e para polifenóis totais foram de 0,19 (*B. crispa*) à 2,63% (*E. odora*), enquanto para solubilidade em água quente a variação foi de 6,54 (*S. recurva*) à 14,69% (*M. scleroxylon*). Os macrometabólitos lignina e celulose variaram de 26,65 (*I. alba*) à 34,80% (*M. scleroxylon*), e 39,00 (*P. puncticulatum*) à 55,62% (*B. crispa*), respectivamente. Para o teor de cinzas os valores ficaram abaixo de 0,90%.

Tabela 2. Resultados das propriedades químicas das madeiras de pequeno diâmetro.

Espécies	%	Extrativos (etan-tol)	Polifenóis totais	Solubilidade água	Lignina	Celulose bruta	Cinzas
<i>Byrsonima crispa</i>	Min-Max	3,28-3,82	0,17-0,21	10,71-12,74	32,49-32,53	54,33-57,01	0,56-0,70
	Média	3,48 cd	0,19 d	12,04 b	32,51 ab	55,62 a	0,63 ab
	Dp	0,30	0,02	1,15	0,02	1,34	0,19
<i>Eschweilera coriacea</i>	Min-Max	5,85-5,96	0,70-0,78	7,56-8,00	31,70-33,01	45,99-47,00	0,41-0,51
	Média	5,90 abc	0,75 bc	7,85 cd	32,24 ab	46,34 cd	0,47 bcd
	Dp	0,06	0,04	0,25	0,68	0,57	0,06
<i>Eschweilera odora</i>	Min-Max	6,50-7,63	2,60-2,65	6,66-7,99	29,35-29,66	42,66-45,01	0,51-0,70
	Média	7,08 a	2,63 a	7,23 d	29,47 cd	44,19 cde	0,62 ab
	Dp	0,57	0,03	0,68	0,17	1,33	0,10
<i>Eschweilera truncata</i>	Min-Max	5,10-5,58	0,80-0,90	6,90-7,81	28,89-31,05	42,99-43,50	0,71-0,89
	Média	6,08 ab	0,84 bc	7,50 cd	30,33 bc	43,33 de	0,83 a
	Dp	0,85	0,06	0,52	1,24	0,29	0,10
<i>Inga alba</i>	Min-Max	4,61-4,72	0,62-0,66	7,00-7,25	29,49-29,96	53,60-54,72	0,32-0,35
	Média	4,68 abcd	0,64 c	7,16 d	26,65 cd	53,98 ab	0,33 cd
	Dp	0,06	0,02	0,14	0,27	0,64	0,02
<i>Inga paraensis</i>	Min-Max	4,61-4,86	0,81-0,94	7,87-8,71	33,50-34,31	43,55-50,11	0,47-0,56
	Média	4,77 abcd	0,86 bc	8,15 cd	34,04 a	47,92 bcd	0,53 bc
	Dp	0,14	0,07	0,48	0,46	3,78	0,05
<i>Micrandropsis scleroxylon</i>	Min-Max	1,89-3,17	0,14-0,28	13,11-16,17	33,84-34,83	46,13-50,79	0,24-0,32
	Média	2,37 d	0,21 d	14,69 a	34,30 a	48,18 bcd	0,29 cd
	Dp	0,70	0,07	1,53	0,50	2,38	0,04
<i>Protium puncticulatum</i>	Min-Max	2,28-5,71	0,72-0,99	12,69-13,32	26,53-29,55	35,22-41,32	0,19-0,31
	Média	4,40 bcd	0,89 bc	13,06 ab	27,88 d	39,00 e	0,24 d
	Dp	1,85	0,15	0,33	1,54	3,30	0,06
<i>Protium tenuifolium</i>	Min-Max	4,61-7,50	0,91-1,30	8,79-10,55	29,45-32,10	45,63-52,03	0,65-1,02
	Média	5,92 abc	1,05 b	9,52 c	30,67 bc	48,65 bcd	0,82 a
	Dp	1,46	0,22	0,92	1,34	3,21	0,19
<i>Swartzia recurva</i>	Min-Max	5,00-6,50	2,30-2,66	6,55-6,80	29,97-30,53	48,76-50,42	0,32-0,43
	Média	5,50 abc	2,42 a	6,54 d	30,16 bcd	49,86 abc	0,39 bcd
	Dp	0,86	0,21	0,14	0,32	0,96	0,06

* Valor médio de três repetições; etan-tol = etanol-tolueno; Dp = desvio padrão; médias seguidas da mesma letra não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.

Compreender a variabilidade dos constituintes químicos da madeira tem importância crítica para a qualidade, processamento e o uso da madeira, aspectos esses relevantes na indicação e aplicação de técnicas de manejo florestal. Espécies

ricas em extrativos e alta concentração de lignina revelam maior durabilidade natural (toxicidade dos extrativos), densidade e resistência, por outro lado, espécies com menor concentração de extrativos e alto teor de celulose apresentam madeiras de baixa densidade, de baixa resistência biológica natural a organismos xilófagos, mas têm alta rigidez (Almeida *et al.* 2015; Senalik e Farber 2021).

As propriedades químicas de certas espécies podem ainda favorecer ou prejudicar o processo de colagem em produtos engenheirados. Araújo *et al.* (2019) trabalhando com manufatura EGP utilizando madeiras amazônicas, associou o bom desempenho na colagem da madeira de angelim-pedra (*Hymenolobium pulcherrimum*) às baixas concentrações de minerais (0,17%). Em outro estudo com painéis de madeira, Kniess *et al.* (2015), associou a alta performance das ligações adesivas à composição química da madeira (pH, extrativos e cinzas). Outro empecilho para a madeira, ocorre na etapa do desdobro das toras, certos extrativos e a alta concentração de minerais, principalmente sílica em madeiras tropicais, que são responsáveis pela corrosão e perda de fio das ferramentas de cortes (Sjöström 2013).

O conhecimento do teor de lignina é fundamental para estudos sobre potencial energético de biomassa. A lignina apresenta alto poder calorífico (6.100 kcal/kg) e as fortes evidências indicam sua contribuição significativamente para a formação do carbono residual, espécies com maior concentração de lignina produzem carvão com maior fulgor (Moutinho *et al.* 2011; Silva *et al.* 2014).

Uma análise sobre os resultados da caracterização química das espécies permite afirmar que as espécies de *Eschweilera* são ricas em extrativos, e isso pode conferir uma alta resistência biológica às suas madeiras. A espécie *M. scleroxylon* a indicadores do seu uso para fins estruturais e ainda potencial energético visto sua alta concentração de lignina e baixo teor de cinzas. Para demais espécies um caractere em comum foi a baixa concentração de cinzas que podem ser relacionados a minerais a base de sais e fosfatos de Ca, K e P, e Mg.

Propriedades físico-mecânicas da madeira de árvores de pequeno diâmetro

Em particular, a qualidade da madeira é definida como a combinação específica de suas propriedades que são mais adequadas para um produto final específico, onde a densidade é a característica física de maior resposta, acompanhada de outros traços como umidade, módulo de elasticidade e aspectos químicos e anatômicos (Zieminska *et al.* 2013; Nascimento *et al.* 2017).

Os resultados da umidade e densidade básica (Db) são apresentados na Figura 3. O valor médio do teor de umidade foi de 12,84%. *M. scleroxylon* (14,04%), *I. alba* (13,17%), *I. paraensis* (13,09%) e *P. tenuifolium* (13,02%) apresentaram maior valor para essa variável física, enquanto, *E. odora* (11,58%) e *E. coriacea* (12,20%) os menores valores. Para a densidade as espécies estudadas apresentaram um perfil de média a alta densidade, com destaque para as madeiras mais densas (0,86 g/cm³), *M. scleroxylon* e *E. odora*. A madeira das espécies *I. alba*, *B. crispa* e *P. puncticulatum* foram classificadas como de média densidade ($\leq 0,63$ g/cm³).

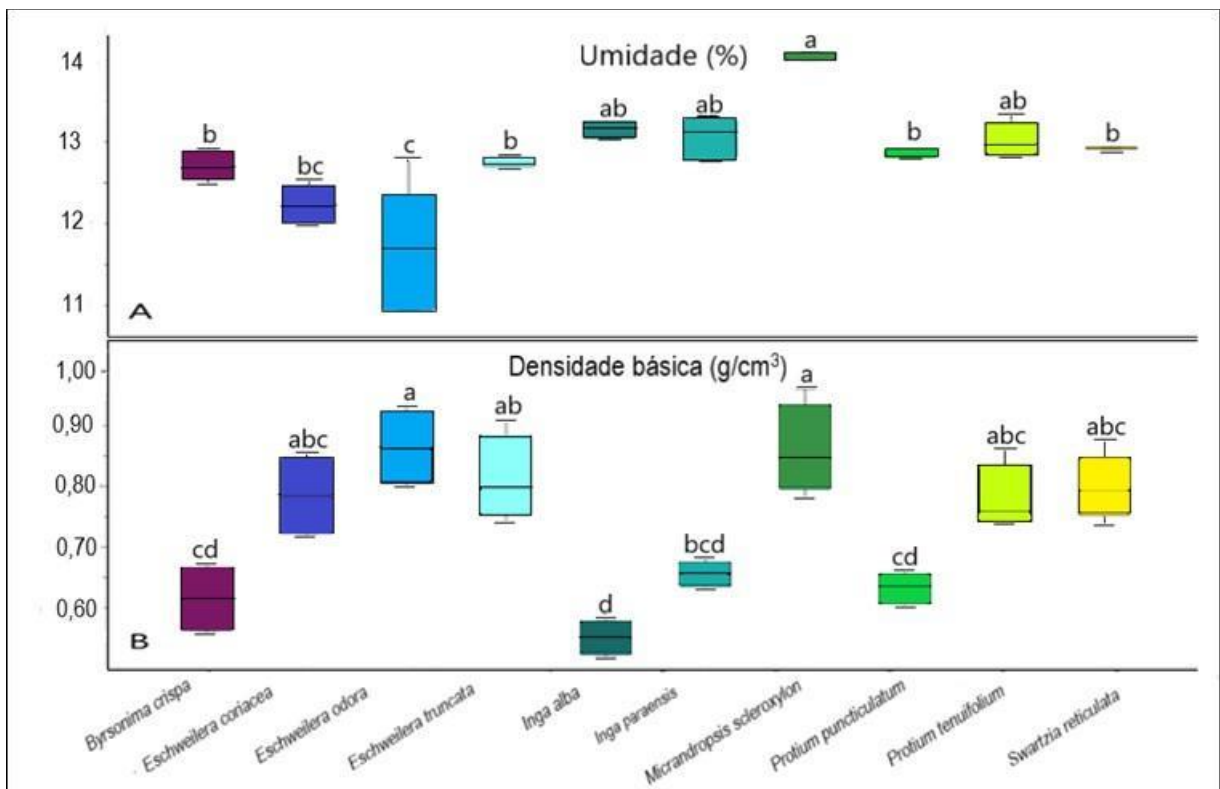


Figura 3. Resultados das propriedades físicas das madeiras de árvores de pequeno diâmetro.

O poder calorífico superior (PCS) da madeira consiste na quantidade de energia por unidade de massa liberada na combustão da madeira. Esta variável física está comumente relacionada a processos físico-químicos da madeira, principalmente quando se quer aplicar a madeira para fins energéticos. Em geral, as espécies estudadas apresentam valores elevados de PCS (Figura 4), que variou de 4.253 (*E. odora*) à 4.907 cal/g (*S. recurva*).

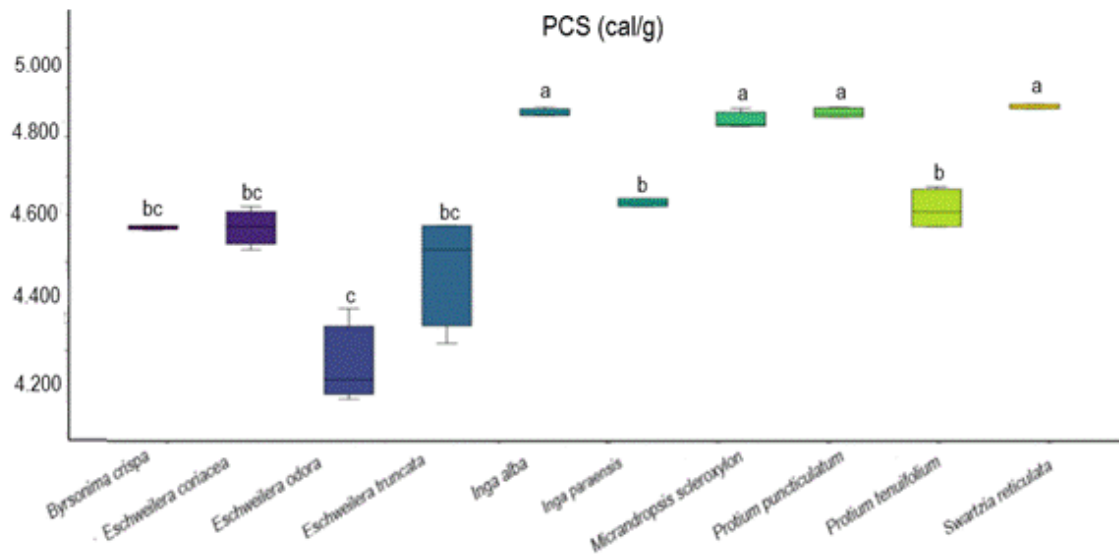


Figura 4. Resultados do Poder Calorífico Superior de madeiras de árvores de pequeno diâmetro.

Na engenharia as propriedades mecânicas como resistência, compressão (f_c), cisalhamento (f_s), módulo de elasticidade (MOE) e ruptura (MOR) são as variáveis que ditam o uso da madeira para fins estruturais, enquanto nos estudos de ecologia, os traços mecânicos (MOE e MOR) explicam a resistência da árvore em pé e processos hidráulicos das plantas (Fan *et al.* 2017; Senalik e Farber 2021). A espécie *E. truncata* apresentou maior resistência mecânica (MOE = 17.350,00 MPa; MOR = 173,93 MPa) e o menor valor no estudo foi verificado para *I. alba* (MOE = 9.219,00 MPa; MOR = 94,43 MPa) (Figura 5). Vale ressaltar que os valores para as propriedades físico-mecânicas estão na faixa para madeiras tropicais de média a alta densidade (INPA/CPPF 1991; Balboni *et al.* 2018).

A madeira é um tecido complexo composto por três tipos principais de células, vasos, fibras e parênquima. Neste tecido as diferentes características estruturais e proporções na madeira refletem diretamente nas propriedades físicas e mecânicas. Os vasos transportam a água, espécies com diâmetro de vaso grande e alta frequência, em geral, tem baixa Db e alta umidade e instabilidade dimensional. Espécies com alta concentração de celulose (fibras) tende a conferir maior elasticidade a madeira (MOE), enquanto, no parênquima que armazena e transporta nutrientes, esta célula influencia diretamente no teor de extrativo e consequentemente na DB da madeira (Jacobsen *et al.* 2007; Ziemska *et al.* 2013).

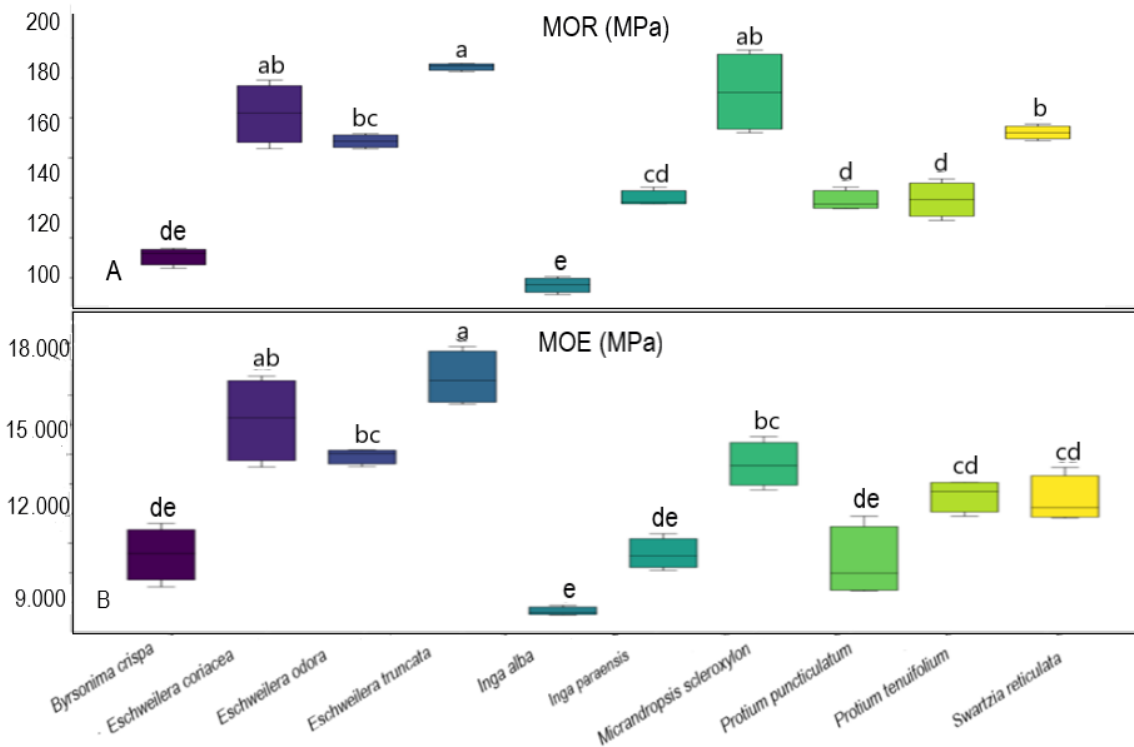


Figura 5. Resultados das propriedades mecânicas das madeiras de árvores de pequenos diâmetros estimado por Espectroscopia NIR.

Conhecer as propriedades físicas e mecânicas possibilita um uso mais racional da madeira. Nos estudos da qualidade da madeira a Db tem relação direta com a resistência mecânica, o que a torna um bom preditor de resistência e rigidez da madeira. Outro fator que implica na qualidade é a resistência biológica, onde espécies mais densas são mais resistentes aos ataques de organismos xilófagos (INPA/CPPF 1991; Chave *et al.* 2009; Almeida *et al.* 2017).

As propriedades físicas e mecânicas variam conforme o teor de umidade da madeira, esta variável é inversamente proporcional a Db, PCS, MOE e MOR (Kollmann e Cotê Junior 1968; Silveira *et al.* 2013). Esse comportamento foi verificado pela espécie *I. alba* que apresentou um dos maiores teor de umidade (13,17%) com uma densidade básica de $0,55 \text{ g/cm}^3$, a menor no estudo, e conseqüentemente as menores resistências mecânicas (MOE e MOR). Por outro lado, *E. odora*, apresentou umas da maior densidade básica ($0,86 \text{ g/cm}^3$), bem como MOE (14.495,00 MPa) e MOR (147,50 MPa), e sua umidade foi a menor do estudo (11,58%).

Os valores para PCS encontrados no presente estudo estão na mesma faixa de outras pesquisas com madeiras amazônicas. Moutinho *et al.* (2011) encontrou valores

de 4.438 - 4.758 cal/g para madeiras de matá-matá (*Eschweilera* sp.), e Silva *et al.* (2014) detectou valores no intervalo de 4.608 (cedrinho, *Scleronema* sp.) à 4.928 cal/g (louro, *Ocotea* sp.).

A variável física densidade básica tem relação direta com os constituintes químicos, e Nuopponen *et al.* (2006) trabalhando com espécies tropicais confirmou essa relação, onde as maiores densidades estavam associadas a maior concentração de lignina. Araújo *et al.* (2019) estudando madeira de espécies manejadas na Amazônia, identificaram predominância de madeira com alta densidade (0,71 à 1,18 g/cm³), e dentro dessa faixa, Fróes *et al.* (2019) encontraram valores médios de 0,77 g/cm³ para a madeira de *E. truncata* (matá-matá preto).

O conhecimento das propriedades mecânicas da madeira é essencial quando se pretende indicá-las para fins estruturais. Jesus *et al.* (2015) avaliando a classe de resistência de madeiras comerciais de Mato Grosso/Brasil, obteve valores médios de 16.000 MPa para MOE de algumas madeiras, *Bagassa guianensis* (tatajuba), *Courotari stellata* (tauari-vermelho), *Mezilaurus itauba* (itaúba), *Manilkara huberi* (maçaranduba), *Nectandra* sp. (canelão), *Qualea trichilioides* (cedro-marinho) e *Tabebuia serratifolia* (ipê-amarelo), onde foram classificadas em D60, nível de madeiras de alta resistência. Balboni *et al.* (2018) caracterizando as propriedades físicas e mecânicas das madeiras amazônicas *Pseudopiptadenia psilostachya* (timborana) e *Eschweilera ovata* (biriba-branco) obtiveram valores de MOR de 103,90 e 127,10 MPa, respectivamente.

No presente estudo as espécies *Eschweilera coriacea* (matá-matá branco), *E. odora* (matá-matá amarelo), *E. truncata* (matá-matá preto), *Micrandropsis scleroxylon* (piãozinho), e *Swartzia recurva* (muirajibóia) apresentaram os maiores valores nas propriedades, indicando assim um perfil de alta qualidade, ou seja, podem ser utilizadas tanto para fins estruturais quanto não-estruturais o que indicam a princípio uso em ambientes internos e externos, enquanto, as demais espécies estudadas devem ser avaliadas individualmente quanto às suas características para verificar o melhor uso.

Agrupamento das características tecnológicas de espécies florestais manejada

A análise de agrupamentos, ou de conglomerados, ou *clusters analysis*, é uma técnica de pesquisa que identifica os principais grupos dentro de um universo amostral (semelhança). Por conseguinte, reduz-se os dados de uma população inteira a um

número determinado de perfis. Desse modo tem-se uma descrição compreensível e concisa das observações, com perdas limitadas de informações (Phohlman 2007). Neste estudo, utilizou-se a análise de agrupamento para entender as semelhanças e diferenças entre espécies de madeiras utilizando o espectro das propriedades tecnológicas (química e físico-mecânica).

A primeira etapa do agrupamento consiste na verificação das correlações (correlação de *Pearson*) apresentado na Tabela 3. O coeficiente de correlação entre as variáveis que compõem as propriedades avaliadas foram altamente significativo ($p < 0,001$), e de um total de 78 correlações executadas, 29,49% foram classificadas em fraca, enquanto as demais foram de moderada a forte (70,51%), sendo que a maioria foram correlações positivas, e relação inversa (negativa) foi observado para o PCS (extrativos, polifenóis, solubilidade em água, umidade e cinzas), umidade (PCS, Db e MOR) e Db (celulose). As propriedades que mais se correlacionaram foram a Db e MOR (12), seguidas do DAP e MOE (11), PCS e lignina (9), extrativos e polifenóis (8), H e celulose (7), umidade e solubilidade em água (6), sendo que o teor de cinzas foi a variável com menos correlação (4).

Estudos de caracterização de madeiras desenvolvidos por Fernandes *et al.* (2017), Araújo *et al.* (2019) e Xiao *et al.* (2021), encontraram altas correlações entre Db e as propriedades mecânicas MOE e MOR, que variaram de 0,64 a 0,97. Enquanto, Lobão *et al.* (2011), Moutinho *et al.* (2011) e Silva *et al.* (2014), encontram correlações acima de 0,70 entre Db e os componentes químicos da madeira. As correlações encontradas no presente estudo para PCS (DB, lignina, umidade, extrativos e cinzas), DB (PCS, extrativos, MOE, MOR, lignina, umidade e celulose) e umidade (DB, MOR, PCS e solubilidade em água) foram próximas aos encontrados na literatura (Nascimento *et al.* 1997; Lobão *et al.* 2011; Silveira *et al.* 2013; FPL 2021; Nascimento *et al.* 2021).

As médias das propriedades químicas e físico-mecânicas (Tabela 4) foram utilizadas para formação de grupos (Figura 6). A análise desses dados pode explicar os possíveis agrupamentos das espécies. O G4 reuniu as características de maior média para MOE, MOR e cinzas, e o G5 maior média da DB, extrativos e polifenóis, e ainda menores valores para umidade e PCS. Enquanto o G6, apresentou alta concentração de celulose, mas baixa densidade, MOE e MOR. Em geral, o resultado da análise de agrupamento possivelmente indicam que a qualidade das espécies estudadas está relacionada a maior média geral das variáveis, ou seja, a robustez da

Tabela 3. Coeficiente de correlação de *Pearson*, obtido a partir das correlações entre as variáveis físico-mecânicas e químicas.

	DAP	H	Umidade	PCS	DB	MOE	MOR	Extrativos totais	Polifenóis totais	Solubilidade água	Lignina	Celulose bruta	Cinzas
DAP		0,94	0,90	0,70	0,48	0,48	0,50	0,69	0,89	0,61	0,92	0,94	0,23
H			0,07	0,10	0,61	0,80	0,68	0,06	0,30	0,19	0,68	0,64	0,05
Umidade				<u>-0,76</u>	<u>-0,68</u>	0,42	<u>-0,94</u>	0,03	0,01	0,52	0,28	0,21	0,29
PCS					0,39	0,10	0,47	<u>-0,47</u>	<u>-0,44</u>	<u>-0,62</u>	0,53	0,13	<u>-0,72</u>
Db						0,84	0,88	0,47	0,75	-0,31	0,47	<u>-0,34</u>	0,30
MOE							0,90	0,47	0,49	0,91	0,89	0,45	0,47
MOR								0,53	0,94	0,46	0,70	0,54	0,70
Extrativos totais									0,75	-0,10	0,50	0,32	0,18
Polifenóis totais										0,25	0,30	-0,09	0,23
Solubilidade água											0,07	0,28	0,13
Lignina												0,41	0,15
Celulose bruta													0,07
Cinzas													

DAP = Diâmetro na altura do peito, H = Altura, PCS = Poder calorífico superior, DB = Densidade básica, MOE = Módulo de elasticidade, MOR = Módulo de ruptura. Todos os resultados mostram significantes; teste feito com 95% de confiança.

espécie indica essa relação, assim a espécie *Eschweilera truncata* (G4), reúne os maiores valores da caracterização e *Inga alba* (G6) os menores deste estudo.

Tabela 4. Média das propriedades químicas e físico-mecânicas para cada grupo formado pela análise multivariada.

Prop/ Grupo	G1	G2	G3	G4	G5	G6
Umidade (%)	12,90	12,87	13,33	12,74	11,90	13,17
PCS (g/cal)	4.630,34	4.891,00	4.812,33	4.461,00	4.424,67	4.889,67
Db (g/cm ³)	0,64	0,63	0,81	0,81	0,82	0,55
MOE (MPa)	11.158,75	10.848,75	13.451,25	17.137,50	15.109,38	9.219,00
MOR (MPa)	115,39	124,98	147,62	173,93	151,23	94,43
Extrativos (%)	4,13	4,40	4,60	6,08	6,49	4,68
Polifenóis (%)	0,53	0,84	1,23	0,84	1,69	0,64
Sol. Água (%)	10,10	13,06	10,25	7,50	7,54	7,60
Lignina (%)	33,28	27,88	31,71	30,33	30,86	29,65
Celulose (%)	51,77	39,00	48,90	43,33	45,27	53,98
Cinzas (%)	0,58	0,24	0,50	0,83	0,55	0,33
Média geral	1.456,22	1.451,24	1.683,87	1.988,63	1.799,13	1.301,25

O agrupamento das espécies de pequeno diâmetro pela similaridade das características tecnológicas vem validar outros estudos tecnológicos (Lobão *et al.* 2011; Melo *et al.* 2013; Reis *et al.* 2019) acerca da matéria-prima madeira, que indica que essa técnica é uma ferramenta robusta para indicação e uso de espécies pouco estudadas e/ou conhecidas comercialmente.

O pareamento dos dados da madeira de cumaru (*Dipteryx odorata*) e guariúba (*Clarisia racemosa*) na análise de cluster (Figura 6) permitiu correlacionar a qualidade dessas madeiras e associar possíveis uso das espécies aqui estudadas. Fez-se então a divisão das espécies em três classes de uso baseado no perfil tecnológico dos grupos formados. A Classe 1 é formado pelas espécies do G3, G4 e G5 (*Eschweilera coriacea*, *E. odora*, *E. truncata*, *M. scleroxylon*, *P. tenuifolium* e *S. recurva*), a Classe

2 pelas espécies do G1 e G2 (*B. crisper*, *I. paraensis* e *Protium puncticulatum*, e a Classe 3 pela espécie *I. alba* – G6. A partir dessa divisão é recomendado na Tabela 5 o conjunto de uso das espécies por cada grupo de classe.

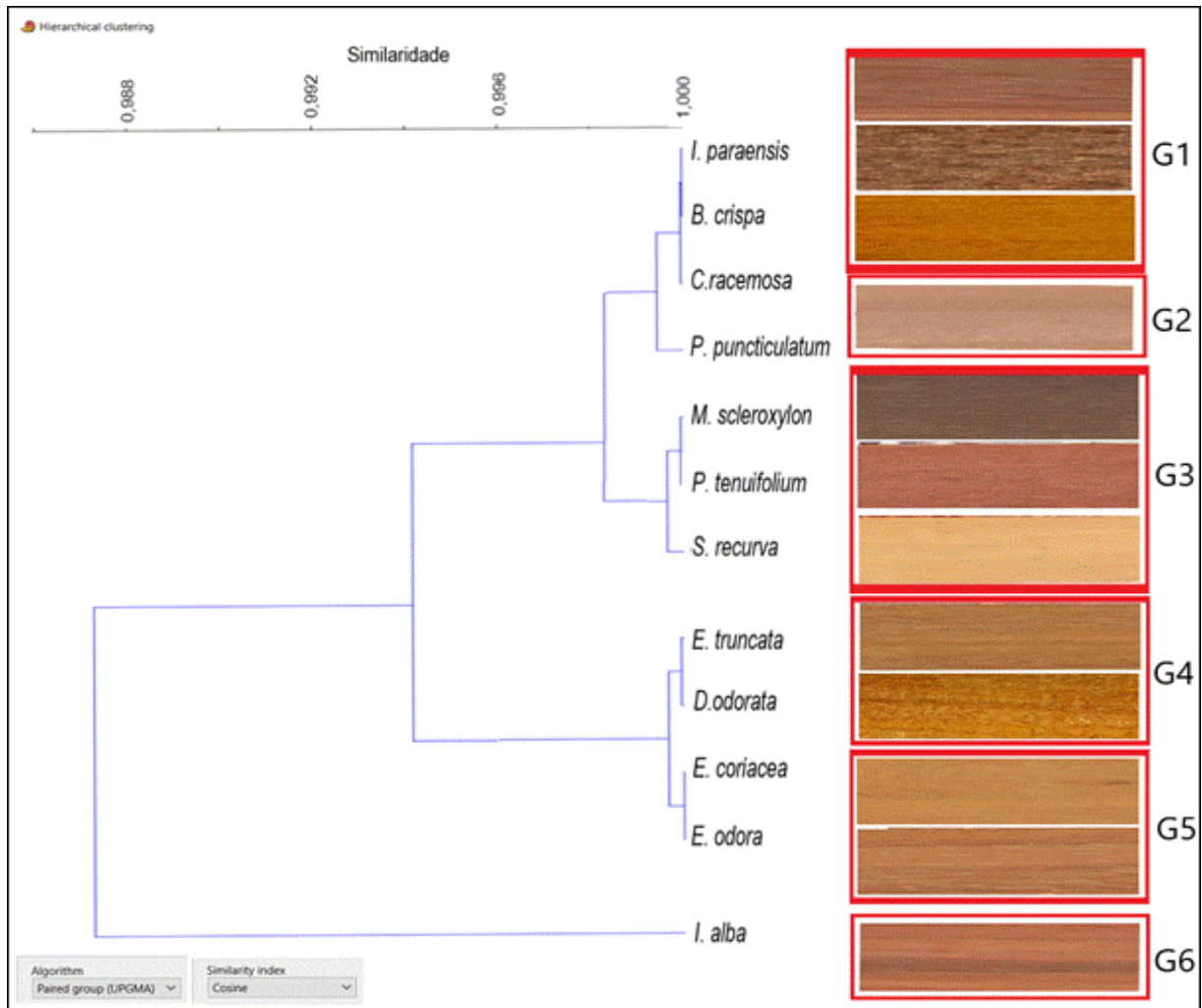


Figura 6. Dendrograma das madeiras de árvores de pequeno diâmetro obtido pela análise de Cluster usando a similaridade (cosseno) em relação às propriedades físicas, mecânicas e químicas.

Tabela 5. Indicação de uso de espécies amazônicas de pequeno diâmetro.

Classe/ Grupo	Espécies	Usos e aplicações
1 G3, G4 e G5	<i>Eschweilera coriacea</i> , <i>E. odora</i> , <i>E. truncata</i> , <i>Micrandropsis scleroxylon</i> , <i>Protium tenuifolium</i> e <i>Swartzia recurva</i>	Construção pesada (Vigas, mourões), uso em ambientes interno e externo, pisos, pontes, tacos, dormentes, instrumentos musicais, chapas e painéis (EGP), móveis, artigos de esportes e energia.
2 G1 e G2	<i>Byrsonima crispera</i> , <i>Inga paraensis</i> e <i>Protium puncticulatum</i>	Construção leve, uso interno (tábuas, esquadrias, portas e janelas), pallet, móveis e artigos domésticos decorativos, torneados, e chapas
3 G6	<i>Inga alba</i>	Uso interno, peças não estruturais para habitação (forros, lambris, venezianas), compensados e chapas, artesanato, embalagens e energia.

CONCLUSÃO

Os resultados do presente trabalho permitem concluir que (i) o perfil químico das espécies *Eschweilera odora* indicam altas concentrações em extrativos e polifenóis totais (7,08% e 2,63%), e *Micrandropsis scleroxylon* teve a maior concentração em lignina (34,80%) e *Byrsonima crispera* maior teor em celulose bruta (55,62%); (ii) o perfil físico-mecânico das espécies foi classificado em madeiras de média a alta densidade, e as espécies *Eschweilera truncata* e *Micrandropsis scleroxylon* apresentaram as maiores resistências mecânicas (MOE e MOR); (iii) A análise de Cluster foi uma ferramenta eficaz para o agrupamento das madeiras considerando suas similaridades. O G4 (*Eschweilera truncata*) reuniu as características de maior média para MOE, MOR e cinzas, e o G5 (*Eschweilera coriacea* e *E. odora*) maior média da DB, extrativos e polifenóis, e ainda menores valores para umidade e PCS. Por outro lado o G6 (*Inga alba*), apresentou alta concentração de celulose, baixa densidade, e menores valores de MOE e MOR; (iv) a determinação da qualidade da madeira de pequeno diâmetro de área manejada da Amazônia por meio da caracterização tecnológica pode auxiliar nas tomadas de decisões nos planos de manejo florestais que podem indicar o uso de novas espécies ao setor florestal.

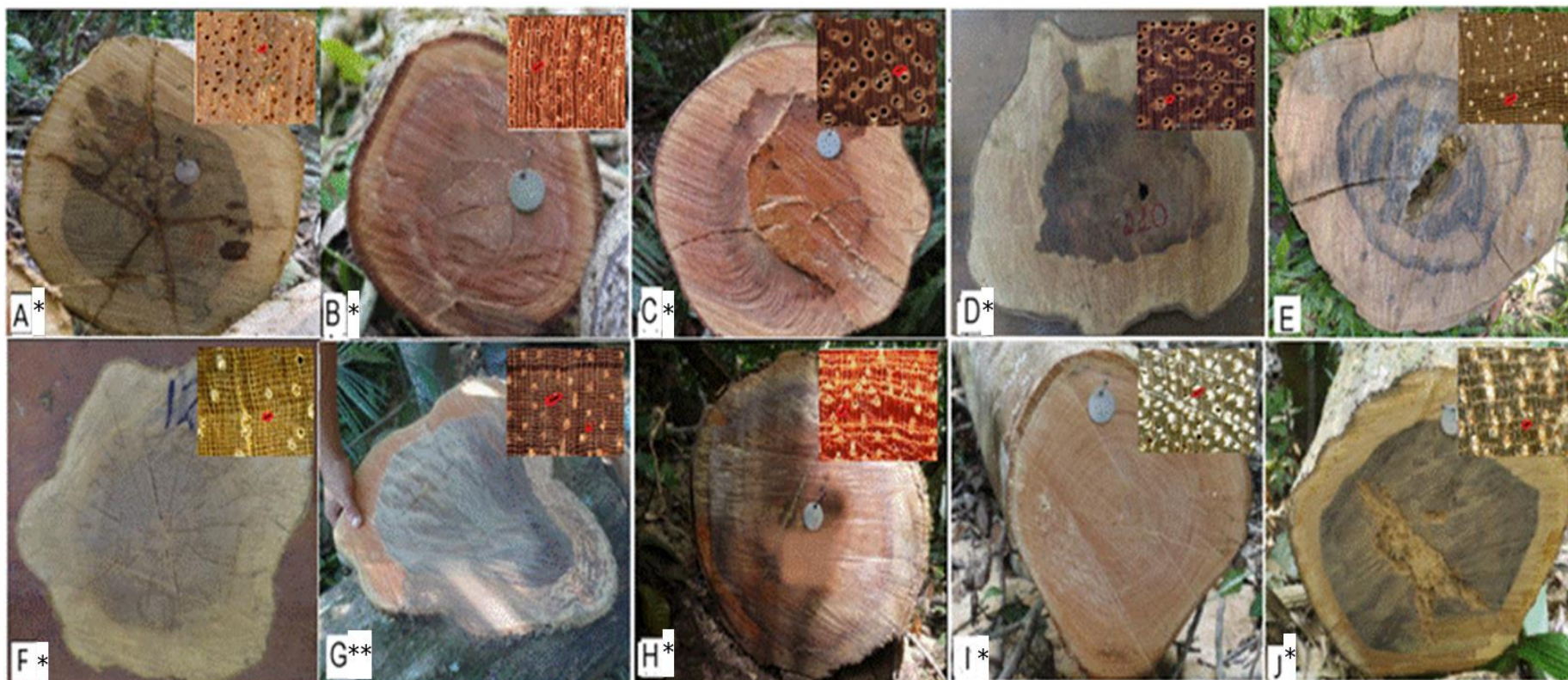
Material complementar (MC)

MC1. Dados dendrológicos das espécies utilizadas no estudo.*

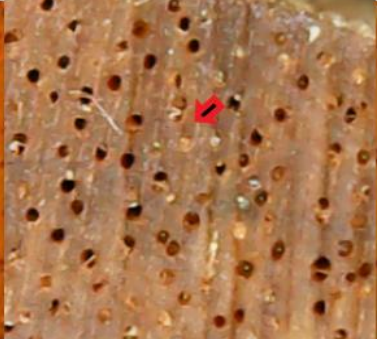
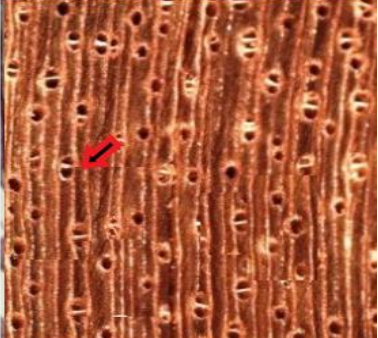
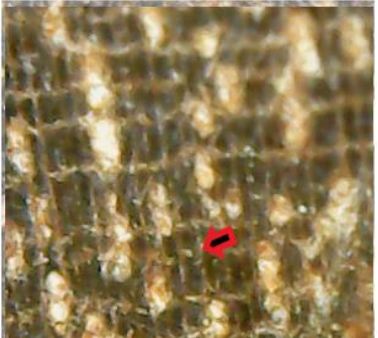


Família Nome científico/Nome popular	DAP** (cm)	Altura* (m)	Observações gerais
Burseraceae			
<i>Protium puncticulatum</i> J. F. Macbr. (Breu-vermelho)	34,65	11,75	Tronco retilíneo, cerne/alburno distintos, coloração castanho-claro (alburno) a escuro (cerne), anéis de crescimento pouco distintos e porção de manchas de óleos-resina.
<i>Protium tenuifolium</i> (Engl.) Engl. (Breu-vermelho)	33,75	10,55	Tronco retilíneo, cerne/alburno distintos com maior porção de cerne, coloração castanho-claro (alburno) a castanho-avermelhado (cerne) e anéis de crescimento distintos.
Euphorbiaceae			
<i>Micrandropsis scleroxylon</i> W. Rod. (Piãozinho)	36,14	18,00	Tronco retilíneo, cerne/alburno distintos com maior porção de cerne, onde observa-se a presença de brocagem, a coloração do alburno é castanho-claro e cerne castanho-escuro, anéis de crescimento difíceis de visualizar.
Lecythidaceae			
<i>Eschweilera coriacea</i> (DC.) Mart. ex Berg. (Matá-matá branco)	47,55	10,55	Tronco retilíneo com presença de lenticelas e frequentemente com sapopemas, onde observa-se a presença de oco, cerne/alburno distintos com coloração castanho-claro no alburno e castanho-escuro no cerne, anéis de crescimento indistintos e gosto amargo.
<i>Eschweilera odora</i> (Poepp.) Miers. (Matá-matá)	35,34	10,97	Tronco com sapopemas, cerne/alburno pouco distintos, mas sendo possível distinguir porções castanho-claro a parte externa e castanho-cinza na parte interior e anéis de crescimento difíceis de visualizar
<i>Eschweilera truncata</i> A.C.Sm. (Matá-matá amarelo)	25,75	9,35	Tronco com sapopemas, cerne/alburno distintos com maior porção de cerne, a coloração do alburno é castanho-avermelhado e cerne castanho-escuro, e anéis de crescimento pouco distintos.
Fabaceae			
<i>Inga alba</i> (Sw.) Willd. (Ingá-branca)	41,80	13,75	Tronco: retilíneo/arqueado, cerne/alburno pouco distinto, coloração castanho-avermelhado a branco amarelado e anéis de crescimento distintos.
<i>Inga paraensis</i> Ducke (Ingá-vermelha)	43,00	8,20	Tronco retilíneo, cerne/alburno distintos, com cerne castanho escuro e alburno amarelo-castanho e anéis de crescimento distintos.
<i>Swartzia recurva</i> Poepp. (Muirajibóia)	31,40	12,40	Tronco cilíndrico tortuoso, cerne/alburno distinto com maior porção cerne, coloração castanho claro a castanho-avermelhado e anéis de crescimento pouco distintos
Malphiaceae			
<i>Byrsonima crispa</i> A. Juss. (Murici)	31,64	10,40	Tronco retilíneo cerne/alburno indistintos com coloração castanho-claro e anéis de crescimento distintos.

* Dados da Pesquisa ** média três indivíduos

MC2. Visão geral do corte transversal dos troncos das árvores de pequenos diâmetro: A – Breu vermelho 1; B - Breu vermelho 2; C - Ingá-branca; D - Ingá-vermelha; E – Matá-matá branco; F - Matá-matá; G - Matá-matá amarelo; H – Muirajibóia; I - Murici; J – Piãozinho.



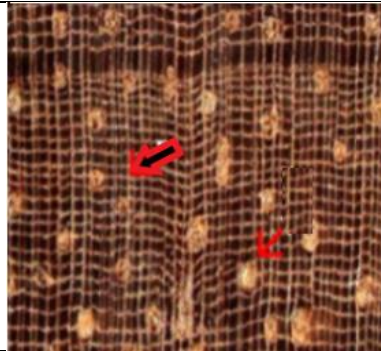
MC3. Observações dos traços anatômicos das espécies estudadas.

Família/Espécies/ Caracteres anatômicos	Corte transversal (10-20X)
<p>Burseraceae</p> <p><i>Protium puncticulatum</i></p> <p>Porosidade difusa uniforme, vasos de tamanho médio, solitários alguns obstruídos por resina, parênquima pouco visível (apotraqueal), raios pouco distintos a olho nu.</p>	
<p><i>Protium tenuifolium</i></p> <p>Porosidade difusa, vasos de tamanho médio, solitários e múltiplos, alguns obstruídos por resina, parênquima apotraqueal difuso, raios distinto e espesso.</p>	
<p>Euphorbiaceae</p> <p><i>Micrandropsis scleroxylon</i></p> <p>Porosidade difusa, vasos de tamanho grande, múltiplos e obstruídos por tilose/resina, parênquima paratraqueal em linhas reticuladas, raios distintos.</p>	
<p>Lecythidaceae</p> <p><i>Eschweilera coriacea</i></p> <p>Porosidade difusa, vasos pequenos e solitários, alguns agrupados e obstruídos por tilose, parênquima paratraqueal em linhas finas, raios muito finos.</p>	
<p><i>Eschweilera odora</i></p> <p>Porosidade difusa, vasos solitários e alguns e obstruídos por tilose, parênquima paratraqueal em linhas finas, raios muito finos</p>	

CONT.

Eschweilera truncata

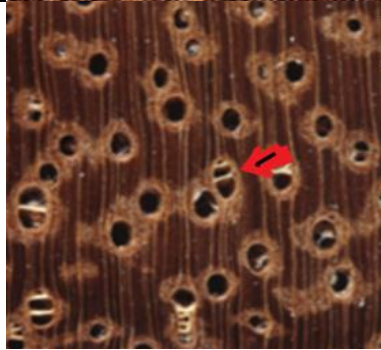
Porosidade difusa, vasos e alguns múltiplos de dois com obstrução por tilose, parênquima paratraqueal em linhas finas, raios muito finos



Fabaceae

Inga alba

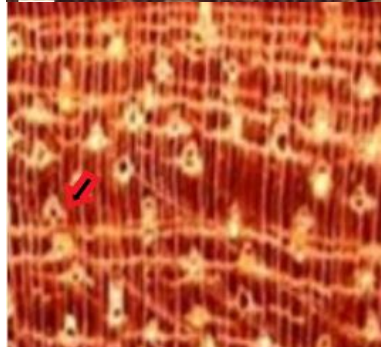
Porosidade difusa uniforme, vasos grandes múltiplos, parênquima paratraqueal vasicêntrico, aliforme confluyente, raios finos.

*Inga paraensis*

Porosidade difusa, vasos médios a grandes, parênquima paratraqueal aliforme e alguns confluentes, raios finos.

*Swartzia recurva*

Porosidade difusa, vasos médios e alguns obstruídos por tilose, parênquima paratraqueal escalariforme, alguns losangular, raios finos



Malpigiaceae

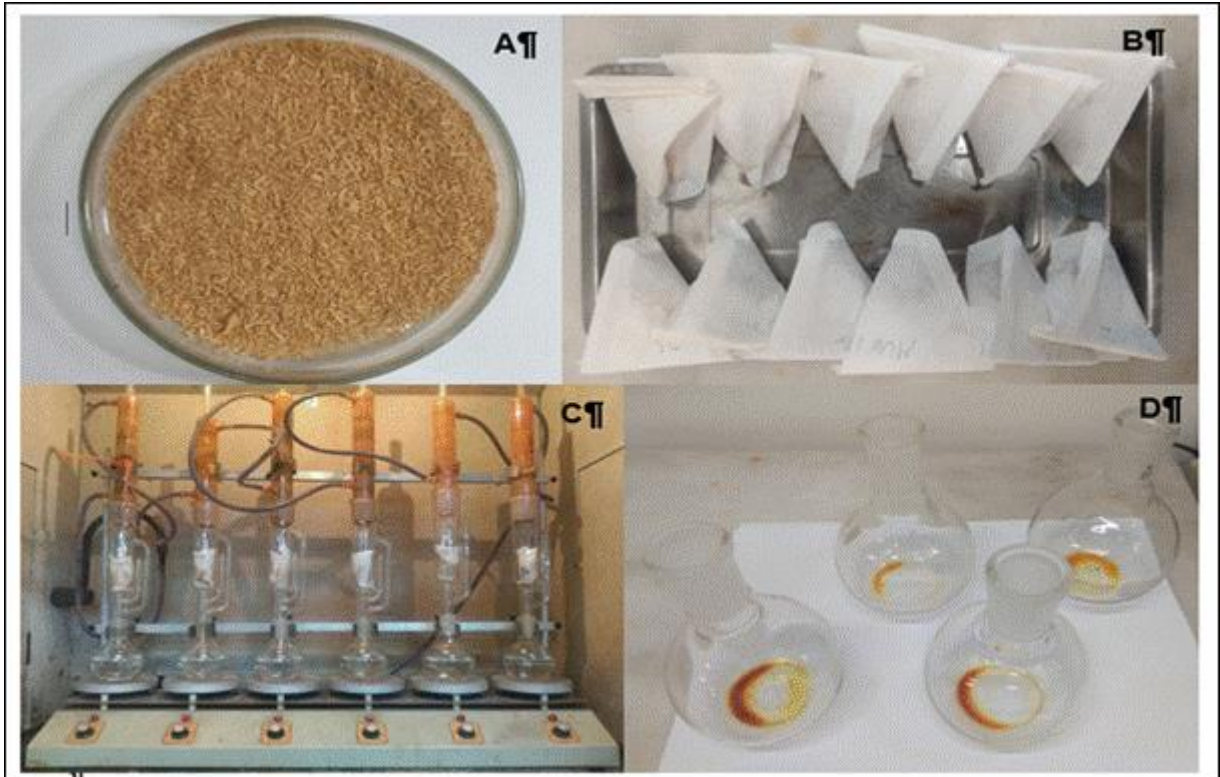
Byrsonima crispera

Porosidade difusa, vasos de tamanho grande, solitários e obstruídos por tilose, parênquima apotraqueal indistintos, raios distintos.



* Dados da Pesquisa

MC4A. Visão geral quantificação dos extrativos: A – serragem; B – cartuchos com as amostras; C- extração em sistema Soxhlet e D – balão com extratos solubilizados em etanol-tolueno.*

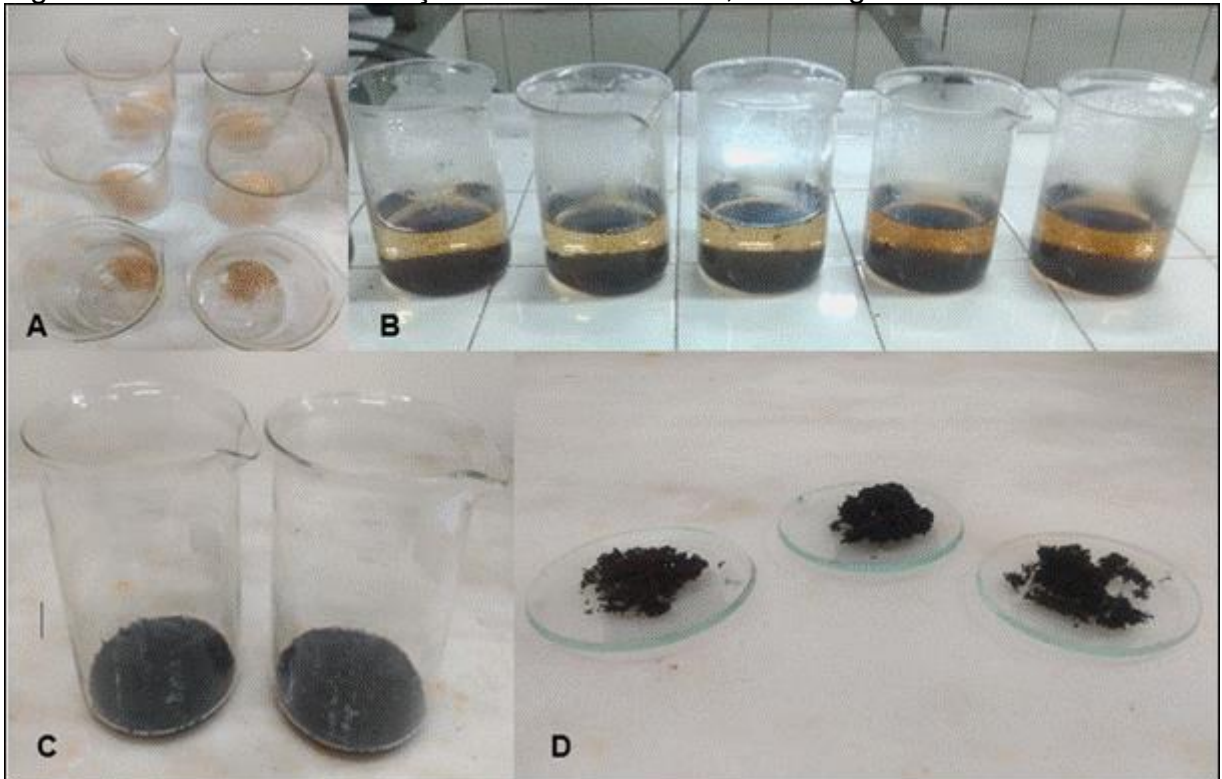


MC4B. Visão geral quantificação da solubilidade em água quente: A – amostras resultantes da extração etanol-tolueno e B – banho-Maria utilizado nesta análise.*

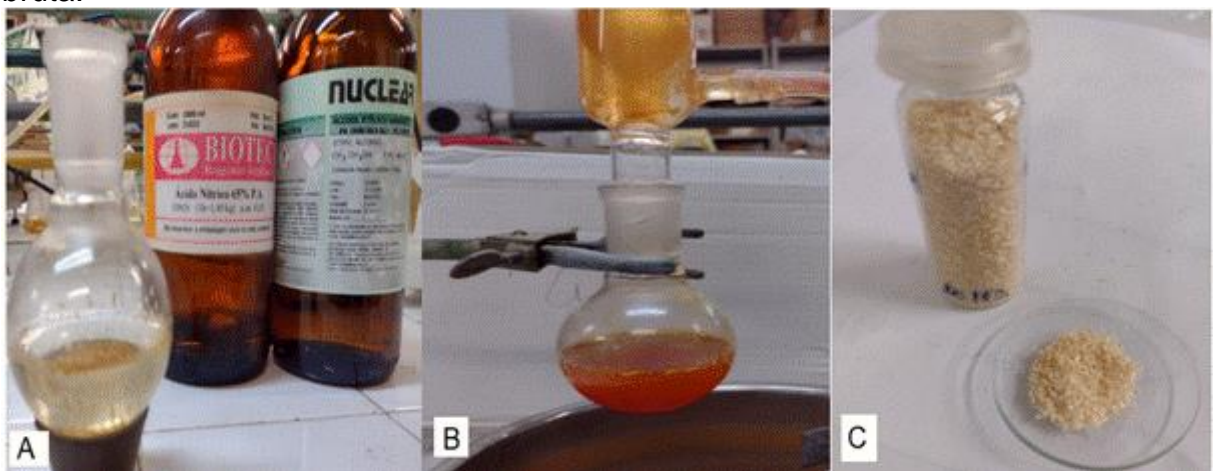


* Dados da Pesquisa

MC4C. Visão geral quantificação da lignina: A – amostras livre de extrativos; B – digestão da madeira em solução de ácido sulfúrico; C e D lignina insolúvel.*

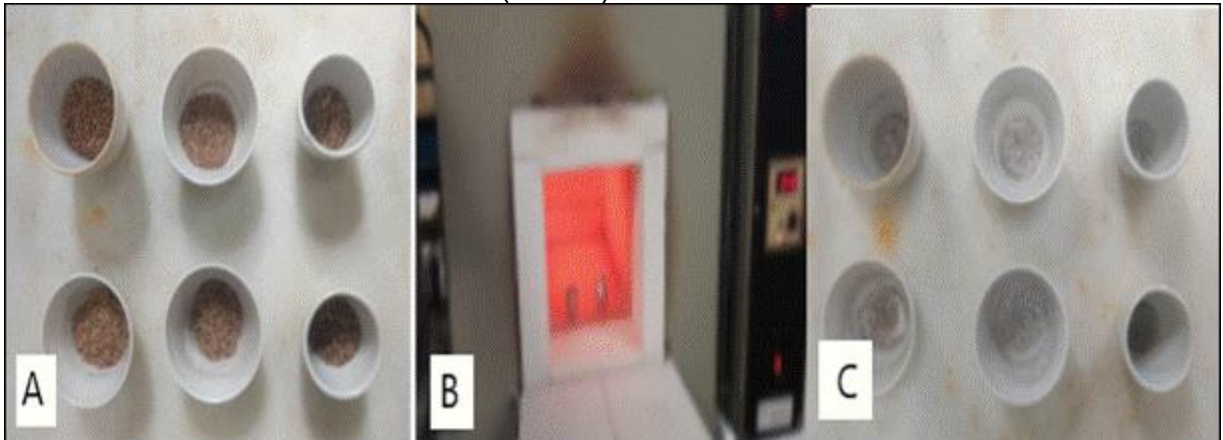


MC4D. Visão geral quantificação da celulose bruta: A – amostras livre de extrativos e reagentes; B – reação de nitro-alcoólica no processo de branqueamento e C celulose bruta.*

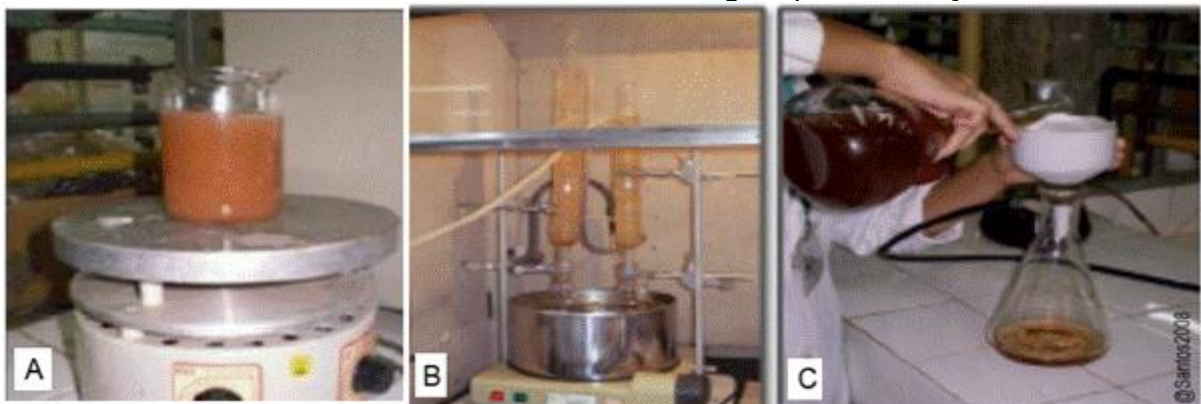


* Dados da Pesquisa

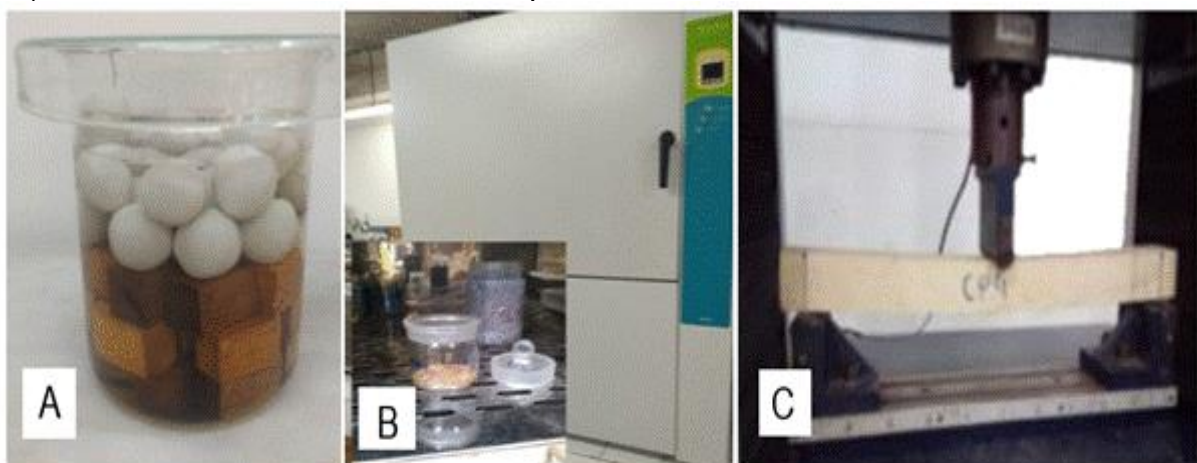
MC4E. Visão geral quantificação das cinzas: A – amostras in natura; B – mufla e C – cadinhos com resíduo mineral fixo (cinzas).*



MC4F. Visão geral quantificação dos taninos e polifenóis totais: A – solução extrativa mãe; B – refluxo com formaldeído e HCl e C – filtragem para obtenção de taninos.*

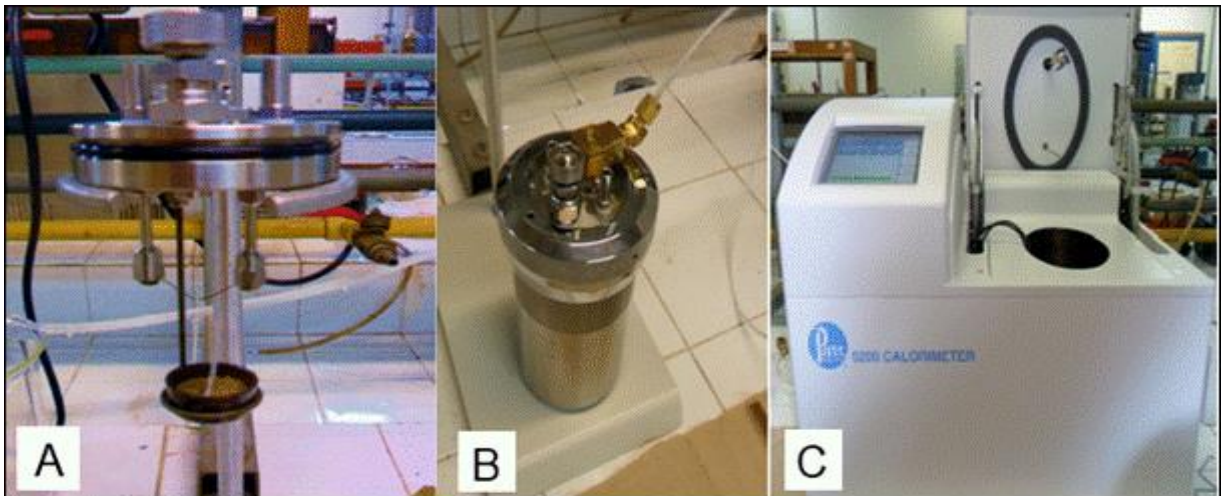


MC5A. Visão geral dos ensaios físico-mecânicos: A – amostras saturadas para a determinação da Db; B – amostras sendo secas dentro do pesa-filtro em e estufa (100 °C) e C – teste de resistência em máquina universal.*



* Dados da Pesquisa

MC5B. Visão geral quantificação do PCS: A – cadinho com amostra; B – bomba sendo abastecido com O₂ e C - calorímetro.*



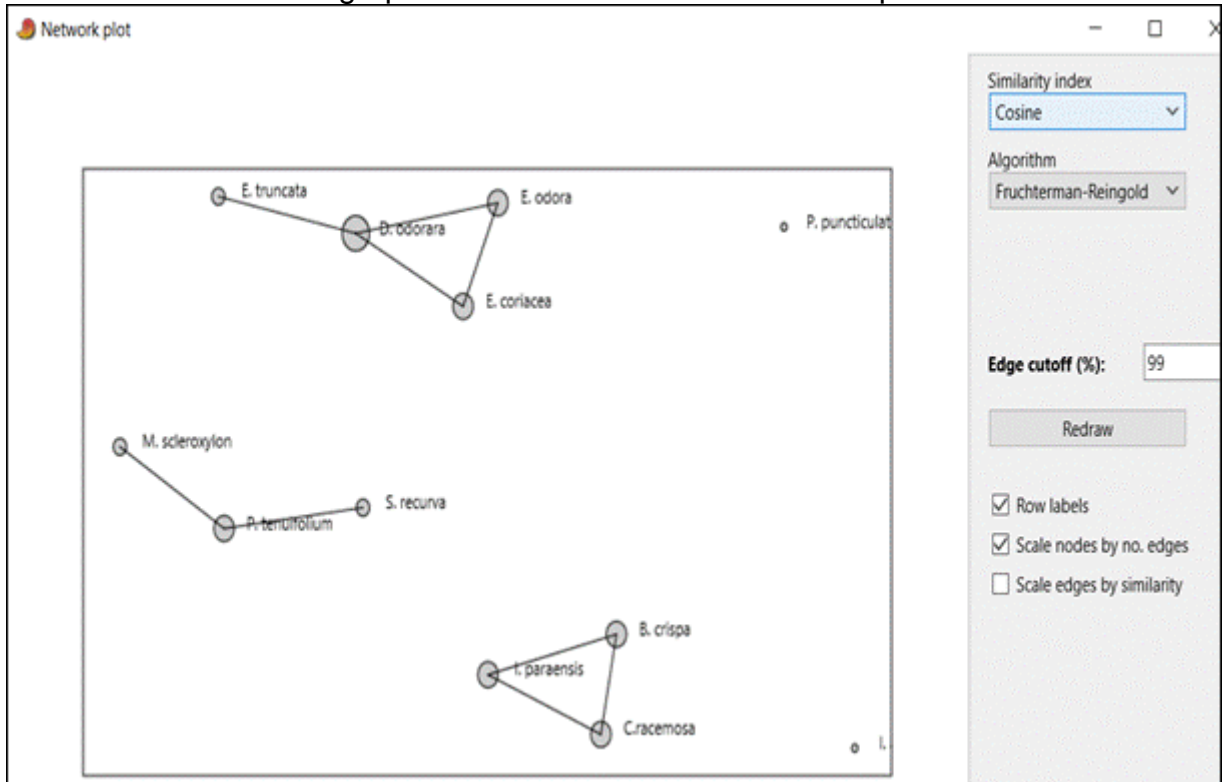
MC6. Resultado da análise de variância das propriedades químicas, físicas e mecânicas das diferentes madeiras estudadas.*

Variáveis	SQ	QM	F	p
Extrativos (etanol-tolueno)	51,5016	5,7224	7,1900	0,0001
Polifenóis totais	18,5853	2,0650	161,4572	0,0000
Sol. em água quente	219,7110	24,4123	42,7900	0,0002
Lignina	116,9553	12,9950	19,0094	0,0000
Celulose bruta	651,1900	72,3544	15,5600	0,0004
Cinzas	1,1773	0,1308	17,5100	0,0030
Umidade	10,9253	1,2139	8,4908	0,0003
PCS	1,2653	14,0597	31,7800	0,0001
Db	0,3406	0,0378	9,6048	0,0000
MOE	166,8415	18.537,9500	20,6519	0,0020
MOR	18.573,8100	2.063,7570	37,6596	0,0005

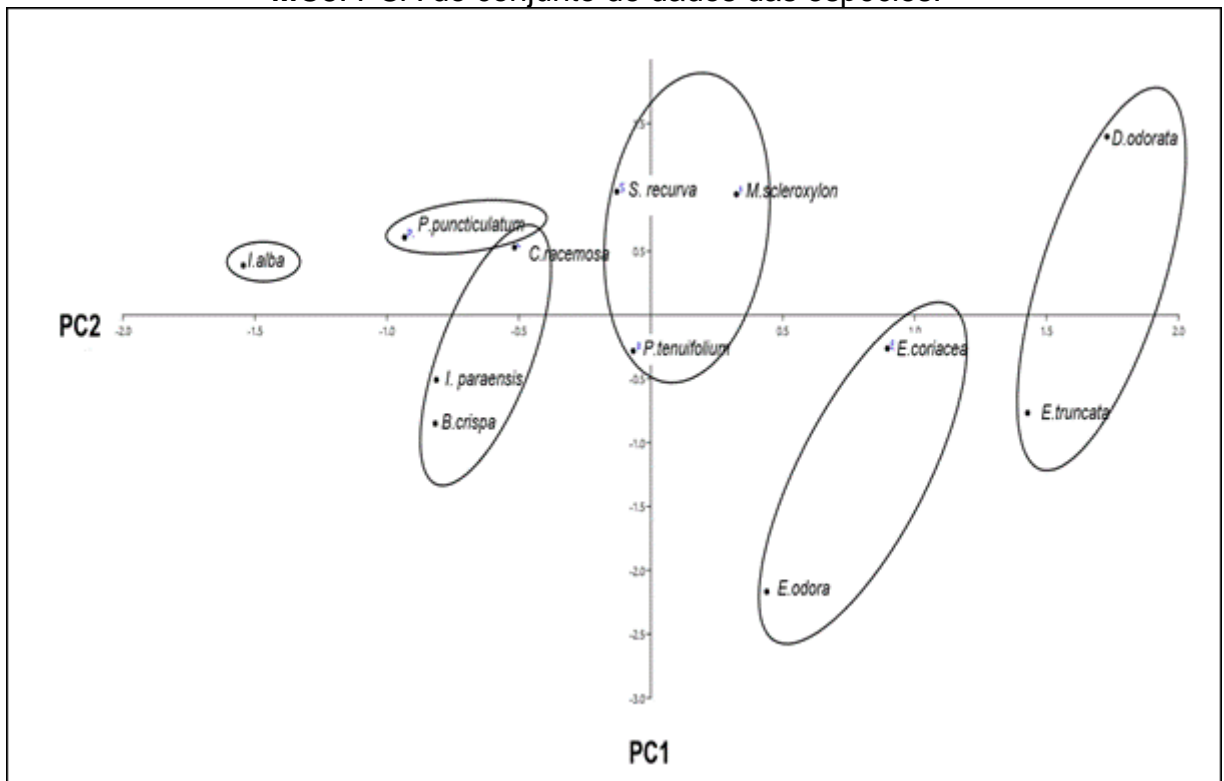
PCS = Poder calorífico superior, Db = Densidade básica, MOE = Módulo de elasticidade e MOR = Módulo de ruptura.

* Dados da Pesquisa

MC7. Agrupamento em rede de dados das espécies.*



MC8. PCA do conjunto de dados das espécies.*



* Dados da Pesquisa

Capítulo 2

Nascimento, C.S.; Nascimento, C.C.; Araújo, R.D.; Soares, J.C.R. and Higuchi, N. Characterization of technological properties of matá-matá wood (*Eschweilera coriacea* (DC.) S.A. Mori, *E. odora* Poepp. (Miers) and *E. truncata* A.C. Sm.) by Near Infrared Spectroscopy. Publicado na revista *iForest* em agosto/2021.



Characterization of technological properties of matá-matá wood (*Eschweilera coriacea* [DC.] S.A. Mori, *E. odora* Poepp. [Miers] and *E. truncata* A.C. Sm.) by Near Infrared Spectroscopy

Cristiano Souza do Nascimento ⁽¹⁾,
Claudete Catanhede do
Nascimento ⁽²⁾,
Roberto Daniel de Araújo ⁽²⁾,
Jose Carlos Rodrigues Soares ⁽³⁾,
Niro Higuchi ⁽⁴⁾

The aim of this study was to determine the technological properties (chemical, mechanical and physical) of *Eschweilera* sp. woods using near infrared spectroscopy (NIRS). NIR spectroscopy proved to be efficient for chemical analysis (extractives, lignin and carbohydrates) and physical-mechanical testing (moisture content, basic density - BD, modulus of elasticity - MOE and modulus of rupture - MOR) of wood, providing a powerful tool for use in sustainable forest management activities in the Amazon. Wood samples from three trees of each *Eschweilera* species were collected from the Experimental Station of Tropical

**CARACTERIZAÇÃO DAS PROPRIEDADES TECNOLÓGICA DA MADEIRA DE
MATÁ-MATÁ (*Eschweilera coriacea* (DC.) S.A. Mori, *Eschweilera odora* Poepp.
(Miers) E *Eschweilera truncata* A.C. Sm.) POR ESPECTROSCOPIA NO
INFRAVERMELHO PRÓXIMO**

RESUMO

O objetivo do trabalho foi determinar as propriedades tecnológicas (físicas, mecânicas e químicas) de madeiras de *Eschweilera* utilizando espectroscopia no infravermelho próximo (NIR). A espectroscopia NIR é uma ferramenta que vem apresentando eficiência em análises químicas (carboidratos, extrativos e lignina) e testes físico-mecânicos (umidade, densidade, MOE e MOR) de madeira, sendo seu uso promissor em atividades do manejo florestal sustentável na Amazônia. Amostras de três árvores de cada espécie foram obtidas na Estação Experimental de Silvicultura Tropical/INPA/Brasil. Os corpos-de-prova foram confeccionados na área da seção transversal (20 x 20 x 30 mm), no sentido alburno-cerne. Espectros NIR (4.000-10.000 cm^{-1}) foram obtidos das amostras (umidade 12%) em Espectrômetro de infravermelho próximo por Transformada de Fourier. Os modelos PLS (Partial Least Squares regression) de predição das propriedades físicas, mecânicas e químicas de madeiras amazônicas foram utilizados na quantificação. Os resultados dos extrativos totais (tolueno e etanol) e solubilidade em água quente apresentaram concentração máxima de 7,66% e 3,13% para *Eschweilera odora* (matá-matá amarelo). Nestes materiais encontram-se diversos compostos de baixo peso molecular, como resinas, gomas, terpenos, alcalóides, flavonóides, taninos, entre outros. Para as substâncias fenólicas (taninos), a maior concentração foi encontrada para *E. truncata* - matá-matá preto (10,00%). Os macrocomponentes (metabolismo primário) das espécies de *Eschweilera* variaram de 44,20-46,33% para a celulose e de 28,89-31,21% para lignina. Os compostos minerais (cinzas) foram quantificados em concentrações < 0,70%. Os resultados da previsão das propriedades físicas e mecânicas da madeira matá-matá estão na faixa padrão para madeiras tropicais. O PCS (poder calorífico superior) variou de 4.993-5.033 cal/g e a Db (densidade básica) de 0,78-0,88 g/cm^3 . Quanto à umidade, o maior teor foi observado para *E. truncata* (13,46%). Os valores da resistência mecânica ficaram na faixa de 14.253-17.447 MPa MOE (módulo de elasticidade) e 146,04-175,73 MPa MOR (módulo de ruptura), sendo as maiores resistências atribuídas à madeira de *E. truncata*. Os valores encontrados para as

propriedades tecnológicas das madeiras de *Eschweilera coriacea* (matá-matá branco), *Eschweilera odora* (matá-matá amarelo) e *Eschweilera truncata* (matá-matá preto) também foram compatíveis com os obtidos pelas determinações destrutivas de espécies tropicais e também para outras espécies de *Eschweilera*.

Palavras-Chave: *Eschweilera*, madeiras amazônicas, química da madeira, propriedades físico-mecânicas, espectroscopia NIR e Manejo florestal.

CHARACTERIZATION OF TECHNOLOGICAL PROPERTIES OF MATÁ-MATÁ WOOD (*Eschweilera coriacea* (DC.) S.A. Mori, *Eschweilera odora* Poepp. (Miers) and *Eschweilera truncata* A.C. Sm.) BY NEAR INFRARED SPECTROSCOPY

ABSTRACT

The aim of this study was to determine the technological properties (chemical, mechanical, and physical) of *Eschweilera* woods using near infrared spectroscopy (NIRS). NIR spectroscopy is a tool that has been shown to be efficient for chemical analysis (carbohydrates, extractives and lignin) and physical-mechanical testing (moisture content, basic density - BD, modulus of elasticity – MOE and modulus of rupture - MOR) of wood, providing a promising tool for use in sustainable forest management activities in the Amazon. Samples of three trees of each species were obtained from the Experimental Station of Tropical Forestry/INPA/Brazil. Specimens were extracted from the cross-sectional area (20 × 20 × 30 mm), in the direction sapwood-heartwood. NIR spectra (4.000-10.000 cm⁻¹) were then obtained from the samples (moisture 12 %) using Fourier-transform spectrometry. The Partial Least Squares (PLS) regression prediction models for the chemical, mechanical and physical properties of Amazonian woods were used for quantification. The results for total extractives (toluene and ethanol) and hot water solubility showed a maximum concentration of 7.66 % and 3.13 % for *Eschweilera odora* (yellow matá-matá). These materials contain several compounds with low molecular weight, such as resins, gums, terpenes, alkaloids, flavonoids, and tannins, among others. The highest concentration of phenolic substances (tannins) was found in *E. truncata*, black matá-matá (10.00 %). The macrocomponents (primary metabolism) of *Eschweilera* species were in the range of 44.20-46.33 % for cellulose and 28.89-31.21 % for lignin. Mineral compounds (ash)

were quantified in concentrations < 0.70 %. The predictive results for the physical and mechanical properties of matá-matá wood are in the standard range for tropical woods. The higher calorific value (HCV) varied from 4,993-5,033 cal/g and the BD from 0.78 - 0.88 g/cm³. As for moisture, the highest content was observed for *E. truncata* (13.46 %). Values for mechanical resistance were in the range of 14,253-17,447 MPa MOE and 146.04-175.73 MPa MOR, with the greatest strength attributed to *E. truncata* wood. The values obtained for the technological properties of the woods of *Eschweilera coriacea* (white matá-matá), *Eschweilera odora* (yellow matá-matá) and *Eschweilera truncata* (black matá-matá) were compatible with those obtained by destructive determination of tropical species and also for other species of *Eschweilera*.

Keywords: *Eschweilera*, Amazonian woods, Wood chemistry, Physico-mechanical properties, NIR spectroscopy and Forest management.

INTRODUÇÃO

A floresta amazônica é considerada um dos maiores produtores de madeira tropical do mundo, e no final de 2014 sua produção era de cerca de 31 milhões de m³ provenientes dos estados do Acre, Amazonas, Mato Grosso e Pará - Brasil (OIMT 2015). Esse cenário seria satisfatório se essa produção fosse originada de Planos de Manejo Florestal Sustentável (PMFS), que combinam a exploração planejada, em princípios legais, econômicos e ecológicos (Balboni *et al.* 2018). Neste nível, 6.000 espécies vegetais foram catalogadas com hábito arbóreo, porém as espécies comerciais são limitadas a um número de 100 (Garcia *et al.* 2012).

A exploração seletiva na Amazônia das chamadas “madeiras comerciais” está restrita a uma dezena de espécies de grande diâmetro, o que pode gerar em um futuro próximo a escassez de alguns indivíduos. Por outro lado, espécies com grande abundância e baixo diâmetro padrão são relegadas a segundo plano, visto que seu potencial de uso e indicação para mercados ainda não é conhecido (Frões *et al.* 2019). Muitas dessas espécies são adequadas para o manejo florestal e não são comercializadas por falta de conhecimento de suas propriedades, como *Eschweilera* sp. e *Couratari stellata* (Lecythidaceae), *Bixa arborea* (Bixaceae), *Helicostylis pedunculata* (Moraceae), *Inga* sp. e *Tachigali chrysophylla* (Fabaceae) entre outras

(Balboni *et al.* 2018; Freitas e Vasconcellos 2019).

As madeiras conhecidas na Amazônia como matá-matá (*Eschweilera* sp.) são abundantes, amplamente distribuídas em várias regiões da floresta amazônica, mas existem grandes lacunas no conhecimento de suas características tecnológicas. Entender a relação entre essas características é importante para reconhecer qual combinação de propriedades da madeira é a mais adequada para usos específicos (Nascimento *et al.* 2019; Fróes *et al.* 2019).

A caracterização tecnológica é fundamental para a indicação/utilização da madeira, principalmente quando se pretende introduzir espécies novas ou pouco conhecidas no mercado, permitindo uma gama de opções e agregando valor à madeira nova. Nesse processo, a avaliação das propriedades da superfície, umidade, densidade, potencial energético, teor de sílica, cor, cheiro, proteção biológica, entre outras são recursos de obtenção de informações, a fim de recomendar o melhor uso dessa matéria-prima (Varejão *et al.* 2012a; Fernandes *et al.* 2017).

A estimativa da qualidade da madeira é suportada por metodologias confiáveis, portanto as inferências são válidas. As ferramentas de avaliação das propriedades da madeira estão em constante evolução e são orientadas pela busca de métodos mais rápidos, precisos e de menor custo para o conhecimento desse material (Liu *et al.* 2007). A avaliação não destrutiva da madeira permite estimar propriedades tecnológicas importantes sem alterar sua estrutura, preservando o material, portanto, não comprometendo seu uso. Na maioria das vezes, os métodos não destrutivos baseiam-se na investigação de correlações e ajustes de modelos de calibração entre as propriedades de interesse e outras mais fáceis de medir, o que também os caracteriza como métodos indiretos (Bieker e Rust 2010).

Uma das ferramentas não destrutivas que vem ganhando espaço na pesquisa e na indústria de controle de qualidade é a espectroscopia no infravermelho próximo (NIRS), que permite correlacionar os espectros com diversas propriedades da madeira, sendo esta técnica considerada robusta, pois combina modelagem matemática com química (quimiometria), associando as propriedades físicas, mecânicas e biológicas do material madeira (Varejão *et al.* 2012a; Tsuchikawa e Schwanninger 2013; Mancini *et al.* 2019). Acredita-se que a metodologia NIRS seja a principal ferramenta na caracterização tecnológica da madeira que pode ser aplicada com segurança e rapidez no manejo florestal sustentável na Amazônia. Diante disso, o trabalho teve como objetivo determinar as propriedades físicas, mecânicas e

químicas de madeiras de matá-matá (*Eschweilera coriacea* (DC.) SA Mori, *Eschweilera odora* Poepp. (Miers) e *Eschweilera truncata* AC Sm.) utilizando a espectroscopia de infravermelho próximo - NIR.

MATERIAL E MÉTODOS

Área de estudo

A pesquisa foi realizada com espécies de floresta secundárias de terra-firme, localizada na Estação Experimental de Silvicultura Tropical de propriedade do INPA/Brasil ZF-2 (02 ° 35'55,5 "S e 60 ° 02'14,8" W), no km 23 (Figura 1), com acesso no km 50 pela rodovia BR-174 (Manaus-Boa Vista). Em uma parcela de 1 hectare (sub-parcelas de 100 x 4, 25 m) foram inventariadas 128 árvores de diferentes espécies, com destaque para as espécies de *Eschweilera*, gênero dominante na região (Amazônia Central) e promissor para indicação comercial. Nove árvores foram selecionadas aleatoriamente para exploração, com base nas características de proximidade entre indivíduos da mesma espécie, como diâmetro da altura do peito (DAP) e altura comercial. Esses indivíduos foram incluídos na classe de diâmetro de 25 cm ≤ DAP ≤ 50 cm e também foram realizadas análises visuais do estado de sanidade de cada árvore. Discos de 10 cm espessura no DAP de três indivíduos de cada espécie, *Eschweilera coriacea* (matá-matá branco), *E. odora* (matá-matá amarelo) *E. truncata* (matá-matá preto), foram obtidos, e confeccionados corpos de prova (20 x 20 x 30 mm) na seção transversal, no sentido do alburno. Dez corpos de prova foram extraídos de cada indivíduo para obter os espectros NIR. Amostras de cada indivíduo foram enviadas ao Laboratório de Anatomia da Madeira - COTI/INPA para confirmação da identificação em campo.

Procedimentos analíticos

Os espectros na região do infravermelho próximo foram obtidos dos corpos-de-prova (U = 12%), nos planos radial e tangencial, utilizando um espectrômetro de infravermelho próximo com transformada de Fourier - FT-NIR (Termo Fisher Scientific, model Antaris II). O sistema usa o software Result Integration que opera na faixa de 4.000 a 10.000 cm⁻¹, com 16 varreduras e resolução de 8 cm⁻¹. Em cada lado da amostra, três leituras foram feitas para obter um espectro médio que representa a

amostra (Nascimento *et al.* 2017).

Modelos PLS (Partial Least Squares regression) foram desenvolvidos por Nascimento e Varejão (2012) e Nascimento *et al.* (2016) para prever as propriedades químicas, físicas e mecânicas das madeiras amazônicas. Esses modelos são baseados na correlação dos espectros NIR (madeira) com resultados de testes pelo método tradicional (metodologia destrutiva), utilizando o software TQ Analyst™. Assim, todos os resultados obtidos posteriormente para as propriedades da madeira tornam-se não destrutivos, ou seja, o espectro NIR da madeira é obtido e correlacionado com os dados quimiométricos, uma semelhança do novo espectro está associada ao conjunto de dados.

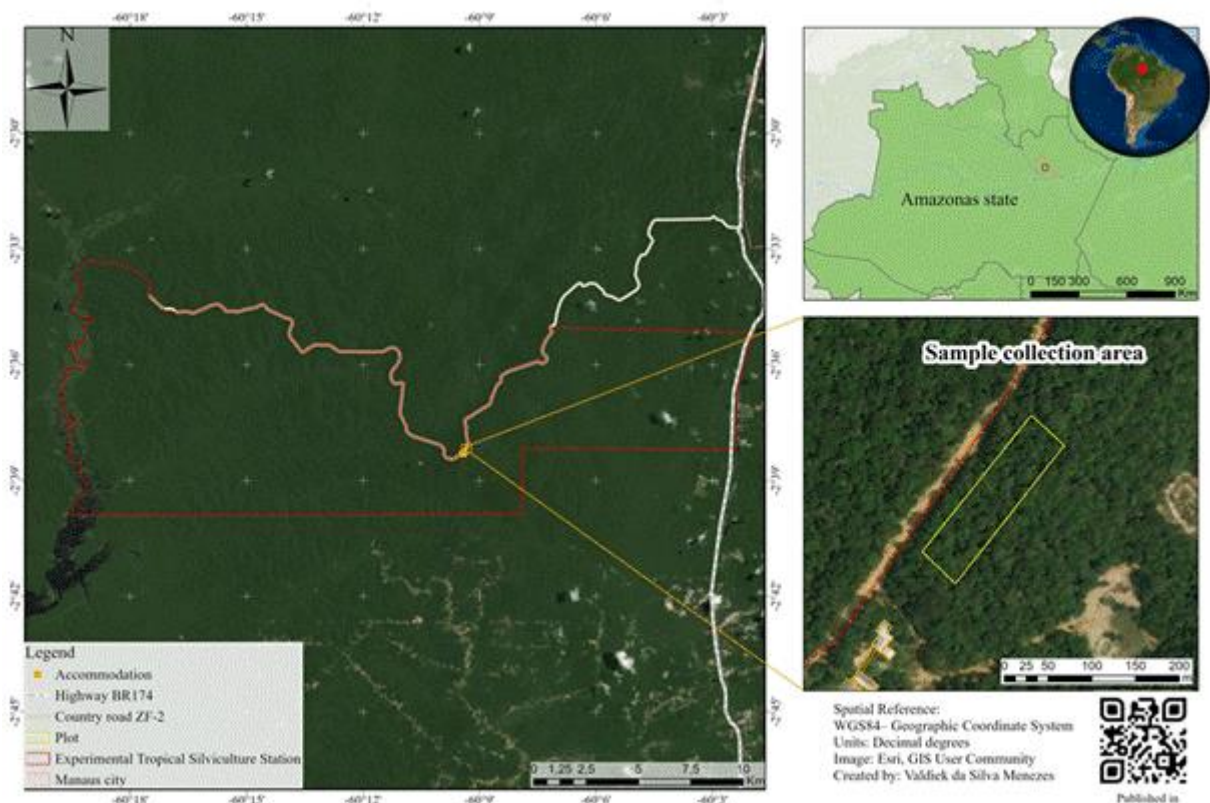


Figura 1. Localização geográfica da área de coleta das amostras.

O conjunto de dados (espectro NIR x valor de referência) é separado em dois grupos, o primeiro para calibrar a equação (dados 2/3) e o segundo para validar o modelo (dados 1/3). Os modelos testados são compostos por um conjunto de dados brutos, com tratamento matemático de 1ª e 2ª derivada e também a aplicação ou não dos filtros. A Tabela 1 mostra os parâmetros quimiométricos utilizados nos modelos

preditivos de propriedades tecnológicas, a partir de 1.200 amostras distribuídas em 40 espécies de madeiras da floresta amazônica, onde cada espécie é representada por três indivíduos e 10 amostras.

Tabela 1. Modelos NIR utilizados para estimativa das propriedades tecnológicas das madeiras de *Eschweilera*.

Modelos	Tratamento /filtro	Banda espectral (cm ⁻¹)	N° de amostras	Rc ²	RMSEC	RMSEP	RPD	Incerteza %	Faixa padrão
Extrativos	2ª derivada Norris	7.500–4.540	120	0,99	0,09	0,42	4,09	0,82	1,08–17,30%
Polifenóis totais	2ª derivada Norris	6.100–5.900	120	0,95	2,48	5,68	4,66	9,06	0,13–13,60%
Água quente	2ª derivada Norris	7.500–4.540	120	0,98	0,68	0,07	3,22	0,12	0,17–13,90%
Lignina	2ª derivada Norris	6.070–5.000	60	0,99	0,46	5,43	3,01	10,04	21,56–44,35 %
Celulose	2ª derivada Norris	5.000–4.000	60	0,99	0,12	3,85	3,05	4,55	35,00–54,85 %
Cinzas	2ª derivada Savitzky-Golay	8.450–7.300	120	0,97	0,11	0,47	5,01	0,61	0,04–3,00%
Umidade	2ª derivada Norris	6.070–5.500	60	0,99	0,15	1,30	3,53	1,40	10,14–15,51 %
Poder calorífico superior	1ª derivada Savitzky-Golay	7.450–4.090	90	0,94	49,30	62,40	3,99	4,01	4.000–5.263 cal/g
Densidade básica	Sem tratamento	10.000–4.000	64	0,91	0,07	0,10	3,69	11,02	0,40–1,00 g/cm ³
Módulo de elasticidade	1ª derivada Savitzky-Golay	5.360–4.000	120	0,90	1.250	1.910	4,09	4,36	7.060–19.420 MPa
Módulo de ruptura	2ª derivada Savitzky-Golay	6.020–5.075	120	0,89	16,10	28,00	5,82	12,20	46,68–200,42 MPa

Rc² = Coeficiente de determinação da calibração; RMSEC = Erro quadrado médio de calibração, RMSEP = Erro quadrado médio de predição; RPD = Desempenho/Performance.

Todos os modelos foram construídos a partir de dados originais obtidos pela metodologia tradicional relacionada a seguir:

- Determinação do teor de extrativos totais – etanol/tolueno (ASTM D1105/2021);
- Determinação do teor de taninos e polifenóis totais (Barbosa *et al.* 2006);
- Determinação da solubilidade em água quente (ASTM D1110/2021);
- Determinação do teor de lignina (ASTM D1106/2021);

- Determinação do teor celulose bruta (Halward e Sanchez 1975);
- Determinação do teor de cinzas (ASTM D1102/2021);
- Determinação do teor de umidade (ASTM D2016/2021);
- Determinação do poder calorífico superior – PCS (ASTM D2015/2021);
- Determinação da densidade básica – Db (NBR 7190/1997);
- Determinação do módulo de elasticidade (MOE) e ruptura (MOR) na flexão estática (COPANT 555/1973).

Análise estatística

Os espectros NIR das madeiras matá-matá (total de 90 amostras) foram aplicados em diferentes modelos para a predição das propriedades físicas, mecânicas e químicas e os resultados obtidos foram submetidos à análise estatística, para obtenção das médias, mínimas e valores máximos, bem como análise de variância e teste de normalidade. Quando $p \leq 0,05$ indicou a ocorrência de diferença estatisticamente significativa na propriedade avaliada, foi aplicado o teste de *Tukey* (PAST Versão 2.17c). Ao final, foi realizada uma matriz de correlação entre as propriedades previstas. Para isso, os dados que não atendiam à premissa de normalidade sofreram as seguintes transformações nos dados, Log_{10} , Raiz quadrada e Box Cox para atender ao pressuposto da análise de correlação de *Pearson*. Para as variáveis que, mesmo com as transformações, não atendiam ao pressuposto de normalidade, foram realizadas correlações de *Spearman*. Essas análises foram realizadas por meio do software estatístico R (R).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Caracterização química

A elucidação das características químicas da madeira fornece base para a interpretação das propriedades no contexto da engenharia, para melhor compreender as potencialidades e limitações desta matéria-prima. Os resultados da estimativa das propriedades tecnológicas das madeiras de matá-matá são apresentados nas Tabelas 2 e 4, e a análise de variância nas Tabelas 3 e 5.

Os extrativos em solventes orgânicos (tolueno e etanol) e a solubilidade em água quente apresentaram concentração máxima de 7,66% e 3,13% para *Eschweilera*

odora (matá-matá amarelo), onde esses compostos somam mais de 10% na massa seca dessas espécies (Tabela 2). A análise de variância (ANOVA) foi aplicada aos resultados dos extrativos e não indicou a existência de diferença estatística entre as espécies ($p = 0,5599$) para a concentração de extrativos. Porém, para a solubilidade em água, a variância indica possível existência de diferenças nos valores médios entre as espécies $p = 0,0025$ (Tabela 3), o que foi confirmado pelo teste de *Tukey*, indicando que *E. odora* (2,76%) há diferença na concentração de *E. coriacea* - matá-matá branco (1,25%) e *E. truncata* - matá-matá preto (1,90%).

Tabela 2. Resultados das propriedades químicas das madeiras de *Eschweilera* por metodologia não destrutiva.

Matá-matá	%	Extrativos	Polifenóis totais	Água quente	Lignina	Celulose bruta	Cinzas
<i>Eschweilera coriacea</i>	Máximo	6,37	6,18	1,42	31,83	47,48	0,64
	Mínimo	5,55	5,77	0,93	30,57	44,81	0,41
	Média*	5,85a	5,92b	1,25b	31,14a	46,33a	0,49a
	DP	0,45	0,23	0,28	0,64	1,37	0,13
<i>Eschweilera odora</i>	Máximo	7,66	3,01	3,13	30,66	46,43	0,65
	Mínimo	5,81	1,63	2,81	24,88	43,46	0,42
	Média*	6,48a	2,09c	2,76a	28,89a	44,64a	0,55a
	DP	1,02	0,79	0,39	3,48	1,57	0,12
<i>Eschweilera truncata</i>	Máximo	6,45	10,00	2,14	31,67	45,73	0,71
	Mínimo	5,59	7,06	1,75	30,86	43,29	0,66
	Média*	6,08a	8,78a	1,90b	31,21a	44,20a	0,69a
	DP	0,44	1,53	0,21	0,42	1,33	0,03

* Valor médio de quatro repetições; DP = desvio padrão; médias seguidas da mesma letra não diferem estatisticamente pelo teste de *Tukey* ao nível de 5% de probabilidade.

Tabela 3. Resultado da análise de variância das propriedades químicas das diferentes madeiras de *Eschweilera*.

Variáveis	SQ	QM	F	p
Extrativos	0,6167	0,3083	0,6398	0,5599
Polifenóis totais	67,4644	33,7322	3,4435	0,0006
Água quente	3,4711	1,7355	19,1139	0,0025
Lignina	10,4790	5,2395	1,2402	0,3542
Celulose bruta	7,5783	3,7891	1,8514	0,2365
Cinzas	0,0622	0,0311	2,8426	0,1354

Kollmann e Cotê Junior (1968) e Silveira *et al.* (2013) afirmam que as propriedades físicas e mecânicas dependem do teor de umidade da madeira, esta

variável é inversamente proporcional a Db, PCS, MOE e MOR, ou seja, quanto maior a quantidade de água, maior a inter-relação das hidroxilas com as moléculas de celulose e hemicelulose, aumentando a instabilidade dimensional e defeitos nas peças de madeira, reduzindo o potencial energético, bem como a resistência biológica e mecânica da madeira. A análise estatística indicou a formação de dois grupos de umidade: O menor (*E. coriacea* e *E. odora*) e o maior teor (*E. truncata*), onde dentro desta faixa, Silva *et al.* (2014) observou um nível de umidade de 12,16-14,22% ao aplicar a espectroscopia no infravermelho próximo (NIR) para prever esta propriedade de resíduos de madeira da Amazônia.

Metabólitos secundários podem ser encontrados na lamela média, células parenquimáticas e vasos no tecido do xilemático. Na Figura 2 são apresentados os aspectos anatômicos das três espécies de *Eschweilera* estudadas, onde se observa a semelhança do parênquima paratraqueal vasicêntrico e em linhas (P) e vasos solitários (V) obstruídos por substâncias orgânicas (extrativos).

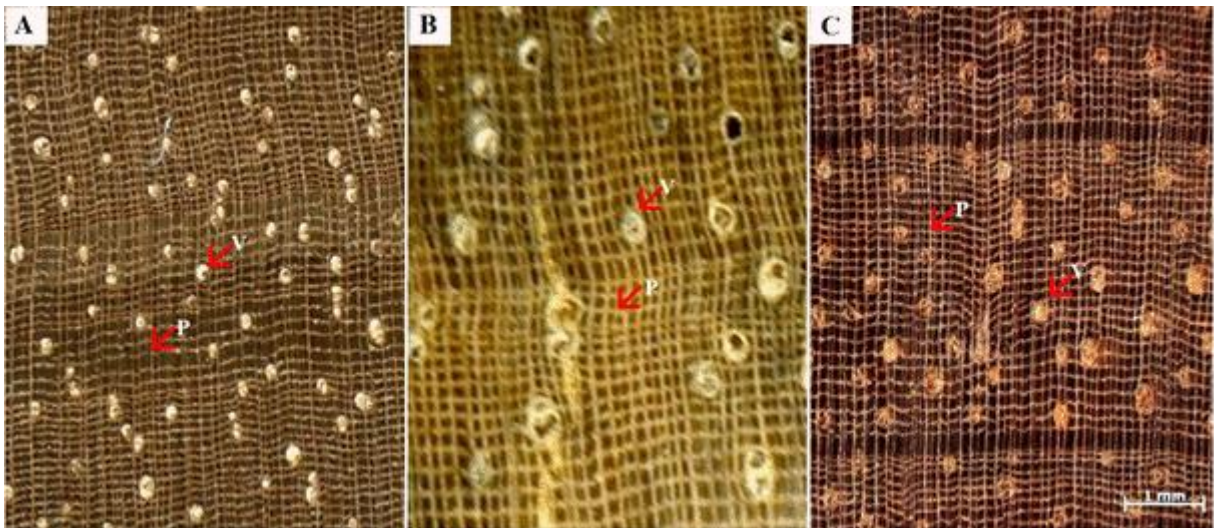


Figura 2. Visão transversal da madeira de matá-matá (10-20X): A – *Eschweilera coriacea*, B – *Eschweilera odora*, C – *Eschweilera truncata*. P = parênquima; V = vasos.

Nos extrativos encontram-se diversos compostos de baixo peso molecular, como resinas, gomas, terpenos, alcalóides, flavonóides, entre outros. Ainda dentro desses compostos estão várias classes químicas de substâncias fenólicas, como os taninos. O processo de quantificação da extração utiliza, em geral, solventes apolares e/ou de baixa polaridade (hexano, benzeno, clorofórmio) responsáveis pela remoção de

resinas, ceras e óleos essenciais. Tolueno-etanol, acetona, metanol e água, são solventes de média a alta polaridade, carregam uma abundância de compostos, como flavonóides, taninos e açúcares (Barbosa *et al.* 2006; Lovaglio *et al.* 2017).

Nos extrativos do gênero *Eschweilera*, em geral, são detectados esteróides, triterpenos e saponinas triterpênicas, assim ácido elágico precursor dos taninos hidrolisáveis (Yang *et al.* 1998; Nascimento *et al.* 2019). Quanto à análise quantitativa de taninos, a maior concentração foi observada nos extrativos de *E. truncata* (10%). O teste de *Tukey* confirmou a formação de três classes de valores para a análise de polifenóis e taninos totais ($p = 0,0006$), sendo que *E. truncata* (8,78%) difere em relação às demais espécies, por outro lado, a espécie *E. coriacea* (5,92%) apresentou diferença em relação a *E. odora* (2,09%).

Os macrocomponentes (metabólitos primários) das espécies de *Eschweilera* variaram de 44,20-46,33% para a celulose e de 28,89-31,21% para a lignina (Tabela 2). Apesar dessa variação, não foi observada diferença estatística entre as médias das espécies para esses compostos ($p = 0,3542$, lignina: $p = 0,2360$, celulose). Ao comparar esses resultados com os dados da literatura para madeira tropical, verificou-se que eles estão na faixa padrão para espécies da região (Silva e Silva 1991; Fengel e Wegener 2003). Quanto aos compostos minerais presentes no tecido xilemático que em tecnologia são quantificados como cinzas, produto da carbonização, no presente estudo foram quantificados em concentrações $< 0,70\%$, sem diferença estatística entre as espécies ($p = 0,1354$).

A celulose é o polissacarídeo mais abundante da natureza, sua cadeia é composta por unidades de glicose, unidas por ligações 1- β , 4-glicosídicas, onde as paredes das células vegetais estão compactadas, de modo que suas fibras apresentam regiões nitidamente cristalinas. A celulose devido às suas propriedades químicas e físicas, bem como à sua estrutura supramolecular, está ligada à contração volumétrica da espécie (Silva e Silva 1991; Varejão *et al.* 2012a).

A lignina, outro componente importante da madeira, é um polímero amorfo, heterogêneo e predominantemente aromático, que envolve polissacarídeos na estrutura celular. É caracterizada pelo elevado número de grupos $-OCH_3$ e grupos $-OH$, e sua estrutura química difere dependendo se é madeiras de folhosas ou madeira de coníferas. As paredes celulares lignificadas tendem a se contrair menos do que as não lignificadas. Por apresentar resistência ao impacto, compressão e flexão, a lignina diminui a permeabilidade à água, além de atuar como protetora de microrganismos,

evitando a penetração de enzimas destrutivas na parede celular (Fengel e Wegener 2003; Sjöström 2013).

Extrativos, ou metabólitos secundários, incluem uma ampla gama de compostos orgânicos, como terpenos, ácidos graxos, compostos aromáticos (principalmente compostos fenólicos) e óleos vegetais. Essas substâncias têm função fisiológica na árvore, seja como material de reserva, balanço energético, atividade antioxidante contra o estresse ambiental, entre outras. Na madeira, são responsáveis pelas características de gosto, cor, inflamabilidade e, principalmente, pela resistência natural aos organismos xilófagos (Kilic e Niemz 2010; Yang *et al.* 2018).

Além dos macrometabólitos e extrativos, pequenas quantidades de compostos minerais são encontrados na madeira, que são absorvidos do solo durante o crescimento das árvores e depositados na parede celular. Em geral, esses compostos são analisados em cinzas que se caracterizam como um material alcalino (pH 8-13) formado por carbonatos, sais e óxidos de Ca, K, Mg, P, Na e Si (Serafimova *et al.* 2011; Sjöström 2013).

Castilho (1984) realizou a caracterização química da madeira de *Eschweilera iquitoensis* (machimango colorado), uma espécie da Amazônia peruana, utilizando metodologia destrutiva tradicional, atingindo valores de 30% de lignina, 8% de extrativos totais e 1% de cinzas. Moutinho *et al.* (2011) investigando madeiras de matá-matá (*E. amazonica*, *E. coriacea*, *E. idatimon* e *E. ovata*) da região sudeste do Pará (Brasil) encontraram valores de 23,40 à 30,80% para teor de lignina e concentrações de extrativos de 3,60% (biriba branco, *E. ovata*) à 11,10% (matá-matá branco, *E. coriacea*). Nascimento *et al.* (2019) estudando o perfil químico de extrativos de espécies arbóreas da família Lecythidaceae da Amazônia Central, encontraram teores de extrativos totais variando de 1,93% (castanha-sapucaia, *Lecythis usitata*) à 7,10% (matá-matá amarelo, *E. odora*), e para concentrações de polifenóis totais de 0,33% (tauari-branco, *Couratari stellata*) à 2,79% (tauari, *Couratari guianensis*).

Caracterização físico-mecânicas

Os resultados da estimativa das propriedades físicas e mecânicas da madeira de matá-matá são apresentados na Tabela 4. A análise de variância não detectou diferença significativa para os valores de Poder calorífico superior (PCS, $p = 0,8936$) e densidade básica (Db, $p = 0,3889$) das espécies estudadas, com o PCS variando de 4.993-5.033 cal/g e Db de 0,78-0,88 g/cm³. Quanto à umidade, o maior valor foi

observado para *E. truncata* (13,46%), valor evidenciado pelo teste de *Tukey* com diferença significativa ($p = 0,0284$) quando comparado com as médias de *E. coriacea* (12,58%) e *E. odora* (13,21%). A mesma diferença estatística foi observada para MOE ($p = 0,0153$) e MOR ($p = 0,0000$), com variação de 14.253-7.447 MPa e 146,04-175,73 MPa, respectivamente (Tabelas 4 e 5). Vale ressaltar que os valores previstos para as propriedades estão na faixa para madeiras amazônicas de alta densidade (INPA/CPPF 1991; Balboni *et al.* 2018).

Tabela 4. Resultados das propriedades físico-mecânicas das madeiras de *Eschweilera* por metodologia não destrutiva.

Matá-matá		Umidade %	Poder calorífico superior PCS (cal/g)	Densidade básica Db (g/cm ³)	Módulo de elasticidade MOE (MPa)	Módulo de ruptura MOR (MPa)
<i>Eschweilera coriacea</i>	Máximo	12,66	5.094	0,83	16.570	153,78
	Mínimo	12,52	4.972	0,71	14.310	145,28
	Média*	12,58b	5.033a	0,78a	15.337b	149,32b
	DP	0,07	61,00	0,07	1.144	4,27
<i>Eschweilera odora</i>	Máximo	13,46	5.114	0,93	14.640	147,57
	Mínimo	12,77	4.871	0,80	13.710	144,01
	Média*	13,21b	4.996a	0,88a	14.253b	146,04b
	DP	0,38	121,65	0,08	484,39	1,83
<i>Eschweilera truncata</i>	Máximo	13,80	5.135	0,91	18.310	176,35
	Mínimo	13,11	4.849	0,74	16.300	174,81
	Média*	13,46a	4.993a	0,81a	17.447a	175,73a
	DP	0,35	143,01	0,09	1.034	0,82

* Valor médio de quatro repetições; DP = Desvio padrão; Médias seguidas da mesma letra não diferem estatisticamente pelo teste de *Tukey* ao nível de 5% de probabilidade.

Tabela 5. Resultado da análise de variância das propriedades físico-mecânicas das diferentes madeiras de *Eschweilera*.

Variáveis	SQ	QM	F	p
Umidade	1,2313	0,6156	6,8312	0,0284
PCS	2.978	1.489	0,1146	0,8936
Db	0,0124	0,0062	1,1069	0,3898
MOE	15.823,089	7.911,544	9,0805	0,0153
MOR	1.589,8970	794,9484	107,3328	0,0000
Cinzas	0,0622	0,0311	2,8426	0,1354

Kollmann e Cotê Junior (1968) e Silveira *et al.* (2013) afirmam que as propriedades físicas e mecânicas dependem do teor de umidade da madeira, esta variável é inversamente proporcional a Db, PCS, MOE e MOR, ou seja, quanto maior a quantidade de água, maior a inter-relação das hidroxilas com as moléculas de celulose e hemicelulose, aumentando a instabilidade dimensional e defeitos nas peças de madeira, reduzindo o potencial energético, bem como a resistência biológica e mecânica da madeira. A análise estatística indicou a formação de dois grupos de umidade: O menor (*E. coriacea* e *E. odora*) e o maior teor (*E. truncata*), onde dentro desta faixa, Silva *et al.* (2014) observou um nível de umidade de 12,16-14,22% ao aplicar a espectroscopia no infravermelho próximo (NIR) para prever esta propriedade de resíduos de madeira da Amazônia.

Quanto ao poder calorífico da madeira, esta determinação é um dos principais atributos para a indicação dessa matéria-prima para a produção de energia, associada à concentração de compostos químicos, umidade e Db. O bioma amazônico possui espécies florestais ainda não estudadas para fins energéticos, embora a atividade de produção de energia a partir da madeira seja bastante difundida, principalmente para uso doméstico e para a produção de carvão para a indústria siderúrgica.

No estudo de Silva *et al.* (2020) utilizando metodologia tradicional de caracterização energética de resíduos de madeira para produção de briquetes, alcançou altos valores de PCS, que variaram de 5.213 (angelim-pedra, *Hymenolobium petraeum*) a 5.832 cal/g (jatobá, *Hymenaea courbaril*). Enquanto Moutinho *et al.* (2011) alcançaram valores menores ao quantificar várias madeiras de matá-matá (*Eschweilera* sp.), que variaram de 4.438-4.758 cal/g. No entanto, Silva *et al.* (2014) em um dos poucos estudos utilizando predição não destrutiva (NIR), encontraram valores de PCS próximos ao presente estudo, ao caracterizarem resíduos de madeira do estado do Amazonas/Brasil, que variaram de 4.608 (cedrinho, *Scleronema* sp.) a 4.928 cal/g (louro, *Ocotea* sp.).

Uma das variáveis com maior resposta à aplicabilidade da madeira é a densidade, propriedade física intimamente relacionada à composição química e estrutura anatômica (Kollmann e Côtê Junior 1968; Vale *et al.* 2010). Nuopponen *et al.* (2006) aplicando a metodologia não destrutiva (NIR) em pesquisas com madeira de *Picea sitchensis* (sitka spruce), pinheiro-bravo e 24 espécies tropicais, buscaram estabelecer a relação entre constituição química e densidade da madeira, concluindo que a madeira tropical obteve maior densidade do que as madeiras de abetos e

pinheiros, verificando também que as espécies tropicais apresentam maior teor de lignina em sua composição do que as demais madeiras.

Araújo *et al.* (2019) estudando madeira de espécies manejadas na Amazônia e aplicando metodologia tradicional, identificaram predominância de madeira com alta densidade (murici, *Byrsonima crispera*, 0,71 g/cm³; piãozinho, *Micrandropsis scleroxylon*, 1,18 g/cm³). Dentro dessa faixa, Fróes *et al.* (2019) encontraram valores médios de 0,77 g/cm³ para a madeira de *E. truncata* (matá-matá preto) aplicando a mesma metodologia (destrutiva), enquanto Nascimento *et al.* (2017) determinaram a densidade de *E. odora* (matá-matá amarelo) pelo NIR obtendo valores médios de 0,80 g/cm³, e no estudo atual as madeiras de matá-matá foram classificadas como de alta densidade ($Db > 0,70 \text{ g/cm}^3$).

O conhecimento das propriedades mecânicas da madeira é essencial quando se pretende indicá-las para fins estruturais. Balboni *et al.* (2018) caracterizando as propriedades físicas e mecânicas das madeiras amazônicas *Pseudopiptadenia psilostachya* (timborana) e *E. ovata* (biribá-branco) obtiveram valores de MOE de 16.030-17.870 MPa e MOR de 103,90-127,10 MPa, a maior resistência foi observada para a madeira de *Eschweilera*. No banco de dados do Instituto de Pesquisas Tecnológicas - IPT/Brasil (2020), a espécie tropical *Hymenaea courbaril* (jatobá) é classificada em madeira de alta resistência com MOR de 151,80 MPa e MOE de 17.062 MPa.

Estudos preditivos baseados em madeiras nobres não são tão comuns. Araújo *et al.* (2019) utilizaram a técnica *Stress Wave Timer* para determinar o MOE de madeiras amazônicas e obtiveram valores de 11.049 (breu-vermelho - *Protium puncticulatum*) à 14.2012 MPa (piãozinho - *Micrandropsis scleroxylon*). Nos últimos anos, várias pesquisas foram desenvolvidas para validar modelos baseados em espectroscopia NIR para prever as propriedades mecânicas da madeira sólida. Andrade *et al.* (2010) determinaram a resistência mecânica da madeira de *Eucalyptus urophylla* (eucalipto vermelho) por espectroscopia NIR e obtiveram MOR de 94,40 MPa e MOE de 15.972,20 MPa. Schimleck *et al.* (2018) comparou vários modelos preditivos NIR para seis espécies de pinheiro (*Pinus caribaea*, *P. chiapensis*, *P. maximinoi*, *P. oocarpa*, *P. taeda* e *P. tecunumanii*), onde MOR variou de 55,15-70,13 MPa e MOE de 5.930,21-9.110,24 MPa. Também usando espectroscopia, Mancini *et al.* (2019) atingiu valores MOR de 102,40 MPa e MOE de 12.132,00 MPa para madeiras de *Castanea sativa*. Yu *et al.* (2020) compararam as propriedades

mecânicas da madeira de *Quercus mongolica* (carvalho mongol) usando modelagem NIR e observou valores de resistência à ruptura na faixa de 120,00-200,00 MPa e resistência à elasticidade de 12.000-18.000 MPa.

A estimativa não destrutiva usada para caracterização tecnológica de madeiras de *Eschweilera* é inteiramente baseada em espectroscopia no infravermelho próximo (NIRS), uma ferramenta baseada em espectroscopia vibracional, com exposição da madeira à radiação eletromagnética na faixa de 4.000 a 12.000 cm^{-1} . Esta energia quando aplicada à madeira pode fornecer uma gama de informações associada às diversas propriedades da madeira, possibilitando a combinação de variáveis desta matéria-prima, bem como dos seus constituintes químicos com propriedades físicas e mecânicas, através de estatísticas multivariadas e quimiométricas. Ao comparar os valores previstos pelos modelos NIR para as propriedades tecnológicas das madeiras de *Eschweilera* com dados da literatura por metodologia tradicional, constatou-se que estão na faixa padrão para madeiras tropicais, comprovando a eficiência das previsões das variáveis analisadas.

Uma análise exploratória dos dados (análise do componente principal, PCA) foi realizada para comprimir as possíveis relações biológicas do material com base nas relações lineares, correlação de *Pearson* (Figura 3 e Tabela 6).

A PCA das características físicas, mecânicas e químicas da madeira matá-matá proporcionou quatro componentes que explicam 86% da variabilidade, sendo os dois primeiros (Fatores 1 e 2) respondendo por 62% da variação total (Figura 3). Quando as variáveis foram analisadas, observaram-se quatro agrupamentos para os dois Fatores (PC1 vs PC2), constituindo-se no grupo 1 (G1): Cinzas, polifenóis, MOE e MOR; grupo 2 (G2): Celulose, lignina e PCS; grupo 3 (G3): Db, extrativos e solubilidade em água quente e grupo 4 (G4): Umidade.

Observando as interações das variáveis listadas no G1, pode-se inferir que o MOR possui interação direta com as características do MOE, o que pode ser explicado em parte pelos macrocomponentes da madeira (celulose e lignina). Fujimoto *et al.* (2008), explica que bandas NIR associadas ao grupo OH nas regiões semicristalinas ou cristalinas da celulose influenciam fortemente na resistência (MOR e MOE) em ensaios de flexão para madeira.

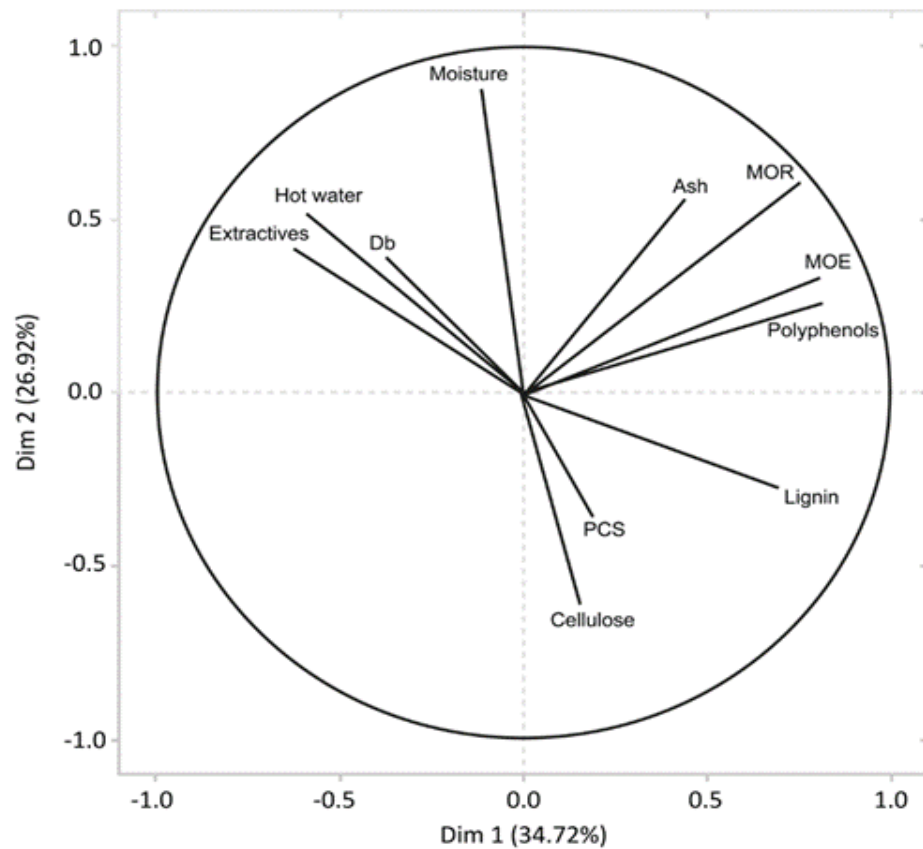


Figura 3. Distribuição fatorial das variáveis (PCA).

Tabela 6. Resultado da correlação de *Pearson* entre todas as variáveis obtidas a partir das relações entre as variáveis químicas, mecânicas e físicas da madeira de *Eschweilera*.

Propriedade	Variável 1	Variável 2	r	p	Classe
Química	Extrativos	Celulose	-0.47	0.2030	Moderada
		Db	0.46	0.2017	Moderada
		Água quente	0.36	0.3380	Moderada
		PCS	-0.41	278	Moderada
	Polifenóis	Lignina*	0.33	0.3800	Moderada
		MOE	0.87	0.0020	Forte
Mecânica	MOR	MOR	0.84	0.0040	Forte
		Cinza	0.56	0.1130	Moderada
Física	MOE	MOE	0.90	0,0000	Forte
		Db	Água quente	0.30	0.4270
	PCS	Cinza	-0.33	392	Moderada

Db = Densidade básica; MOE = Módulo de elasticidade; MOR = Módulo de ruptura e PCS = Poder calorífico superior. * Para a correlação desta variável com as demais, foram aplicadas as correlações de Spearman.

Quanto às relações dos polifenóis associados à resistência mecânica, poucas evidências podem explicar tal agrupamento, uma possível relação poderia ser discutida uma vez que compostos fenólicos presentes em extrativos, como taninos que são altamente reativos, formando pontes de hidrogênio intra e intermoleculares com vários compostos (Pizzi 2019). Tal como acontece com os polifenóis, às informações sobre a cinza vs. resistência da madeira têm sido pouco estudadas, possivelmente esta correlação pode ser explicada pelas interações intramoleculares de carbonatos, fosfatos e silicatos na célula vegetal (Higuchi 1997).

No grupo G2, a relação lignina/PCS é bem conhecida, principalmente em estudos de energia, com correlações positivas, ou seja, quanto maior o teor de lignina, maior o potencial energético (PCS), visto que a maior concentração de carbono fixo na matriz, maior o brilho do fogo (Telmo e Louzada 2011; Todaro *et al.* 2015; Silva *et al.* 2020). Enquanto, para a ligação celulose/lignina, a correlação é negativa (Fengel e Wegener 2003). Para o G3, a associação extrativos/Db é explicada em vários estudos de tecnologia da madeira (Nascimento *et al.* 2017; Soares *et al.* 2018; Fróes *et al.* 2019), uma vez que espécies de florestas tropicais de alta densidade desenvolvem crescimento lento em diâmetro, havendo assim tempo para maior deposição de compostos no tecido xilemático (Silva e Silva 1991; Chave *et al.* 2009), enquanto espécies pioneiras, de rápido crescimento em geral apresentam baixa densidade e concentração de extrativos (Vale *et al.* 2010; Kilic e Niemz 2012).

O G4 foi formado apenas a partir da variável Umidade. Essa constante que engloba as questões hídricas na madeira tem correlação indireta com a maioria das propriedades, sendo primordial seu conhecimento no uso da madeira. Silveira *et al.* (2013) confirmaram em seus estudos a relação inversa de umidade/Db, madeira de baixa densidade com maior teor de umidade. Na indústria de energia que utiliza biomassa de madeira, espécies de maior umidade apresentam baixo PCS e, conseqüentemente, menor rendimento energético (Silva *et al.* 2014; Silva *et al.* 2020). Avaliando a influência dos extrativos na arquitetura hidráulica em espécies florestais da Amazônia Central, Santos (2020) constatou que certas espécies apresentavam uma estratégia evolutiva para o estresse hídrico, onde um alto teor de umidade estava associado a uma maior concentração de extrativos aquosos.

Os resultados apresentados na Tabela 6 mostram a correlação de *Pearson* das variáveis analisadas que apresentaram significância e classificadas em moderada ($0,30 \leq r < 0,60$) a forte ($r \geq 0,60$) segundo Callegari-Jacques *et al.* (2003). A correlação

mais significativa foi encontrada nas interações entre MOR/polifenóis ($r = 0,84$, $p = 0,0040$), MOE/polifenóis ($r = 0,87$, $p = 0,0020$) e MOE/MOR ($r = 0,90$, $p = 0,0000$). Das variáveis classificadas em uma correlação moderada, segue a sequência MOR/cinza > extrativos/celulose > extrativos/Db > extrativos/PCS > extrativos/água quente > lignina/polifenóis > PCS/cinza > Db/água quente. Onde dentre as maiores contribuições para formar essas combinações estão associadas aos extrativos, polifenóis e MOR.

A correlação mede a direção e o grau da relação linear entre as variáveis quantitativas, em termos estatísticos, duas variáveis estão associadas quando apresentam semelhanças na distribuição de seus escores. Mais precisamente, eles podem ser associados por meio da distribuição de frequências por meio do compartilhamento de variância (Callegari-Jacques *et al.* 2003).

Silva *et al.* (2020) em estudos recentes com madeiras amazônicas encontraram correlações significativas entre extrativos/Db ($r = 0,56$) e cinzas/PCS ($r = -0,58$). Fernandes *et al.* (2017) encontraram correlação para extrativos/Água quente ($r = 0,55$), enquanto Soares *et al.* (2018) trabalhando com *Eucalyptus* sp. observaram correlações significativas também para extrativos/Db ($r = 0,48$) e Extrativos/Celulose ($r = -0,56$). Outros estudos de caracterização tecnológica da madeira também mostraram correlação entre variáveis químicas e físicas, como os estudos de Moutinho *et al.* (2011) com correlação moderada para a combinação Extrativos/PCS ($r = -0,39$). Vale ressaltar que em todos esses estudos foram observadas as mesmas tendências de correlação com a presente pesquisa.

Quanto às propriedades físicas, Moutinho *et al.* (2011) observaram correlação para Db/PCS ($r = 0,36$), e para as propriedades mecânicas, Fernandes *et al.* (2017) apontam que MOE/MOR são altamente significativos ($r = 0,78$). Comparando essa mesma combinação para as madeiras matá-matá, observou-se maior significância ($r = 0,90$). MOE é um parâmetro de rigidez da madeira que está alta e positivamente correlacionado com a resistência e, portanto, pode ser usado para avaliar parâmetros de resistência da madeira como MOR (Liu *et al.* 2007).

CONCLUSÃO

Quatro conclusões principais foram obtidas no estudo: (1) Os valores encontrados para as propriedades químicas, físicas e mecânicas das madeiras de *Eschweilera coriacea* (matá-matá branco), *Eschweilera odora* (matá-matá amarelo) e *Eschweilera truncata* (matá-matá preto), foram compatíveis com as obtidas pelas determinações destrutivas de espécies tropicais e também para outras espécies de *Eschweilera*; (2) O conhecimento da composição química e de como os componentes se distribuem nas espécies vegetais contribuem para um melhor aproveitamento desse material, como na comercialização de madeira, na construção civil ou naval, na fabricação de móveis, chapas e painéis, entre outros; (3) A caracterização tecnológica das madeiras de matá-matá por espectroscopia no infravermelho próximo (NIR) mostrou-se um recurso satisfatório para o setor florestal, uma vez que não há necessidade de destruição da amostra, e seus resultados são robustos, gerados em curto espaço de tempo e não produzem resíduos; e (4) os modelos PLS usados para prever propriedades tecnológicas têm alto desempenho estatístico com coeficiente de determinação acima de 0,90 e RDP (razão de desempenho para desvio) maior que 3, e erros de calibração e predição baixos (RMSEC e RMSEP).

Material complementar (MC)*

MC1. Resultados da predição das propriedades químicas de espécies de pequeno diâmetro por metodologia não destrutiva.

Espécies	Extrativos	Polifenóis totais	Água quente	Lignina	Celulose bruta	Cinzas
<i>Byrsonima crispera</i>	5,78 (2,95)	0,67 (0,29)	11,67 (0,70)	30,74 (1,77)	50,45 (3,75)	0,57 (0,10)
<i>Inga alba</i>	4,70 (0,12)	0,66 (0,10)	8,01 (0,72)	29,96 (3,01)	55,24 (2,37)	0,48 (0,14)
<i>Inga paraensis</i>	4,74 (0,09)	1,03 (0,20)	6,99 (1,25)	31,88 (2,01)	47,59 (1,99)	0,52 (0,18)
<i>Micrandropsis scleroxylon</i>	4,27 (1,78)	0,40 (0,19)	13,15 (1,22)	32,33 (2,16)	48,25 (0,40)	0,26 (0,04)
<i>Protium puncticulatum</i>	5,84 (1,16)	1,01 (0,25)	10,66 (2,19)	31,16 (2,66)	47,58 (4,93)	0,27 (0,04)
<i>Protium tenuifolium</i>	6,11 (0,56)	0,87 (0,15)	10,01 (1,07)	31,92 (1,42)	46,29 (2,44)	0,71 (0,15)
<i>Swartzia reticulata</i>	4,75 (0,72)	3,00 (0,66)	9,02 (4,03)	30,53 (0,69)	48,10 (1,01)	0,24 (0,05)

* Valor médio de três amostras; em parentes desvio-padrão.

* Dados da Pesquisa

MC2. Resultados das propriedades físico-mecânicas de espécies de pequeno diâmetro por metodologia não destrutiva.*

Espécies	Umidade %	PCS (cal/g)	Db (g/cm ³)	MOE (MPa)	MOR (MPa)
<i>Byrsonima crispera</i>	12,48 (0,30)	4.858 (260)	0,68 (0,06)	13.130 (2.451)	107,60 (2,75)
<i>Inga alba</i>	13,03 (0,10)	4.922 (70)	0,55 (0,05)	9.410 (520)	90,87 (3,66)
<i>Inga paraensis</i>	12,76 (0,80)	5.050 (240)	0,79 (0,09)	10.600 (765)	129,13 (3,41)
<i>Micrandropsis scleroxylon</i>	13,05 (1,00)	5.095 (120)	0,76 (0,08)	13.330 (879)	145,28 (2,42)
<i>Protium puncticulatum</i>	12,80 (0,68)	4.877 (140)	0,58 (0,11)	9.900 (1.205)	122,72 (3,07)
<i>Protium tenuifolium</i>	12,92 (0,10)	4.866 (170)	0,69 (0,10)	12.430 (825)	117,80 (8,15)
<i>Swartzia reticulata</i>	12,91 (0,03)	5.147 (110)	0,89 (0,13)	12.300 (980)	153,20 (3,15)

* Valor médio de três amostras; em parentes desvio-padrão.

* Dados da Pesquisa

Capítulo 3

Nascimento, C.S.; Cruz, I.A.; Nascimento, C.C.; Oliveira, M.C.R.; Freitas, J.A.; Lima, M.P.; Araújo, R.D.; Higuchi, N. and Santos, J. A chemical survey of rainforest Amazonian species: substances found in wood extractives. Submetido a *Annals of Forest Research*.

AVALIAÇÃO QUÍMICA DE ESPÉCIES FLORESTAIS AMAZÔNICAS: PROSPECÇÃO DE CLASSES DE COMPOSTOS EM EXTRATIVOS DE MADEIRAS

RESUMO

A pesquisa fitoquímica visa conhecer e avaliar os constituintes das plantas. A análise das classes químicas dos extrativos, pode indicar grupos de metabólitos secundários, que podem auxiliar na identificação botânica, atuando como marcadores taxonômicos. O objetivo deste trabalho foi prospectar classes químicas nos extrativos das espécies arbóreas *Byrsonima crista* (murici), *Eschweilera coriacea* (matá-matá amarelo), *Eschweilera odora* (ripeiro-preto), *Eschweilera truncata* (matá-matá preto), *Inga alba* (ingá-branca), *Inga paraensis* (ingá-vermelha), *Micrandropsis scleroxylon* (piãozinho), *Protium puncticulatum* (breu-vermelho 1), *Protium tenuifolium* (breu-vermelho 2) e *Swartzia recurva* (muirajibóia), de ocorrência na região amazônica. Uma triagem fitoquímica foi realizada nestes materiais. Três classes principais foram investigadas, terpenóides, compostos fenólicos e nitrogenados. A madeira de *M. scleroxylon* apresentou o menor teor de extrativos, e *E. odora* o maior, 2,37% e 7,08%, respectivamente, enquanto a concentração de polifenóis totais foi em média 1,05%. Quanto ao índice de classe química, os extrativos de *E. odora* são os mais ricos em grupos/classes químicas (0,78). Taninos foram detectados nos dez extratos, sendo que *I. alba* e *S. recurva* apresentaram os maiores teores de flavonóides detectados. Algumas classes estudadas podem indicar um possível agrupamento taxonômico, onde para extrativos de *M. scleroxylon* o perfil fitoquímico composto por antraquinonas, esteróides, flavonóides e taninos condensados, são registrados pela primeira vez.

Palavras-chave: Metabólitos secundários, taninos, fitoquímica, madeiras tropicais.

A CHEMICAL SURVEY OF RAINFOREST AMAZONIAN SPECIES: SUBSTANCES FOUND IN WOOD EXTRACTIVES

ABSTRACT

Phytochemical research aims to know and evaluate the constituents of plants. The analysis of chemical classes of extractives can indicate groups of secondary

metabolites that can help in the botanical identification, acting as taxonomic markers. This study aimed to prospect chemical classes in the extractives of arboreal species *Byrsonima crispera* (murici), *Eschweilera coriacea* (matá-matá amarelo), *Eschweilera odora* (ripeiro-preto), *Eschweilera truncata* (matá-matá preto), *Inga alba* (ingá-branca), *Inga paraensis* (ingá-vermelha), *Micrandropsis scleroxylon* (piãozinho), *Protium puncticulatum* (breu-vermelho 1), *Protium tenuifolium* (breu-vermelho 2), and *Swartzia recurva* (muirajibóia), of occurring in the Amazon region. A phytochemical screening was carried out on these materials. Three major classes were investigated, terpenoids, phenolic, and nitrogen compounds. *M. scleroxylon* wood had the lowest extractives content, and *E. odora* the highest, 2.37% and 7.08%, respectively, while the concentration of total polyphenols averaged 1.05%. As for the chemical class index, the extractives of *E. odora* are the richest in chemical groups/classes (0.78). Tannins were detected in the ten extracts, and *I. alba*, and *S. recurva* had the highest amounts of flavonoids detected. Some classes studied, may indicate a possible taxonomic grouping, where for extractives of *M. scleroxylon* the phytochemical profile composed of anthraquinones, steroids, flavonoids, and condensed tannins, is recorded for the first time.

Keywords: Secondary metabolites, tannins, phytochemistry, tropical woods.

INTRODUÇÃO

O potencial biológico da Amazônia é imenso, e a floresta possui uma variedade de espécies com potencial tecnológico, que vem se destacando mundialmente. As famílias botânicas Fabaceae, Myrtaceae, Lauraceae, Annonaceae, Euphorbiaceae, Sapotaceae e Lecythidaceae representam cerca de 50% de todas as espécies arbóreas da Amazônia (Matta e Scudeller 2012; Steege *et al.* 2020).

A determinação dos constituintes químicos da madeira (tecido xilemático) é importante para identificar as características de cada espécie e sua aplicabilidade (Fengel e Weneger 2003; Araújo *et al.* 2019). A pesquisa fitoquímica visa conhecer e avaliar os constituintes químicos das espécies vegetais. Quando os estudos químicos sobre as espécies de interesse não estão disponíveis, a análise fitoquímica preliminar pode indicar os metabólitos secundários relevantes (Simões *et al.* 2017).

A importância desse tipo de estudo na região tropical vai além do perfil químico das espécies arbóreas, pois há relações diretas entre metabolismo vegetal, balanço energético florestal, estoque de carbono e aquecimento global, pois aproximadamente 20% de todo carbono fixado pela fotossíntese destina-se à síntese de vários metabólitos secundários como alcalóides, flavonóides, terpenos, entre outros (Hayasida *et al.* 2011; Piva *et al.* 2019).

Metabólitos secundários de espécies do mesmo gênero são geralmente semelhantes, então a ocorrência de classes químicas nos extrativos pode auxiliar na identificação botânica, atuando como marcadores taxonômicos (Stojanović *et al.* 2015; Nascimento *et al.* 2019). Sobre os extrativos, é importante ressaltar seus efeitos benéficos e prejudiciais. Esses compostos podem causar ação tóxica em humanos, bactérias, fungos e insetos, e é importante conhecer a ação tóxica dessas substâncias. Diversas classes químicas apresentam alto grau de toxicidade, incluindo fenóis, taninos, alcalóides e heterosídeos cianogênicos (Hausen e Schmalte 1981; Santos *et al.* 2018).

As espécies arbóreas da Floresta Amazônica são pouco estudadas quanto às suas propriedades químicas e biológicas em relação aos metabólitos da madeira. Barbosa *et al.* (2006) em seus estudos tratam da identificação de classes de compostos em espécies de leguminosas arbóreas da Amazônia, confirmando que os flavonóides são marcadores taxonômicos dessa família, enquanto Vleminckx *et al.* (2018), identificaram metabólitos de 29 espécies de *Protium* da Amazônia peruana, relacionando esses compostos com a defesa da espécie, quando produzem terpenos e compostos fenólicos. Em outro estudo, Imai *et al.* (2008) pesquisaram os extratos de cerne de *Astronium lecointei* (muiracatiara), *Dipteryx odorata* (cumaru) e *Hymenaea courbaril* (jatobá) encontrando a ação antioxidante dos extrativos associados ao teor de tanino.

No Brasil, o grupo de pesquisa CNPq/MCTI “*Plantas da Amazônia: Química, Quimiosistemática e Atividade Biológica*” é um dos poucos grupos que vem desenvolvendo um estudo de prospecção de metabólitos secundários na madeira. Nos últimos cinco anos, pesquisadores desse grupo conseguiram elucidar diversos compostos de espécies dos gêneros *Andira*, *Dipteryx*, *Eschweilera*, *Handroanthus*, *Inga*, *Ocotea*, *Protium* e *Swartzia*, promovendo grande difusão de informações sobre extrativos de madeiras amazônicas.

O estudo das classes químicas dos extrativos da madeira pode levar a uma

compreensão abrangente da estratégia de como as plantas produzem esses compostos, ou seja, como desenvolver estratégia nas defesas contra organismos xilófagos (durabilidade natural), classificação de espécies tóxicas, elucidação da quimiotaxonomia, além de fornecer a base científica para o desenvolvimento de novos produtos de origem natural (Vleminckx *et al.* 2018; Garcia *et al.* 2021). Nesse contexto, o estudo teve como objetivo prospectar classes químicas em extrativos de espécies arbóreas ocorrentes na região amazônica.

MATERIAL E MÉTODOS

Amostras foram coletadas na área de mata secundária de terra-firme da Estação Experimental Florestal Tropical do Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia (02°35'55,5" S e 60°02'14,8" W), km 934 da BR-174, Manaus/AM – Boa Vista/RR, Brasil (Figura 1). Na área da estação foram inventariadas árvores com diâmetro a altura do peito (DAP) ≥ 25 cm (INCT - Madeiras da Amazônia/MCTI/CNPq/FAPEAM), e as árvores foram selecionadas, identificadas com placas, georreferenciadas (Garmin MAP 62s), e pré-identificados em campo por um parobotânico.

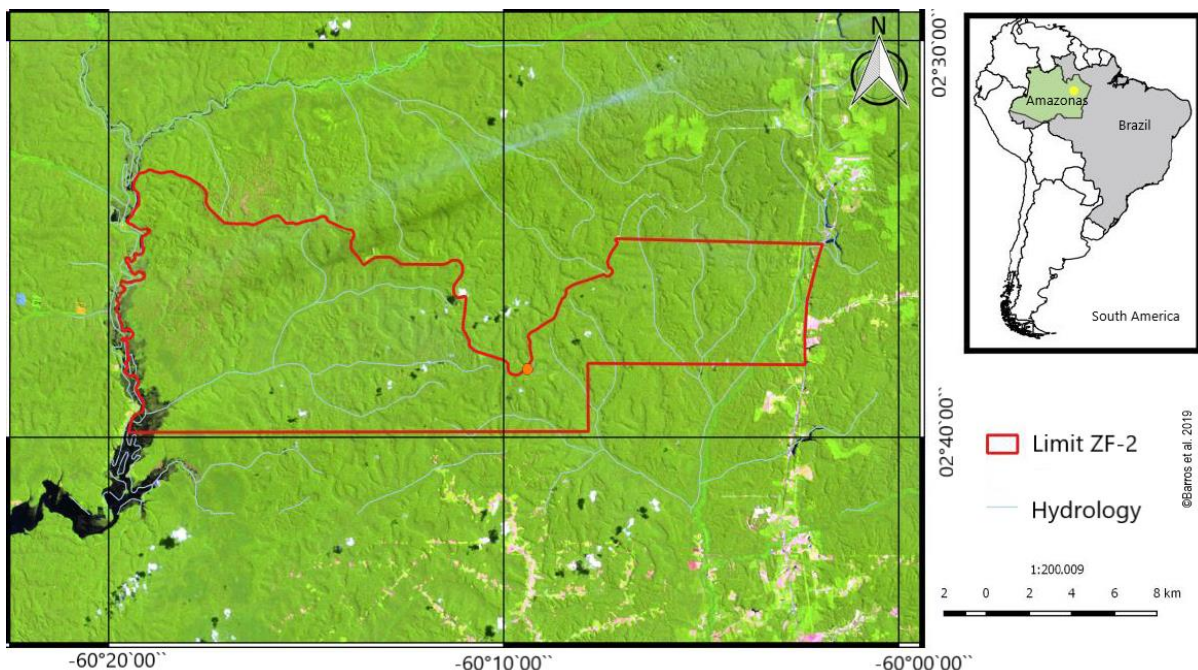


Figura 1. Localização geográfica da área de coleta das amostras.

Um total de 119 árvores foram registradas, e a seleção das espécies para o estudo foi realizada utilizando como critérios indivíduos com maior frequência na área e com maior número de repetições, além de ampla distribuição na Amazônia brasileira, pesquisados pelo Laboratório de Manejo Florestal - LMF/CODAM/INPA. As espécies florestais selecionadas para o estudo são apresentadas na Tabela 1. Discos de 10 cm de DAP (10 espécies x 3 indivíduos), foram submetidos à secagem ao ar livre por 48 horas após a coleta. Em seguida a serragem foi obtida da seguinte forma: lasca de madeira (picotador Pallman-PZ18), para obtenção de cavacos: moagem (moinho Wiley) e peneiramento com conjunto de peneiras de malha 20, 40, 60, 80, malha (RO-TAP, Testing Sieve Shakes-modelo B).

Tabela 1. Espécies florestais selecionadas para o estudo.

Nome popular	Nome científico/Família	Altura (m)*	DAP (cm)*
Breu-vermelho 1	<i>Protium puncticulatum</i> J. F. Macbr	34,65	11,75
Breu-vermelho 2	<i>Protium tenuifolium</i> (Engl.) Engl/Burseraceae	33,75	10,55
Ingá-branca	<i>Inga alba</i> (Sw.) Willd.	43,00	13,75
Ingá-vermelha	<i>Inga paraensis</i> Ducke/Fabaceae	31,40	8,20
Ripeiro-preto	<i>Eschweilera odora</i> (Poepp.) Miers.	47,55	10,55
Matá-matá amarelo	<i>Eschweilera coriacea</i> (DC.) Mart. ex Berg.	35,34	10,97
Matá-matá preto	<i>Eschweilera truncata</i> A.C.Sm./Lecythidaceae	25,75	9,35
Muirajibóia	<i>Swartzia recurva</i> Poepp./Fabaceae	31,40	12,40
Murici	<i>Byrsonima crispera</i> A. Juss./Malpighiaceae	31,64	10,40
Piãozinho	<i>Micrandropsis scleroxylon</i> W. Rod./Euphorbiaceae	36,14	18,00

DAP = Diâmetro da altura peito; * Média de três indivíduos.

Obtenção dos extratos

Os extratos da madeira foram obtidos a partir da serragem (40 mesh) com água e etanol (95%), em lavadora ultrassônica (lavadora Ultrassônica UNIQUE) a 50 °C, até a exaustão. Posteriormente a solução extrativa foi filtrada e concentrada a baixa pressão e temperatura em rota-evaporador rotativo. Ao final foi determinado o rendimento do extrato.

Testes Fitoquímicos

As metodologias utilizadas no estudo foram baseadas em Barbosa *et al.* (2006) e Simões *et al.* (2017), com foco em três classes de metabólitos: Terpenóides,

compostos nitrogenados e fenólicos.

Terpenóides

Esteróides e triterpenos (Lieberman-Buchard): Em um béquer adicionou-se 10 mL do extrato levando a banho-maria até a secura. Posteriormente, esse material foi extraído com três porções de 2 mL de clorofórmio. Esse material foi filtrado (funil com algodão + alguns diagramas de Na₂SO₄ anidro), para o tubo de ensaio bem seco. Adicionando 1 mL de anidro acético, agitou-se suavemente e adicionou-se 3 gotas de H₂SO₄ concentrado. Tornou-se a agitar suavemente observando o aparecimento de cores. O azul evanescente seguido de verde permanente indica a presença de esteróides livres, a coloração pardo-avermelhada, presença de triterpenóides. Padrão utilizado para esteróides (sitosterol) foi extrato de *Brosimum rubescens* e de *Buchenavia parviflora* para triterpenos.

Saponinas: Em tubo de ensaio com 2 mL de água foram dissolvidos 2 mL de extrato hidroalcoólico, agitou-se fortemente o tubo com a solução, por 2 a 3 minutos e observou-se a formação de espuma. Espuma persistente e abundante indica a presença de saponinas esteroidais.

Compostos nitrogenados

Alcalóides: Concentrou-se 5 mL do extrato em banho-maria até a metade do volume, elevou-se a pH 4 e filtrou-se. A essa solução juntaram-se gotas de NH₄OH até pH 11 e extraíram-se sucessivas de 30, 20 e 10 mL de éter-clorofórmio (3:1), em um funil de separação. A solução éter-clorofórmio foi tirada e tratada com Na₂SO₄ anidro para eliminar o excesso de água. A solução aquosa foi retirada e dividida em três tubos de ensaio, em cada tubo foram adicionadas três gotas dos reagentes de precipitação de alcalóides, Hager, Mayer e Dragendorff. A confirmação de alcalóides nos extratos se dá pela formação de precipitado floculoso em pelo menos dois tubos. Utilizou-se extrato de *Aniba rosaeodora* como padrão para alcalóides.

Heterosídeos cianogênicos: Misturou-se 10,00 g da amostra/serragem com 50 mL de água e juntou-se 1 mL de H₂SO₄ 5N, em um Erlenmeyer de 250 mL com tampa. Prende-se à tampa uma fita de papel de picrato de sódio (cortam-se pedaços de papel de filtro de 7 cm de comprimento por 1 cm de largura, em seguida mergulhou-se o papel em uma solução de reagente de Hager, tirou-se o excesso e depois mergulhou-

se em uma solução de Na_2CO_3 10%, retirando-se novamente o excesso) sem deixar tocar no líquido. Manteve a mistura sobre o banho-maria durante 2 horas. O aparecimento de cor vermelho-castanho no papel, indicam a presença deste composto. Utilizou-se como padrão solução de cianeto de potássio (1.000 ppm).

Compostos fenólicos

Fenóis e taninos: Em um tubo de ensaio foi adicionado 2 mL de extrato, e adicionando 3 gotas de solução alcoólica de FeCl_3 , agitando e em seguida observou-se uma possível variação de cor ou precipitado abundante. Outra reação que foi realizada como comparativo dos tipos de taninos foi a adição de 2 mL de acetato de chumbo (neutro). Estes ensaios foram comparados com um teste em branco feito com água e FeCl_3 , e ainda com um padrão catequina (taninos condensados) e ácido gálico (taninos hidrolisáveis). As colorações que variam entre azul e vermelho indicam a presença de fenóis, azul indica a presença de taninos hidrolisados e verde taninos condensados. Em presença de acetato de chumbo os taninos hidrolisáveis formam um precipitado floculoso (sal branco) e coloração azulada.

Flavonóides: Adiciona-se 2 mL de extrato em três tubos de ensaio, em um acidificou-se a pH 3, no outro alcalina-se a pH 8,5 e o terceiro a pH 11. Observando o aparecimento de cores diversas, o qual indica a presença de vários constituintes conforme a Tabela 2.

Antraquinonas e antranóis: Em um tubo de ensaio foram separados 5 mL de solução etérea e 2 mL de solução de NH_4OH 6N, agitando e misturando bem até separar em duas fases. O aparecimento da coloração vermelha na camada aquosa indica a presença de hidróxido de antraquinona na solução e seus heterosídeos no extrato hidroalcoólico. No caso de reação negativa no teste anterior, acrescenta-se no mesmo tubo, 1 mL de água-oxigenada, agitando até separar as fases. Após 10 minutos verifica-se o aparecimento da cor vermelha na fase aquosa, indicando a presença de antranóis. Utilizou-se extrato de *Senna* sp. como padrão para antraquinonas.

Cumarinas: Com o auxílio de um capilar, são feitas duas manchas de aproximadamente 1 cm de diâmetro em um papel de filtro. Em uma das manchas foi aplicada uma gota de solução alcoólica de KOH 0,5N. Em seguida, as manchas foram expostas à luz ultravioleta e observada a presença ou ausência de fluorescência azul,

ou verde. Utilizou-se extrato de *Hymenaea courbaril* como padrão para cumarinas.

Tabela 2. Coloração característica para cada tipo de flavonóides.

Flavonóides	Ácido (pH 3)	Alcalino (pH 8,5)	Alcalino (pH 11)
Antocianina e Antocianidina	Red	Purple	Blue
Catequina	Yellow		
Chalcona e Aurona	Red		Red
Flavanonol			Red
Flavona, Flavonol e Xantona			Yellow
Flavanona			Red
Leucoantocianidina	Red		

Ao final dos testes qualitativos das classes químicas, o índice de classes químicas de cada espécie (extrativos) foi calculado pela equação, ICQ (índice de classe química) = classes detectadas/Total de classes pesquisadas.

Testes físico-químicos

Determinação do teor de umidade (ASTM D2016/2021)

Foram pesados 1,00 g de serragem (60 mesh) em pesa-filtro, sendo submetida à secagem em estufa 100 ± 2 °C, num período de 4 horas, ao final desse tempo o material foi pesado até peso constante, e por fim calcula-se o teor de umidade conforme a fórmula: $TU\% = (P_u - P_s)/P_s \times 100$, P_u = massa úmida. P_s = massa seca.

Determinação do teor de cinzas (ASTM D1102/2021)

Em cadinho de porcelana, 1,00 g de serragem é adicionado e levado à estufa (100 ± 3 °C) por 1 hora, para retirada da umidade. Em seguida, o recipiente é levado à mufla para incineração, iniciando com o aquecimento gradativo até 580–600 °C. Após a incineração o cadinho é pesado até peso constante. O teor de cinzas é determinado pela fórmula: $Cinzas\% = (P_{cinza}/P_s) \times 100$, P_{cinza} = Peso da cinza e P_s = Peso da serragem seca.

Determinação do teor de extrativos (ASTM D1105-96, D1107/2021)

Nesta análise foram realizadas duas extrações com solventes de diferentes polaridades sucessivamente. 1ª extração: foram pesados 5,00 g de serragem e transferidos para o cartucho de celulose. Estes são colocados no interior do extrator Soxhlet e adaptado ao balão de fundo chato (300 mL) contendo aproximadamente 180 mL de solução de etanol-tolueno (1:2) em cada balão. Foram deixados em refluxo até a completa extração, 8 horas, onde a solução no interior do Soxhlet não apresentou mais coloração. Os cartuchos com amostras foram postos para seca em estufa (100 °C) e armazenados posteriormente em dessecador. O balão com extrato foi levado à concentração e posteriormente seco em estufa, e pesado até o peso constante. A primeira extração (TE1%) foi determinada pela equação: $TE1\% = (P_f - P_i)/P_s \times 100$, P_i = Peso do balão seco inicial; P_f = Peso do balão com extrativos e P_s = Peso da amostra seca. 2ª extração: o procedimento anterior é repetido, sendo que o solvente de extração nessa etapa é o etanol. Ao final é determinado o TE2%, e somado os índices das duas extrações (TE1 + TE2), este resultado é referido como teor de extrativos totais.

Determinação do teor de polifenóis totais (Barbosa *et al.* 2006).

Serragem a 40 mesh (2,00 g) de cada espécie (mistura de três indivíduos) foi refluxado com água (100 mL) em banho-maria (90 °C, 60 min.). Em seguida, o extrato foi filtrado e reservado, e os resíduos de madeira foram levados novamente para extrair por mais 60 min. Após, o material foi novamente filtrado e acrescentado à primeira fração extrativa, diluindo-se então para uma solução extrativa final de 500 mL (solução-mãe). A seguir, um volume de 100 mL da solução-mãe foi colocado em balão, onde foram adicionados 10 mL de formaldeído 40% (volume/volume) e 5 mL de HCl concentrado. O sistema foi colocado sob refluxo em banho-maria, por 30 min, segundo o método de Stiasny para determinação de taninos. O precipitado foi filtrado, lavado com água, seco em estufa e pesado. A alíquota obtida foi extrapolada para o volume total de extrato e calculou-se o teor de taninos pela equação, $Tan\% = MT_T / PM_s \times 100$, onde MT_T = massa total de taninos (g) e PM_s = peso seco da madeira.

Determinação do pH (TAPPI – T 252 om/2016)

Serragem a 60 mesh (2,00 g) foram utilizadas para medição do pH. Uma extração com água destilada foi realizada na amostra (100 mL) em banho-maria (100 °C) por 60

min., o material foi filtrado e transferido para um béquer, e logo em seguida o material retido sofreu uma nova extração, e o extrato obtido foi incorporado a primeira alíquota e determinado o pH (HI98103 Checker pH/Hanna).

RESULTADOS

Propriedades físico-químicas de espécies da Floresta Amazônica

O conhecimento da composição química e como os componentes estão distribuídos nas espécies vegetais contribuem para o entendimento de como esses compostos atuam e/ou ocorrem na natureza, bem como o grau de durabilidade natural das espécies, potencializando a indicação para o manejo florestal. Os resultados da quantificação de umidade, extrativos totais, polifenóis totais e cinzas, bem como o índice de classe química obtido para as madeiras são apresentados na Tabela 3. A madeira de *Eschweilera odora* apresentou o menor teor de umidade (11,58%), enquanto *Micrandropsis scleroxylon* apresentou o maior teor (14,04%). Para o teor de extrativos houve situação inversa, o menor valor foi para *M. scleroxylon* (2,37%) e o maior para *E. odora* (7,08%).

Tabela 3. Resultados dos ensaios quantitativos das madeiras.

Madeiras	Umidade %	Extrativos Totais %	Polifenóis Totais %	pH	Cinzas %	ICQ
<i>Byrsonima crispera</i>	12,70	3,48	0,19	5,12	0,63	0,67
<i>Eschweilera coriacea</i>	12,22	5,90	0,75	4,76	0,47	0,67
<i>Eschweilera odora</i>	11,58	7,08	2,63	4,83	0,62	0,78
<i>Eschweilera truncata</i>	12,74	6,08	0,84	5,05	0,83	0,56
<i>Inga alba</i>	13,16	6,48	0,64	5,30	0,33	0,44
<i>Inga paraensis</i>	13,09	4,77	0,86	5,08	0,53	0,67
<i>Micrandropsis scleroxylon</i>	14,04	2,37	0,21	5,88	0,29	0,44
<i>Protium puncticulatum</i>	12,87	4,40	0,89	4,65	0,24	0,56
<i>Protium tenuifolium</i>	13,02	5,92	1,05	5,13	0,82	0,44
<i>Swartzia recurva</i>	12,93	5,50	2,42	5,22	0,39	0,56

ÍCQ = Classes detectadas/Total de classes.

O teor de polifenóis totais foi em média 1,05%, e cinzas < 1% para as madeiras estudadas, o pH de *M. scleroxylon* teve caráter mais básico (5,88) e *Protium puncticulatum* mais ácido (4,65). Quanto ao índice de classe química (ICQ), os extrativos de *E. odora* são os mais ricos de classes químicas (0,78).

Análise fitoquímica

Extrativos de madeira amazônica são ricos em metabólitos secundários. Três grandes classes químicas (terpenóides, compostos nitrogenados e fenólicos) foram investigadas e distribuídas em grupos (Figura 2). Destes compostos, os taninos (dois tipos) e os flavonóides (sete tipos) são as classes com maior variabilidade. As maiores ocorrências do metabólito nos extrativos da espécie foram para as classes: saponinas e flavonóides (90%), tanino condensado (70%) e esteróides (60%). Enquanto a menor ocorrência foi para heterosídeos cianogênicos (20%).

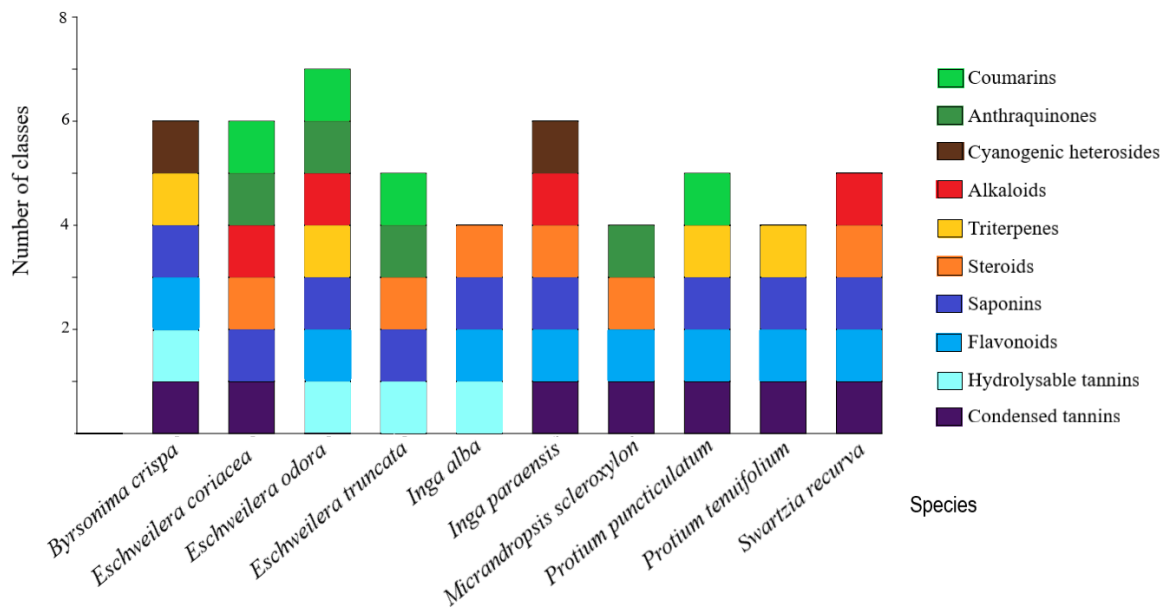


Figura 2. Classes químicas presentes nos extrativos de espécies florestais amazônicas.

Eschweilera truncata, *Inga alba*, *I. paraensis*, *M. scleroxylon* e *Swartzia recurva*, contêm esteróides e *Byrsonima crispera*, *E. odora*, *Protium puncticulatum* e *P. tenuifolium* triterpenos. Os resultados aparentemente indicam que os extrativos positivos para esteróides e triterpenos apresentam saponinas do tipo esteroidal e

triterpênica, respectivamente. Para a análise de alcalóides, apenas os extrativos de quatro espécies apresentaram resultados positivos, a saber: *E. coriacea*, *E. odora*, *I. paraensis* e *S. recurva*. Heterosídeos cianogênicos foram confirmados apenas para as madeiras de *B. crispera* e *I. paraensis* nos testes qualitativos.

A classe dos taninos foi detectada nos dez extratos, e o tipo condensado foi detectado em *E. coriacea*, *I. paraensis*, *M. scleroxylon*, *P. puncticulatum*, *P. tenuifolium* e *S. recurva*. Enquanto para *E. odora*, *E. truncata* e *I. alba*, taninos hidrolisáveis, sendo que *B. crispera* apresentou respostas positivas para dois tipos de taninos. Outros compostos fenólicos avaliados nos extrativos das madeiras amazônicas foram cumarinas e antraquinonas. Em todas as espécies do gênero *Eschweilera*, esses fenólicos foram detectados, assim como antraquinonas para *M. scleroxylon* e cumarinas para *P. puncticulatum*. Os ensaios qualitativos para detecção dos tipos de flavonóides foram positivos para a maioria dos extratos, exceto para *E. truncata*, que foi negativo. Nos extrativos das Fabaceae *I. alba* e *S. recurva* foi detectado o maior número de classes de flavonóides (Tabela 4).

Table 4. Resultados de testes qualitativos para a classe dos flavonóides.

Espécies	Flavonoides – Tipos						
	antocianina/ antocianidina	flavona/ flavonol	chalcona/ aurona	flavanonol	Leuco antocianidina	catequina	flavanona
<i>Byrsonima crispera</i>	-	+	-	-	-	+	-
<i>Eschweilera coriacea</i>	-	-	-	-	-	+	-
<i>Eschweilera odora</i>	-	-	-	+	-	-	-
<i>Eschweilera truncata</i>	-	-	-	-	-	-	-
<i>Inga alba</i>	-	+	-	+	-	-	+
<i>Inga paraensis</i>	-	+	-	-	-	+	-
<i>Micrandropsis scleroxylon</i>	-	+	-	-	-	+	-
<i>Protium puncticulatum</i>	-	-	-	-	-	+	+
<i>Protium tenuifolium</i>	-	-	-	-	-	+	+
<i>Swartzia recurva</i>	-	+	+	+	-	+	-

+ = positivo; - = negativo ou não detectado

DISCUSSÃO

Propriedades físico-químicas de espécies florestais amazônica

Variações de umidade, extrativos e polifenóis indicam parâmetros importantes quando se pretende indicar as matérias-primas vegetais para fins industriais. Em estudos de dinâmica ambiental, certos processos podem ser explicados e correlacionados com as concentrações de extrativos e polifenóis em material lenhoso e amostras de solo. O pH também é um fator importante no uso da madeira, pois indica possíveis compostos, como extratos ricos em tanino que revelam um pH ácido, e compostos como alcalóides que possuem caráter básico, o que também pode influenciar no pH são carbonatos, fosfatos e sais que compõem os resíduos minerais fixos como Ca, K, Mg e Si. Vale ressaltar que os resultados deste estudo estão na faixa estimada para madeiras tropicais (Pizzi 2019; Rodriguez-Jimenez *et al.* 2019; FPL 2021).

O conhecimento limitado sobre os aspectos químicos das madeiras amazônicas, aliado à dificuldade de exploração, motivaram pesquisas em manejo florestal, pois estão intrinsecamente relacionados à ecologia, bioquímica florestal e até mesmo aspectos sociais dos povos da floresta, da melhor forma possível, utilizando desta matéria-prima. Espécies nativas de florestas tropicais de pequeno diâmetro não são comumente estudadas, como é o caso das espécies estudadas, fato que impede sua exploração sustentável devido à falta de conhecimento técnico-científico sobre a qualidade da madeira (Christoforo *et al.* 2017; Fróes *et al.* 2019). Neste sentido, é crescente a preocupação no manejo florestal, sobretudo devido à atual mudança de paradigma da indústria florestal para a produção de produtos madeireiros de elevado valor agregado para otimizar a cadeia de produtiva e, em última análise, aumentar a competitividade do setor num contexto de bioeconomia (Mascarenhas *et al.* 2021; Nascimento *et al.* 2021).

Análise fitoquímica

Os extrativos (metabólitos secundários) estão distribuídos em todas as partes da planta, desde as partes aéreas (folhas, flores, frutos), passando pelo tronco até as raízes. No tronco da árvore, concentra-se na casca e na madeira (cerne), sendo nos canais de resiníferos, nos ductos gomíferos e nas células parenquimáticas (Figura 3). O alburno é geralmente rico em monômeros simples e nutrientes como gorduras,

amido, açúcares simples, esteróis livres ou esterificados, compostos fenólicos. Por outro lado, o cerne tende a ser deficiente em nutrientes, glicosídeos e alguns metabólitos secundários, mas são ricos em compostos como tanino hidrolisável e condensado e vários outros polifenóis, alcalóides, óleos, gomas, resinas, corantes, sais de ácidos orgânicos, sendo predominantemente depositados no cerne, conferindo-lhe cor mais acentuada e maior densidade (Miranda *et al.*, 2017; Nascimento *et al.* 2021).

Os resultados dos testes fitoquímicos fornecem um panorama da ocorrência de classes químicas que ocorrem nos extrativos das madeiras estudadas. A classe dos terpenos ou terpenóides, constituem uma grande variedade de substâncias vegetais, onde certos triterpenos podem ser encontrados em resinas localizadas nas células parenquimáticas do cerne e relacionadas a esteroides, como o β -sitosterol, muito comum na madeira. Outra classe de metabólitos secundários comuns nas madeiras são as saponinas (glicosídeos esteróides e triterpenos), que estão associadas a certa toxicidade que pode estar relacionada à complexação com esteroides (Simões *et al.* 2017; Taiz *et al.* 2017).

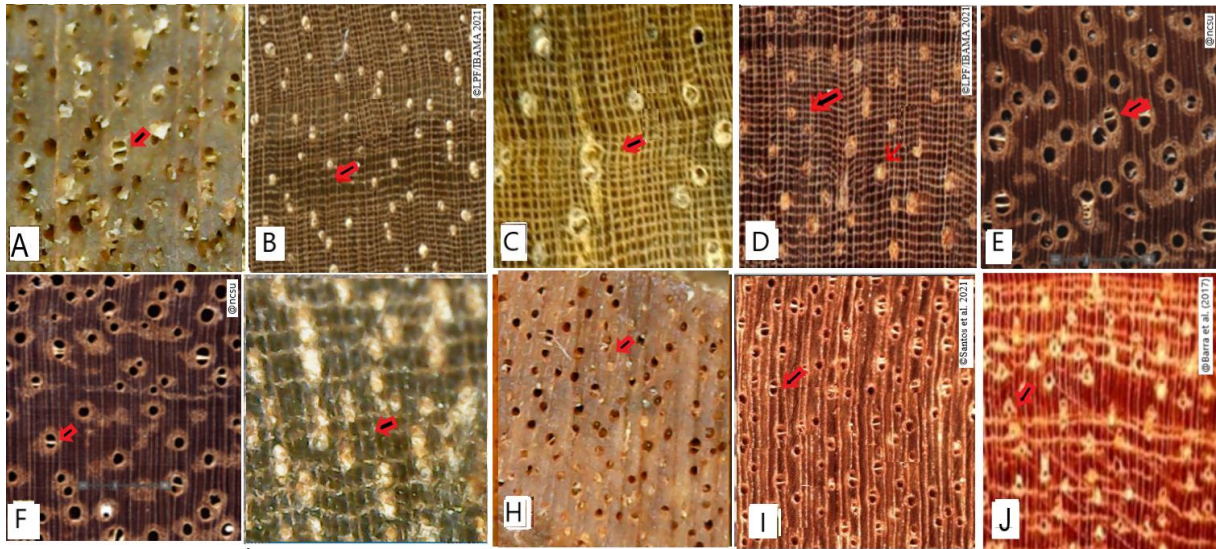


Figura 3. Corte transversal das madeiras estudadas com chamada aos tipos de parênquimas onde estão depositados os extrativos (10-20X): A – *Byrsonima crispera* (paratraqueal vasicêntrico); B – *Eschweilera coriacea* (linhas reticulado); C – *Eschweilera odora* (linhas reticulado); D - *Eschweilera truncata* (linhas reticulados); E – *Inga alba* (paratraqueal vasicêntrico); F - *Inga paraensis* (paratraqueal aliforme; faixas confluentes); G - *Micrandropsis scleroxylon* (linhas reticulado); H - *Protium puncticulatum* (apotraqueal indistinto); I - *Protium tenuifolium* (apotraqueal difuso); J - *Swartzia recurva* (paratraqueal aliforme).

Dentre os principais compostos extraídos de plantas, os alcalóides são uma das classes mais pesquisadas do ponto de vista químico e biológico, devido às suas diversas ações psicotrópicas, estimulantes e tóxicas (Simões *et al.* 2017). Esta classe foi detectada em extrativos de Lecythidaceae *E. coriacea* e *E. odora*, e em Fabaceae *I. paraensis* e *S. recurva*. Outra classe que compõe os compostos nitrogenados são os heterosídeos cianogênicos, que foram detectados em *B. crispera* e *I. paraensis*. Quando esses compostos estão presentes na amostra, os íons cianeto reagem com o picrato, caracterizando as cores marrom-avermelhadas no papel-teste. Os compostos cianogênicos podem estar presentes em todas as estruturas vegetais, como raízes, caules e folhas e estão intimamente ligados ao sistema de defesa contra insetos, herbívoros e patógenos, em geral, a quantidade desses compostos varia em cada espécie e dentro da planta pode variar com , clima e outras condições que influenciam seu crescimento. Quanto mais rápido a planta se desenvolve, maior sua concentração (Egekeze e Oehme 1980; Evans 2017).

Os compostos fenólicos são estruturas que possuem hidroxilas e anéis aromáticos em formas simples ou poliméricas, sendo classificados em ácidos fenólicos, flavonóides (antocianina, catequina, chalcona, flavanonol, flavanona entre outros), taninos (condensados/catequina ou hidrolisáveis/ ácidos gálico e elágico), cumarinas, lignanas, quinonas, entre outros. Esses compostos estão diretamente relacionados à resistência biológica da madeira, ação antioxidante e podem responder às condições climáticas (Barbosa *et al.* 2006; Simões *et al.* 2017).

Os taninos são substâncias polifenólicas naturais e sua produção no organismo tem função de defesa contra herbívoros, no campo industrial é utilizado na produção de adesivos naturais para madeira, curtimento de couro, biocidas naturais, floculantes para ETE (estação de tratamento de efluentes) e, até mesmo, como fitoterápicos, mas esses compostos devem ser minuciosamente investigados quando usados com outros produtos naturais (Grasel e Ferrão 2016; Pizzi 2019). Santos *et al.* (2018) e Krenitsky *et al.* (2019) revisaram várias espécies de madeira que são irritantes, tóxicas ou sensibilizantes, relataram que taninos, quinonas e alcalóides sinergizam para ação tóxica (alergenicidade). No estudo, todos os extratos pesquisados continham taninos, a maioria do tipo condensado.

Outros compostos que podem ocorrer na madeira são as cumarinas e as antraquinonas. As antraquinonas pertencem à classe das quinonas (benzoquinonas, naftoquinonas e antraquinonas) compostos com ampla distribuição natural,

principalmente na madeira, casca e raízes. Algumas quinonas são altamente tóxicas, como lapachol e dihidrolapachol (ocorrendo na madeira de *Tectona grandis* e algumas espécies de *Handroanthus*), dalbergiones (*Dalbergia* sp.), acamelina e benzoquinona (*Acacia melanoxylon*). Nos extrativos testados, antraquinonas foram detectadas em todas as espécies de *Eschweilera*, e em *M. scleroxylon*. Quanto às cumarinas, o teste positivo foi para as *Eschweilera* e *P. puncticulatum*. As cumarinas são derivados do ácido cinâmico, encontrados em abundância no reino vegetal, e uma grande variedade de atividades biológicas são atribuídas a esses compostos. Uma das cumarinas mais conhecidas é a 1,2-benzopirona obtida da semente de *Dipteryx odorata* onde são amplamente utilizadas na indústria alimentícia e cosmética. Em geral, esses compostos são responsáveis pela durabilidade natural das madeiras em que ocorrem (Vyas *et al.* 2019; Loncar *et al.* 2020).

Os flavonóides são produzidos por vias biossintéticas mistas, uma via chiquimato (fenilpropanóides) e outra via acetato (acetil coenzima A), e constituem uma importante classe de polifenóis, abundantemente presentes entre os metabólitos secundários das plantas. Esses compostos constituem um grupo de pigmentos vegetais (flavonas e flavonóis) amplamente distribuídos na natureza. Sua presença em hortaliças está relacionada às seguintes funções: proteção de hortaliças contra a incidência de raios ultravioleta e visível, além de proteção contra herbívoros (as flavanonas são responsáveis pelo sabor amargo), insetos, fungos, vírus e bactérias; atração de animais para fins de polinização; antioxidantes; controle da ação dos hormônios vegetais; agentes alelopáticos e inibidores enzimáticos. Outra característica dessa classe fitoquímica é que são marcadores taxonômicos de Fabaceae (Barbosa *et al.* 2006; Simões *et al.* 2017). No presente estudo, foi confirmada a presença deste marcador para as Fabaceae *I. alba* (flavona, flavanonol e flavanona), *I. paraensis* (catequina e flavona) e *S. recurva* (catequina, chalcona, flavona e flavanonol).

Com os resultados das classes químicas, é possível relacionar a alta durabilidade natural de madeiras ricas em extrativos, onde *E. coriacea*, *E. odora* e *I. paraensis* apresentam maior ICQ, formado principalmente por taninos, alcalóides e antraquinonas. Outra indicação é que a ocorrência de certas classes de metabólitos é característica de espécies, gêneros e famílias botânicas (Figura 4). Esse princípio é a base da quimiotaxonomia, chamada quimio sistemática, que visa classificar e identificar os organismos vegetais, conforme as semelhanças (marcadores

quimiotaxonômicos) ou diferenças na composição química (estrutura molecular) presentes nos extrativos.

A família Burseraceae neste estudo foi representada por duas espécies do gênero *Protium*, nos extrativos foi confirmada a presença de flavonóides, saponinas, taninos e triterpenos, e *P. puncticulatum* diferiu de *P. tenuifolium* pela presença de cumarinas, onde esses resultados puderam ser comparados com o estudo de Santos *et al.* (2021), que identificou misturas de triterpenos α - e β -amyrin, lupeol e lignanas para *P. puncticulatum*, e também misturas de triterpenos α - e β -amyrin e derivados de alquiorescinol (intergracin A e B) para *P. tenuifolium*.

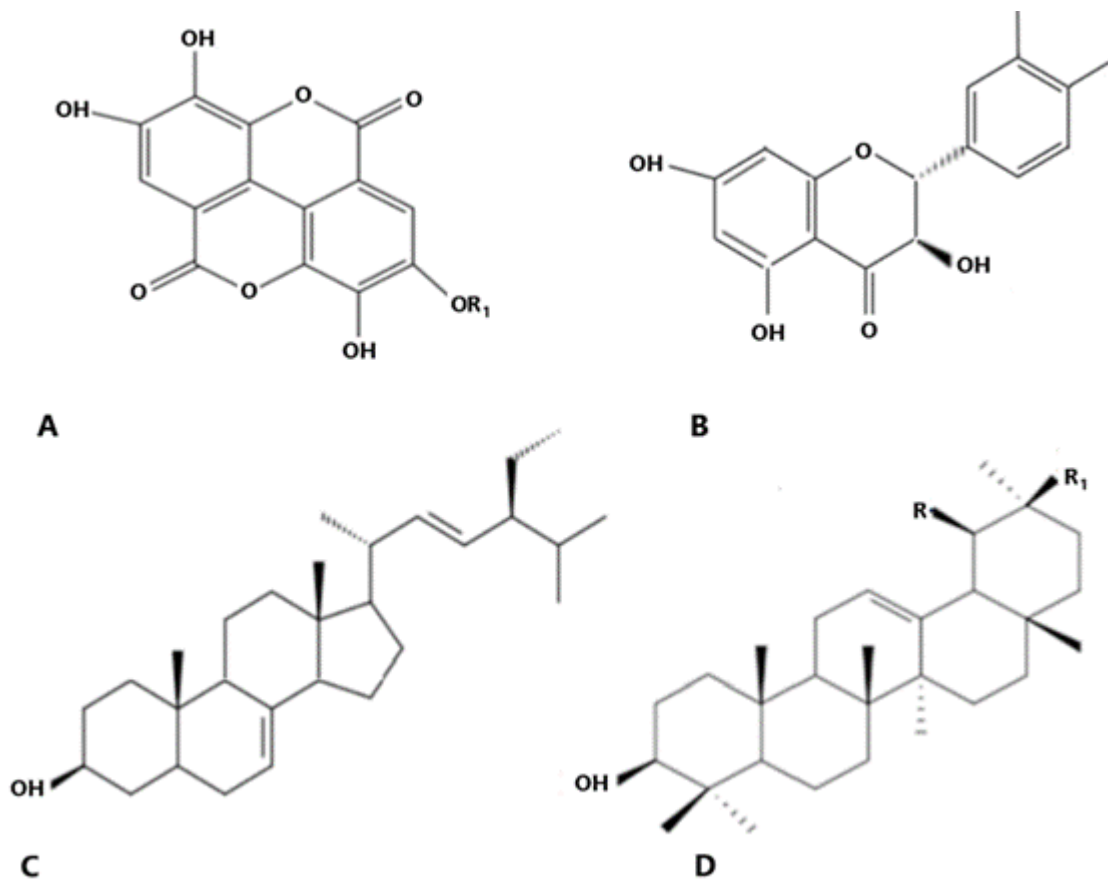


Figura 4. Substâncias identificadas em madeiras amazônicas: A – composto fenólico Schweilenol C (derivado do ácido elágico) encontrado no gênero *Eschweilera* (Yang *et al.* 1998); B - flavonóide Taxifolina encontrado no gênero *Inga* (Gomes *et al.* 2016); C - espinasterol, esteróide encontrado no gênero *Inga* (Gomes *et al.* 2016); D - triterpeno α e β – Amirina, encontrados no gênero *Protium* (Santos *et al.* 2021).

No extrato de *B. crispera* (Malpighiaceae) o perfil químico é composto por flavonóides, heterosídeos cianogênicos, saponinas, triterpenos, taninos condensados

e hidrolisáveis. Souza *et al.* (2018) traçam um perfil químico para o gênero *Byrsonima* muito próximo do nosso estudo (flavonóides, triterpeno e taninos), e adicionam a este perfil um novo diterpeno (byrsonimaquinone) que poderia ser usado como marcador para o gênero. *Micrandropsis scleroxylon* (Euphorbiaceae) é o único espécime representativo do gênero *Micrandropsis* (Cordeiro e Secco 2015), e estudos fitoquímicos para esta espécie são muito escassos. Alvarenga *et al.* (1981) resume os poucos estudos químicos da espécie, com a identificação do diterpenóide micrandrol (tipo A, B e C). O perfil fitoquímico observado para esta espécie é composto por antraquinonas, esteróides, flavonóides e taninos condensados, sendo este estudo o primeiro registro de prospecção fitoquímica, em extrativos de *M. scleroxylon*.

Na indústria química e farmacêutica, há muitos usos de constituintes de extrativos de madeira para inseticidas, corantes, adesivos, aromatizantes e medicamentos (Paritala *et al.* 2015; Pizzi 2019). No entanto, deve-se ter cuidado ao utilizar certas espécies com perfil formado por fenol, heterosídeos, quinonas, taninos e triterpenos, onde a ocorrência conjunta dessas classes de metabólitos confere alto grau de toxicidade à madeira. Assim, a madeira que possui esses compostos em seus extrativos é imprópria para a confecção de biojóias, utensílios de cozinha e brinquedos, pois podem causar problemas à saúde. As espécies aqui estudadas *E. coriacea*, *E. odora*, *E. truncata*, *I. paraensis* e *S. recurva* apresentaram perfil químico próximo a madeiras dos gêneros *Cordia*, *Dalbergia* e *Handroanthus* (gêneros com ação tóxicas) (Varejão *et al.* 2009; Vyas *et al.* 2019). Entretanto, o uso dessas espécies é viável para outras aplicações, como na construção civil, produtos engenheirados, de acordo com seu perfil tecnológico ou mesmo como objetos de decoração, por exemplo. As propriedades medicinais ou fisiológicas dos compostos detectados também podem ser investigadas, bem como o potencial bioativo contra organismos xilófagos, para uso em inseticidas de base natural e/ou fungicidas para produtos de madeira.

O estudo fitoquímico de extrativos das espécies *Protium puncticulatum* e *P. tenuifolium* (breu-vermelho 1 e 2), *Inga alba* e *I. paraensis* (ingá-branca e vermelha), *Eschweilera odora*, *E. coriacea* e *E. truncata* (ripeiro-preto, matá-matá amarelo e preto), *Swartzia recurva* (muirajibóia), *Byrsonima crispera* (murici) e *Micrandropsis scleroxylon* (piãozinho) são importantes para um uso mais adequado da madeira, de modo que, após o estudo das características químicas, seja possível indicar seu uso para fins específicos, além de incentivar estudos de manejo e produtos de engenharia

para uso de espécies pouco conhecidas e até mesmo madeira de árvores de pequeno diâmetro.

CONCLUSÃO

Os resultados da prospecção das classes químicas de extrativos de espécies arbóreas da Amazônia, indicaram que as madeiras de matá-matá (*Eschweilera odora*) apresentaram maior índice de classes químicas. Certas classes estudadas podem indicar um possível agrupamento taxonômico como observado para os gêneros de madeiras de *Byrsonima* - murici (flavonóides, taninos e triterpeno), *Eschweilera* - matá-matá (alcalóides, antraquinonas, cumarinas), *Micrandropsis* - piãozinho (antraquinonas, esteróides, flavonóides), *Inga* – ingá (flavona, flavanona e flavanonol) e *Protium* – breu-vermelho (triterpenos). A análise do perfil dos extrativos de madeira possivelmente confere maior ou menor durabilidade biológica à espécie, favorecendo o uso adequado da espécie, bem como atenção às questões de saúde pública quanto ao manejo ou uso de espécies consideradas tóxicas.

Capítulo 4

Nascimento, C.S.; Araújo, R.D.; Eugênio da Silva, C.; Nascimento, C.C.; Menezes, V. S. and Santos, J. Near infrared spectroscopy as a tool to discriminate tannins from Amazonian species. Publicado na revista *Ciência e Agrotecnologia* em julho/2022.


Ciência e Agrotecnologia, 46:e001422, 2022
<http://dx.doi.org/10.1590/1413-7054202246001422>

Ciência e Agrotecnologia
SCIENCE AND AGROTECHNOLOGY

Agricultural Sciences
eISSN 1981-1829

Near infrared spectroscopy as a tool to discriminate tannins from Amazonian species

Espectroscopia do infravermelho próximo como ferramenta para discriminar taninos de espécies amazônicas

Cristiano Souza do Nascimento^{1*}, Roberto Daniel de Araújo², Claudia Eugênio da Silva³, Claudete Catanhede do Nascimento², Valdiek da Silva Menezes¹, Joaquim dos Santos²

¹Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia/INPA, Programa de Pós-Graduação em Ciências de Florestas Tropicais/PPGCFT, Manaus, AM, Brasil

²Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia/INPA, Manaus, AM, Brasil

³Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia/INPA, Programa de Pós-Graduação em Botânica/PPGBOT, Manaus, AM, Brasil

*Corresponding author: s-nascimento@hotmail.com

Received in January 23, 2022 and approved in May 3, 2022

ESPECTROSCOPIA DO INFRAVERMELHO PRÓXIMO COMO FERRAMENTA PARA DISCRIMINAR TANINOS DE ESPÉCIES AMAZÔNICAS

RESUMO

A espectroscopia do infravermelho próximo (NIR) é uma ferramenta capaz de fornecer resultados eficientes para moléculas orgânicas de diversos materiais. O estudo desenvolveu modelo preditivo com a espectroscopia NIR com Transformada de Fourier, para distinguir taninos em diferentes espécies florestais da Amazônia. Foram obtidas amostras de diferentes regiões do Estado do Amazonas/Brasil, testes para taninos e obtenção de espectros NIR foram realizados. A montagem de matrizes de dados espectrais, versus analitos de interesse foram cruzados com os resultados das análises tradicionais. Um conjunto de calibração e validação foi construído para taninos condensados, taninos hidrolisáveis e amostras sem taninos. Ao final, avaliou-se o desempenho dos modelos de classificação quanto à sensibilidade, índice de identificação e erros. Em 63% das espécies estudadas, foi detectada a classe de tanino condensado, seguida de 34% para espécies que não continham taninos. A análise discriminante produziu agrupamentos com índice de sensibilidade de acerto > 90%. O modelo desenvolvido pode ser aplicado em estudos de ecologia, silvicultura e quimiotaxonomia, com foco em compostos fenólicos como taninos. A metodologia proposta neste trabalho apresenta vantagens sobre os métodos de referência, destacando-se a menor necessidade de preparo das amostras, menor tempo de análise, não utiliza-se reagentes e conseqüentemente, não gera resíduos.

Palavras-chave: Taninos condensados; madeiras da Amazônia; NIR; análise discriminante; metodologia não destrutiva

NEAR INFRARED SPECTROSCOPY AS A TOOL TO DISCRIMINATE TANNINS FROM AMAZONIAN SPECIES

ABSTRACT

Near infrared spectroscopy (NIR) is a tool capable of providing efficient results for organic molecules of different materials. We developed a predictive model using Fourier Transform NIR Spectroscopy to distinguish the types of tannins in different

forest species in the Amazon. Samples were obtained from different regions of the State of Amazonas/Brazil, and tests for tannins were performed, including obtaining NIRS spectra. The assembly of spectral data matrices versus analytes of interest was crossed with the results of traditional analyses. In addition, a calibration and validation set was constructed for condensed tannins, hydrolyzable tannins, and samples with no tannins. Finally, the performance of classification models was evaluated for sensitivity, identification index, and errors. The condensed tannin classes were detected in 63% of the species studied, followed by 34% of the species not containing tannin. The discriminant analysis produced groupings of classes, with a hit sensitivity index > 90%. The developed model can be applied in studies of ecology, forestry and chemotaxonomy, with a focus on phenolic compounds such as tannins. The proposed methodology has advantages over the reference methods, reflected as a lower need for sample preparation, shorter analysis time, no use of reagents, and, consequently, no generation of waste.

Keywords: Condensed tannins; Amazon woods; NIRS; discriminant analysis; non-destructive methodology.

INTRODUÇÃO

A Amazônia é conhecida por ter a maior área de floresta tropical. Um dos últimos levantamentos taxonômicos na região registrou 14.003 espécies, 1.788 gêneros, 188 famílias de espécies vegetais (Cardoso *et al.* 2017). Estudos de ecologia e botânica exigem conhecimento da natureza química da flora, além de aplicações industriais e processos biotecnológicos (Nascimento *et al.* 2021).

Os taninos são polifenóis amplamente presentes nas plantas. São abundantes nos trópicos e certas famílias botânicas como Anacardiaceae, Leguminosae, Myrtaceae e Polinaceae são ricas neste composto (Coq *et al.* 2010; Simões *et al.* 2017). Os taninos hidrolisáveis (ácido gálico e elágico) conferem resistência às plantas contra herbívoros, enquanto os taninos condensados (catequina e proantocianidina) garantem proteção contra microrganismos patogênicos; assim, garantindo maior durabilidade natural da espécie. Industrialmente, os taninos são utilizados na fabricação de couro, bebidas e adesivos para madeira (Monteiro *et al.* 2005; Grasel e

Ferrão 2016). Os taninos são geralmente caracterizados por métodos analíticos como cromatografia líquida de alta eficiência (HPLC), ressonância magnética nuclear (RMN) (^{13}C), espectrometria de massa de tempo de voo por desorção a laser assistida por matriz (MALDI-TOF), entre outros. Esses procedimentos, embora eficientes, são trabalhosos e caros e utilizam solventes nocivos e equipamentos de colorimetria. Além disso, essas técnicas são realizadas pelo método úmido e requerem extensa preparação de amostras, vários reagentes, vidrarias e equipamentos. Quando a atividade final visa um grande número de amostras, os estudos são muitas vezes inacessíveis, necessitando de novas ferramentas (Barbosa *et al.* 2006; Ricci *et al.* 2015).

Metodologias não destrutivas permitem estimar diversos materiais vegetais, sem alterar sua estrutura, preservando a amostra e, assim, não comprometendo seu uso. A maioria desses métodos são métodos indiretos que se baseiam na investigação de correlações e ajuste de modelos de calibração entre as propriedades de interesse e outras mais fáceis de medir. O desenvolvimento de análises estatísticas sofisticadas e softwares confiáveis levaram ao uso da espectroscopia na região do infravermelho próximo (NIR) em diversas áreas como agricultura, ciências forenses e a indústria (Menezes *et al.* 2014; Souza *et al.* 2017).

A espectroscopia NIR é uma ferramenta analítica que fornece resultados eficientes para analisar quantitativamente moléculas orgânicas. Tem sido utilizado em diversas aplicações industriais e pesquisas científicas, gerando resultados robustos em ecologia, botânica e silvicultura (Ono *et al.* 2003; Tsuchikawa e Schwanninger 2013). No infravermelho próximo, é utilizada vibração que utiliza energia de fótons ($h\nu$) na faixa de 13.000 a 4.000 cm^{-1} . Espectroscópios mais eficientes são acoplados à transformada de Fourier (FT), que consiste em utilizar um interferograma que transforma, ou “decodifica” o espectro de frequência versus intensidade (Pasquini 2018). O uso de modelos NIR, permite a correlação espectral com diferentes propriedades da madeira, e é possível estimar suas características rapidamente, sem destruir as amostras e sem usar reagentes (Fernandes *et al.* 2017; Nascimento *et al.* 2021).

Braga *et al.* (2011) utilizaram a técnica NIR para caracterizar madeiras tropicais, e seus modelos apresentaram baixos erros de discriminação, confirmando a eficiência desta ferramenta. Da mesma forma, Tigabu *et al.* (2018) usaram o infravermelho próximo para estudar a composição química de *Betula* sp. (polissacarídeos, proteínas

e ácidos graxos) e obteve 99% de precisão.

Falcão e Araújo (2011) confirmaram a robustez da espectroscopia no infravermelho (refletância total atenuada) para distinguir diferentes tipos de taninos no curtimento de couro. Essa singularidade foi possível a partir de uma comparação completa do perfil espectral das amostras com o tanino de referência. Resultados de estudos com NIR afirmam que seus espectros podem ser considerados como uma "assinatura espectral" que pode identificar com precisão a matéria-prima investigada (Durgante *et al.* 2013; Souza *et al.* 2017). Nesse contexto foi desenvolvido um modelo preditivo FT-NIR para distinguir tipos de taninos que ocorrem no tecido do xilemático (madeira) de diferentes espécies florestais da região amazônica.

MATERIAL E MÉTODOS

As espécies florestais foram obtidas em diferentes regiões do estado do Amazonas/Brasil (material complementar MC1). Para cada espécie, foram obtidas cunhas (cerne, sentido da casca) e repetições de diferentes indivíduos, totalizando 100 espécies (Figura 1 e Tabela 1). Corpos-de-prova nas dimensões 20 × 20 × 30 mm foram analisados macroscopicamente e comparados, com material da Coleção Botânica - Xiloteca/PCAC/INPA (Freitas e Vasconcellos 2019), pelo especialista J.A. Freitas para confirmação das espécies, as quais foram posteriormente registradas e depositadas na coleção.

As amostras foram cortadas em peças menores (serra fita - Videira), Picotadas (Pallmann - PZ8) e moídas (moinho Willey) para obtenção de serragem. Posteriormente, a serragem foi peneirada com um conjunto de peneiras de 0,84, 0,42, 0,25 e 0,18 mm (Ro-Tap/Testing Sieve Shaker, Modelo B). A granulometria padrão para análise úmida e espectroscópica varia de 0,41 a 0,25 mm, conforme recomendado pela American Society for Testing and Materials (ASTM 2021) para a análise química da madeira. A fração padrão foi dividida em duas porções, a saber, porção 1 para obtenção de extratos hidroalcoólicos e detecção de tipos de taninos e porção 2 para obtenção de espectros NIR.

Obtenção dos espectros NIR

Os espectros foram obtidos a partir de 10,00 g de serragem de madeira (0,41–0,25 mm) em “copo giratório de amostra” do sistema FT-NIR Antaris II Thermo

Scientific. Os dados foram coletados no software RESULT™ na região entre 10.000 e 4.000 cm^{-1} (resolução de 8 cm^{-1} , 96 varreduras - espectro/amostra de 16 scan), onde cada leitura/amostra foi realizada em triplicata, totalizando 996 espectros (material complementar MC3) que foram utilizados para análise multivariada. Nesta etapa destaca-se a importância da padronização da granulometria das amostras, bem como o controle da umidade (0,41–0,25 mm; umidade relativa < 60% a 20 °C), reduzindo os possíveis efeitos de desvios instrumentais durante a digitalização (Nascimento *et al.* 2012; Silva *et al.* 2013).

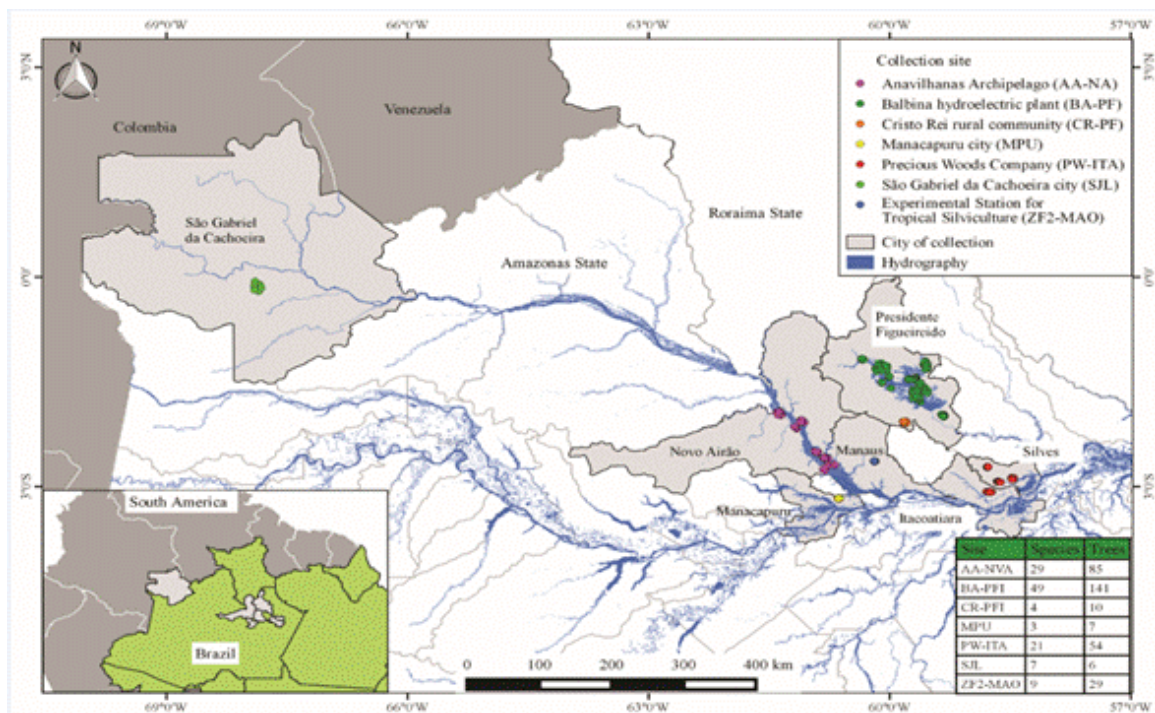


Figura 1. Área geográfica da coleta das espécies florestais da Amazônia.

Método de referência para detecção de tipos de taninos

Diferentes tipos de taninos em espécies florestais foram detectados por metodologia úmida (Matos 2009; Varejão *et al.* 2012) usando como padrões a catequina P.A., Merck (taninos condensados), e ácido gálico P.A., Merck (taninos hidrolisáveis). Extratos hidroalcoólicos foram obtidos a partir de 10,00 g de cada amostra (100 mL do solvente) em banho ultrassônico (Unique) a 65 °C por 60 minutos. Posteriormente, os extratos foram analisados quanto à presença/ausência e tipo de taninos (condensados ou hidrolisáveis).

I: Em um tubo de ensaio, adicionaram-se 2 mL do extrato e três gotas da solução

alcoólica de FeCl_3 (10%), agitou-se e, posteriormente, observou-se possível variação de cor ou precipitado abundante;

II: Em um balão de fundo redondo, foram adicionados 25 mL do extrato, mais 10 mL de solução de $\text{CH}_2\text{O} + \text{HCl}$ (2:1). A solução foi aquecida (90 °C) sob refluxo durante 30 minutos. Para ambos os testes, formou-se um precipitado marrom e uma solução esverdeada, confirmando a presença de taninos condensados (tanino pirocatequina). Além disso, formou-se uma solução com tons azulados, confirmando taninos hidrolisáveis (tanino pirogálico);

III - Em um tubo de ensaio foi adicionado 2 mL de extrato e 2 mL da solução $\text{Pb}(\text{C}_2\text{H}_3\text{O}_2)_2$ (10%, neutro), agita-se e observa-se. Em presença de acetato de chumbo, os taninos hidrolisáveis formam um precipitado floculoso (sal branco).

Esses testes foram comparados com um teste em branco efetuado com água e catequina padrão (tanino condensado) e ácido gálico (tanino hidrolisável).

Processamento de dados e análise multivariada

O software TQ Analyst™ foi usado na análise multivariada. Antes desse procedimento, para reduzir a influência de várias fontes não relacionadas às informações físicas ou químicas transportadas pelos espectros brutos, foi aplicada a técnica de pré-processamento, correção de dispersão multivariada (MSC).

Os espectros foram estudados para avaliar a similaridade e a tendência de agrupamento. Posteriormente, os dados foram submetidos à análise de componentes principais (PCA).

A montagem das matrizes de dados espectrais versus o analito de interesse (classes de taninos), foram cruzados com os resultados do método de referência e conjuntos de calibração/validação foram construídos para taninos condensados (TC), taninos hidrolisáveis (TH) e amostras sem a presença de taninos (ST). A faixa espectral NIR foi selecionada pelo software, que configurou uma região capaz de cobrir toda a zona espectral de seus padrões.

O modelo de classificação desenvolvido consistiu em uma análise discriminante que utilizou o algoritmo de Mahalanobis (distância Mahalanobis – DM) para indicar o agrupamento entre as amostras. Este algoritmo funciona como uma métrica que determina a distância entre um vetor e uma distribuição. O princípio é que uma observação é atribuída à classe que está mais próxima da base na distância de Mahalanobis.

Tabela 1. Espécies florestais arbóreas amazônicas utilizadas no estudo.

No.	Nome científico (nome popular) - Família	N. trees
1.	<i>Acosmium nitens</i> (Vogel) Yakovlev (Taboarana) - Fabaceae	3
2.	<i>Albizia inundata</i> (Mart.) Barneby & J.W. G (Ingarana-da-várzea) - Fabaceae	3
3.	<i>Albizia subdimidiata</i> (Splitg.) Barneby & J.W. G (Faveira-do-igapó) - Fabaceae	3
4.	<i>Aldina heterophylla</i> Benth. (Macucu-de-paca) - Fabaceae	5
5.	<i>Andira parviflora</i> Ducke (Sucupira-vermelha) - Fabaceae	3
6.	<i>Aniba canelilla</i> (Kunth) Mez (Preciosa) - Lauraceae	3
7.	<i>Aniba duckei</i> Kostermans (Pau-rosa) - Lauraceae	3
8.	<i>Aniba</i> sp. (Louro-rosa) – Lauraceae	3
9.	<i>Aspidosperma album</i> (Vahl) Benoiste x Pichon (Piquiá-marfim) - Apocinaceae	6
10.	<i>Aspidosperma obscurinervium</i> Azambuja (Carapanaúba) - Apocinaceae	3
11.	<i>Brosimum parinarioides</i> subsp. <i>Amplicoma</i> (Ducke) (Amapá-doce) - Moraceae	3
12.	<i>Brosimum rubescens</i> Taub. (Pau-rainha) - Moraceae	3
13.	<i>Buchenavia oxycarpa</i> (Mart.) Eichler. (Tanimbuca) - Combretaceae	3
14.	<i>Byrsonima crispa</i> A. Juss. (Murici) – Malphigiaceae	4
15.	<i>Calophyllum brasiliense</i> Cambess. (Jacareúba) - Clusiaceae	3
16.	<i>Campsiandra chigo-montero</i> Stergios (Acapurana) - Fabaceae	3
17.	<i>Cariniana integrifolia</i> Ducke (Tauari-da-Amazônia) Lecythydaceae	3
18.	<i>Caryocar glabrum</i> subsp. <i>Parviflorum</i> Prance (Pequiarana) – Caryocaraceae	5
19.	<i>Caryocar</i> sp. (Pequi-da-Amazônia) - Caryocaraceae	3
20.	<i>Caryocar villlosun</i> (Aubl.) Pers. (Pequiá) - Caryocaraceae	3
21.	<i>Catostemma sclerophyllum</i> Ducke (Castanha-de-paca) - Malvaceae	3
22.	<i>Cedrela odorata</i> L. (Cedro) – Meliaceae	3
23.	<i>Ceiba pentandra</i> (L.) Gaertn. (Sumaúma) - Malvaceae	3
24.	<i>Clarisia racemosa</i> Ruiz & Pav. (Guariuba) - Moraceae	7
25.	<i>Clathrotropis nitida</i> (Benth.) Harms. (Acapu-do-igapó) - Fabaceae	3
26.	<i>Crudia amazonica</i> Benth. (Lombrigueiro) - Fabaceae	3
27.	<i>Cynometra spruceana</i> var. <i>phaselocarpa</i> (Castanha-de-burro) - Fabaceae	3
28.	<i>Didymopanax morototoni</i> (Aubl.) Decne. & Planch. (Morototó) - Araliaceae	3
29.	<i>Dinizia excelsa</i> Ducke (Angelim-pedra) - Fabaceae	6
30.	<i>Diplostropis martiusii</i> Benth. (Sucupira-preta) - Fabaceae	3
31.	<i>Diplostropis</i> sp. (Sucupira) – Fabaceae	3
32.	<i>Dipteryx odorata</i> (Aubl.) Willd. (Cumaru) - Fabaceae	8
33.	<i>Dipteryx polyphylla</i> Huber (Cumarurana) - Fabaceae	3
34.	<i>Duckeodendron cestroides</i> Kuhl. (Pupunharana) - Solanaceae	3
35.	<i>Emmotum fagifolium</i> Desv. ex Ham. (Pau-de-remo) - Icacinaceae	2
36.	<i>Enterolobium schomburgkii</i> (Benth.) Benth. (Sucupira-amarela) - Fabaceae	3
37.	<i>Erismia uncinatum</i> Warm. (Quarubarana) - Vochysiaceae	3
38.	<i>Eschweilera coriacea</i> (DC.) S.A. Mori (Matá-matá) - Lecythydaceae	3
39.	<i>Eschweilera odora</i> (Poepp. ex O. Berg) Miers (Mata-matá preto) - Lecythydaceae	4
40.	<i>Eschweilera truncata</i> A.C. Sm. (Mata-matá) - Lecythydaceae	2
41.	<i>Euxylophora paraenses</i> Huber (Pau-amarelo) - Rutaceae	2
42.	<i>Goupia glabra</i> Aubl. (Cupiúba) – Goupiaceae	3
43.	<i>Guarea trichilioides</i> L. (Gitó) – Meliaceae	3
44.	<i>Handroanthus serratifolius</i> (Vahl) S.O. Grose (Pau - D'Arco) - Bignoniaceae	3
45.	<i>Heterostemon mimosoides</i> Desf. (Haiari) – Fabaceae	3
46.	<i>Hura creptans</i> L. (Assacu) – Euphorbiaceae	3
47.	<i>Hymenaea courbaril</i> L. (Jatobá) – Fabaceae	5
48.	<i>Hymenaea intermedia</i> Ducke (Jatobá) – Fabaceae	3
49.	<i>Hymenaea parvifolia</i> Huber (Jutai) – Fabaceae	3
50.	<i>Hymenolobium excelsum</i> Ducke (Angelim-da-mata) - Fabaceae	4

51.	<i>Inga disticha</i> Benth. (Ingá-chinelo) – Fabaceae	3
52.	<i>Iryanthera</i> sp. (Ucuuba-vermelha) - Myristicaceae	3
53.	<i>Iryanthera tricornis</i> Ducke (Ucuuba-puna) - Myristicaceae	3
54.	<i>Jacaranda copaia</i> (Aubl.) D. Don. (Caroba) - Bignoniaceae	3
55.	<i>Licaria aritu</i> Ducke (Louro-aritu) – Lauraceae	3
56.	<i>Licaria canella</i> (Meisn.) Kosterm.(Louro-chumbo) - Lauraceae	3
57.	<i>Maclobium acaciifolium</i> (Benth.) Benth. (Arapari) - Fabaceae	3
58.	<i>Maclobium angustifolium</i> (Benth.) Cowan(Arapari) - Fabaceae	3
59.	<i>Manilkara amazonica</i> (Huber) A. Chev. (Maçaranduba) -Sapotaceae	3
60.	<i>Manilkara bidentata</i> (A.DC.) A. Chev. (Maçaranduba) -Sapotaceae	3
61.	<i>Manilkara huberi</i> (Ducke) Standl. (Maçaranduba) -Sapotaceae	3
62.	<i>Maquira guianensis</i> Aubl. (Muiratinga) - Moraceae	3
63.	<i>Marmaroxylon racemosum</i> (Ducke) Record (Angelim-rajado) - Fabaceae	3
64.	<i>Martiodendron elatum</i> (Ducke) Gleason (Muirapixuna) - Fabaceae	3
65.	<i>Mezilaurus ita-uba</i> (Meisn.) Taub. exMez (Itaúba) - Lauraceae	3
66.	<i>Micrandropsis scleroxylon</i> (W.A. Rodrigues) (Piãozinho) - Euphorbiaceae	5
67.	<i>Minquartia guianensis</i> Aubl. (Aquariquara) Olacaceae	3
68.	<i>Mora paraensis</i> (Ducke) Ducke (Pracuúba) - Fabaceae	3
69.	<i>Nectandra cuspidata</i> Nees & Mart. (Louro-preto) Lauraceae	3
70.	<i>Ochroma pyramidale</i> (Cav. ex Lam.) Urb. (Pau-de-balsa) - Malvaceae	3
71.	<i>Ocotea cymbarum</i> Kunth (Louro-chumbo) - Lauraceae	3
72.	<i>Osteophloeum platyspermum</i> (Spruce ex A.DC.) (Ucubarana) - Miristicaceae	3
73.	<i>Panopsis rubescens</i> (Pohl) Pittier (Pau-de-rato) - Proteaceae	3
74.	<i>Parkia discolor</i> Benth. (Bico-de-arara) - Fabaceae	3
75.	<i>Peltogyne venosa</i> subsp. <i>Densiflora</i> (Benth.) M.F. Silva (Pau-roxo) - Fabaceae	3
76.	<i>Pentaclethra maculoba</i> (Willd.) Kuntze (Paracaxi) - Fabaceae	3
77.	<i>Piptadenia suaveolens</i> Griseb. (Faveira) - Fabaceae	3
78.	<i>Platonia insignis</i> Mart. (Bacuri-Açu) – Clusiaceae	3
79.	<i>Platymiscium ulei</i> Harms (Macacaúba) - Fabaceae	3
80.	<i>Pouteria guianensis</i> Aubl. (Abiurana) Sapotaceae	3
81.	<i>Protium paraense</i> Cuatrec. (Breu) – Burseraceae	3
82.	<i>Protium puncticulatum</i> J.F. Macbr. (Breu-vermelho) - Burseraceae	4
83.	<i>Qualea paraenses</i> Ducke (Mandioqueira) - Vochysiaceae	4
84.	<i>Roupala montana</i> Aubl. (Louro-faia) – Proteaceae	3
85.	<i>Sacoglottis guianensis</i> Benth. (Uxi-verdadeiro) - Humiriaceae	3
86.	<i>Scleronema micranthum</i> (Ducke) Ducke (Cardeiro) - Malvaceae	4
87.	<i>Sextonia rubra</i> (Mez) van der Werff (Louro-gamela) - Lauraceae	4
88.	<i>Simarouba amara</i> Aubl. (Marupá) - Simaroubaceae	8
89.	<i>Stryphnodendron guianense</i> (Aubl.) Benth.(Barbatimão) - Fabaceae	3
90.	<i>Swartzia argentea</i> Benth. (Acapu-do-igapó) - Fabaceae	3
91.	<i>Swartzia laevicarpa</i> Amshoff (Saboarana) - Fabaceae	3
92.	<i>Swartzia macrocarpa</i> Benth. (Muirapixuna) - Fabaceae	3
93.	<i>Swartzia panacoco</i> (Aubl.) Cowan (Coração-de-negro) - Fabaceae	3
94.	<i>Swartzia polyphylla</i> DC.(Arabá) – Fabaceae	3
95.	<i>Tachigali paniculata</i> Aubl. (Tachi-preto) - Fabaceae	3
96.	<i>Vatairea guianensis</i> Aubl. (Fava-bolacha) - Fabaceae	3
97.	<i>Virola</i> sp. (Ucuúba-vermelha) – Miristicaceae	3
98.	<i>Virola surinamensis</i> (Rol. ex Rottb.) Warb. (Ucuúba) - Miristicaceae	3
99.	<i>Vismia guianensis</i> (Aubl.) Pers. (Lacre) - Hypericaceae	3
100.	<i>Vochysia maxima</i> Ducke (Quaruba) -Vochysiaceae	3

Total de amostras 332

Toda calibração e validação foram desenvolvidas em conjuntos de dados espectrais centrados na média de cada espécie, onde o universo amostral foi composto por 75% (238 amostras) das espécies para calibração e 25% (94 amostras) das espécies para validação (Tabela 2). A seleção aleatória foi realizada para definir as espécies selecionadas para cada modelo.

O desempenho dos modelos de classificação foi avaliado usando os parâmetros de classificação:

Sensibilidade $Sn = \frac{TP}{TP+FN} \times 100$, onde TP (verdadeiro positivo) = Quantidade de amostras determinadas corretamente no tipo de classe de taninos; FN (falso negativo) = Número de amostras determinadas incorretamente na classe ou não pertencente a classe correta.

Erro de Calibração $CE = \frac{E_{Cal}}{T_{Cal}} \times 100$, onde ECal = Número de amostras classificadas incorretamente no conjunto de calibração; TCal = Total de amostras calibradas.

Erro de Validação $VE = \frac{E_{Val}}{T_{Val}} \times 100$, onde EVal = Número de amostras classificadas incorretamente no conjunto de validação; TVal = Total de amostras validadas.

Erro Máximo de Classificação $MCE = \frac{\sum E}{CA} \times 100$, onde $\sum E$ = Soma dos erros (ECal+EVal); CA = Conjunto de amostra total.

Índice de Identificação $II = \frac{N1}{N2} \times 100$, onde N1 = Número de amostras corretamente identificadas no conjunto de validação; N2 = Número total de amostras usadas no conjunto de validação.

Tabela 2. Resumo dos parâmetros quimiométricos usados na modelagem FT-NIR.

Método quimiométrico	Região espectral	Tratamento espectral	Filtros	Conjunto de dados
Análise Discriminante	9.882–4.292 cm ⁻¹	Sem tratamento 1ª derivada; 2ª derivada	MSC; Savitzky-Golay (7 pontos; Polinômio de 5ª); Norris (3 segmentos, intervalos)	Calibração = 238 amostras (714 espectros) Validação = 94 amostras (282 espectros)

MSC = correção de dispersão multivariada.

Utilizando o software PAST versão 4.08 (Hammer *et al.* 2001), foi desenvolvida a análise de Cluster, pareando os dados usando o algoritmo Cosseno, que avaliou a similaridade entre as famílias botânicas (universos das amostras calibradas e validadas) e as classes de taninos.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Este estudo apresenta um modelo para a classificação dos taninos presentes na madeira. O universo espectral analisado é mostrado na Figura 2, onde é possível observar a similaridade espectral. A sobreposição entre os espectros indica a composição química das espécies (ligações características CH e OH), havendo a necessidade de pré-processamento dos espectros. A calibração multivariada detectou possíveis diferenças, resultando na extração de parâmetros úteis de cada amostra. É possível detectar uma pequena diferença na absorção nas bandas de 4.500–4.000, 6.100–5.500 e 7.500–7.000 cm^{-1} mesmo sem tratamento espectral. A região espectral 9.882–4.292 cm^{-1} foi selecionada porque esta banda representa propriedades químicas que podem ser usadas para discriminar classes de taninos nas madeiras amazônicas.

Grasel e Ferrão (2016) utilizaram a espectroscopia de infravermelho próximo (NIR) para discriminar tipos de taninos em extratos tânicos comerciais, estes autores observaram que as regiões 6.250–5.555 e 4.545–4.116 cm^{-1} estavam relacionadas à absorção no primeiro harmônico das bandas CH, CH₂ e CH₃. Em contraste, Teye *et al.* (2013) indicaram a região de 9.000–5.000 cm^{-1} , os grupos carbonila, o alongamento CH e as deformações CH, SH, NH, CH₂ e CH₃, correspondentes às ligações das estruturas polifenólicos, alcalóides e terpenos. As características de picos de absorção mais altos \times comprimento de onda (cm^{-1}) podem fornecer informações para a classificação dos taninos. Essa explicação pode abrir possibilidades de agrupamentos para taninos condensados, taninos hidrolisáveis e sem taninos; no entanto, também pode estar relacionado à espécie, a chamada “assinatura espectral” ou “impressão digital” do material (Ricci *et al.* 2015; Souza *et al.* 2017).

Análise de Componentes Principais (PCA)

Utilizando espectros brutos (sem tratamentos), foi construída a análise de componentes principais (PCA), e a análise computacional gerou 10 escores de PC, que explicam os espectros originais com alta significância. Uma análise inicial do conjunto de variáveis foi possivelmente correlacionada (Figura 3). A soma de PC 1 x PC 2 x PC 3 descreve 98,84% das 100 espécies utilizadas no estudo. À medida que os espectros das espécies são agrupados, ficou evidente pelos gráficos da PCA que há uma tendência de agrupamento das classes de taninos. Em geral, as espécies “sem taninos” apresentaram comportamento de aglomeração no eixo central da plotagem e os demais grupos (taninos condensados e hidrolisáveis) se mostraram dispersos.

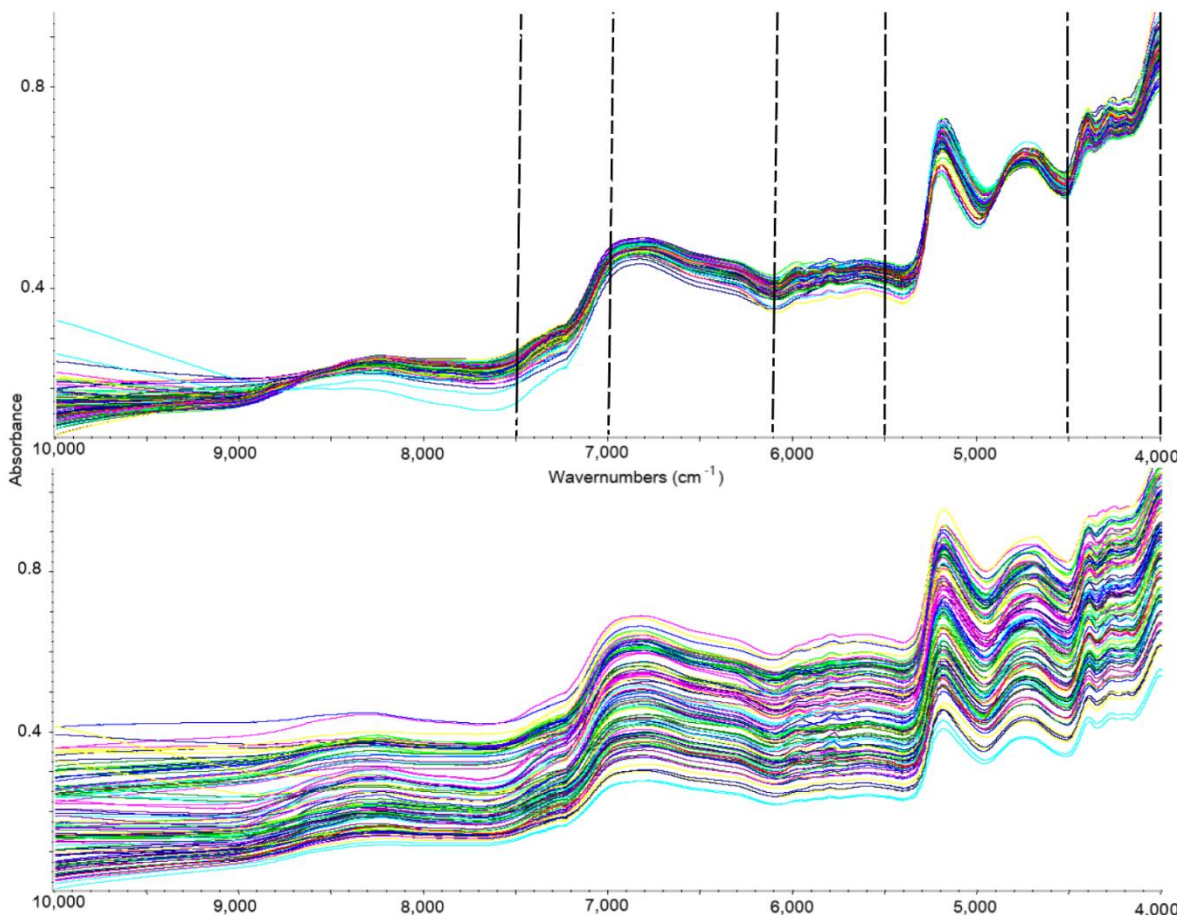


Figura 2. Universo amostral com espectros médios de 100 espécies (332 amostras) de madeira da região amazônica na faixa de 10.000 a 4.000 cm^{-1} . Na parte inferior espectros brutos e na parte superior espectros pré-processados com correção de dispersão multivariada (MSC) com filtro Savitzky-Golay.

O algoritmo PC1 descreve o máximo das informações espectrais que serão

utilizadas nas previsões/modelagem. De acordo com Luna *et al.* (2013), a discriminação acima de 80% carrega a maioria das informações de composição química na região do NIR. O tecido xilemático aqui estudado apresenta diferenças consideráveis nas propriedades químicas da quantidade de metabólitos primários como celulose, hemicelulose e lignina, bem como da quantidade/qualidade dos extrativos (metabólico secundário). A análise discriminante (AD) indicou a diferenciação das variáveis (Figura 3).

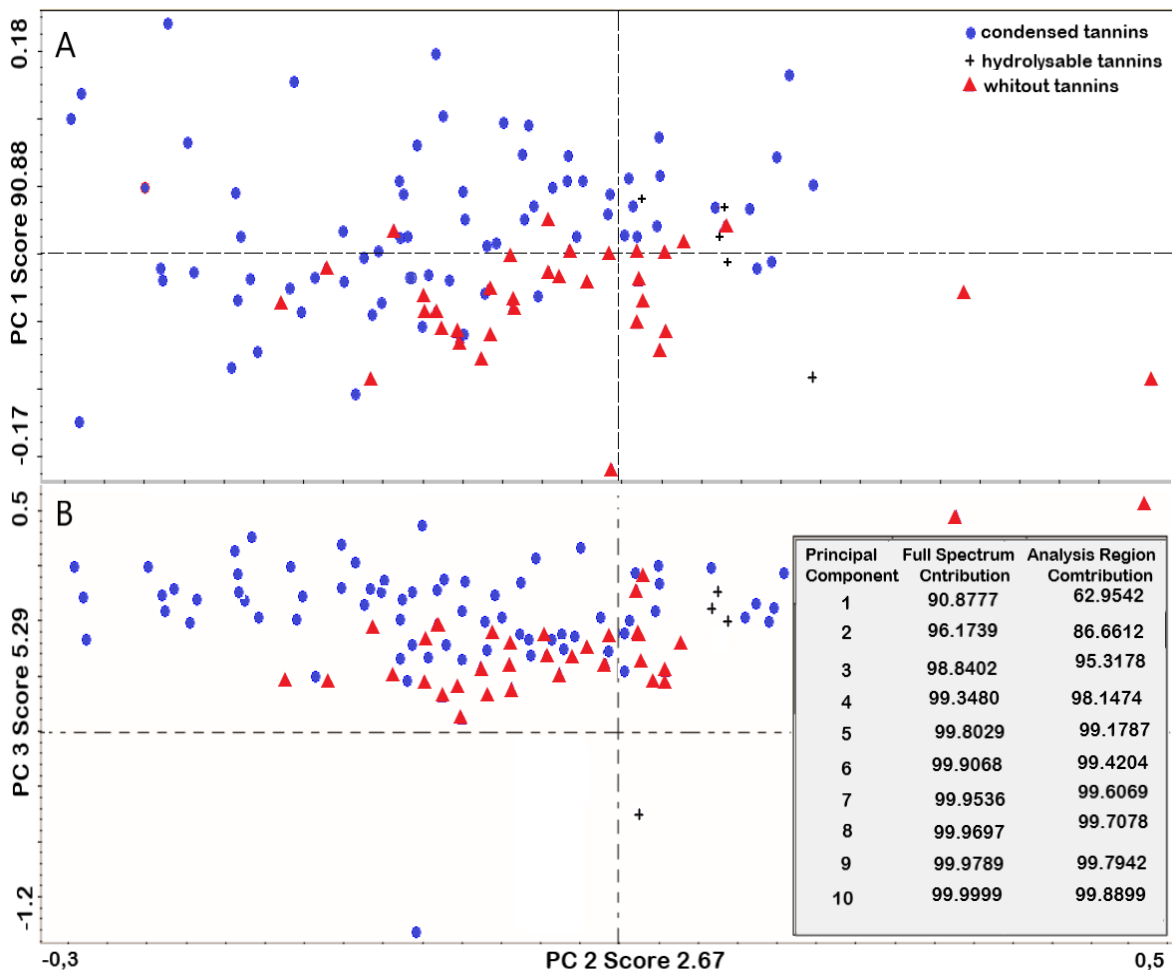


Figura 3. Resultados da análise de componentes principais: A: PC 1 × PC 2; B: PC 3 × PC 2.

Tipos de taninos em madeiras amazônicas

O método de referência (método úmido) foi utilizado para detectar os tipos de taninos presentes nas madeiras amazônicas (material complementar MC2). Das 100 espécies estudadas, 63 apresentavam taninos condensados e três continham taninos hidrolisáveis (Tabela 3).

Tabela 3. Resultados dos testes para detecção de tipos de taninos em madeiras amazônicas.

Classes	Espécies	N°
Taninos condensados	<i>Acosmium nitens</i> ; <i>Albizia inundata</i> ; <i>A. subdimidiata</i> ; <i>Aldina heterophylla</i> ; <i>Andira parviflora</i> ; <i>Aspidosperma album</i> ; <i>A. obscurinervium</i> ; <i>Brosimum rubescens</i> ; <i>Buchenavia oxycarpa</i> ; <i>Calophyllum brasiliense</i> ; <i>Campsiandra chigo-montero</i> ; <i>Caryocar</i> sp.; <i>C. villosun</i> ; <i>Catostemma sclerophyllum</i> ; <i>Cedrela odorata</i> ; <i>Clathrotropis nitida</i> ; <i>Crudia amazonica</i> ; <i>Cynometra spruceana</i> ; <i>Dinizia excelsa</i> ; <i>Diplotropis</i> sp.; <i>D. martiusii</i> ; <i>Dipteryx odorata</i> ; <i>D. polyphylla</i> ; <i>Enterolobium schomburgkii</i> ; <i>Eschweilera coriacea</i> ; <i>E. truncata</i> ; <i>Goupia glabra</i> ; <i>Guarea trichilioides</i> ; <i>Handroanthus serratifolia</i> ; <i>Heterostemon mimosoides</i> ; <i>Hymenaea courbaril</i> ; <i>H. intermedia</i> ; <i>H. parvifolia</i> ; <i>Hymenolobium excelsum</i> ; <i>Inga disticha</i> ; <i>Maclobium acaciifolium</i> ; <i>M. angustifolium</i> ; <i>Manilkara huberi</i> ; <i>Maquira guianensis</i> ; <i>Marmaroxylon racemosum</i> ; <i>Mezilaurus itauba</i> ; <i>Miquartia guianensis</i> ; <i>Mora paraensis</i> ; <i>Ocotea cymbarum</i> ; <i>Parkia discolor</i> ; <i>Peltogyne venosa</i> ; <i>Pentaclethra macroloba</i> ; <i>Piptadenia suaveolens</i> ; <i>Platonia insignis</i> ; <i>Platymiscium ulei</i> ; <i>Pouteria guianensis</i> ; <i>Protium paraense</i> ; <i>P. puncticulatum</i> ; <i>Scleronema micranthum</i> ; <i>Sextonia rubra</i> ; <i>Stryphnodendron guianense</i> ; <i>Swartzia argentea</i> ; <i>S. laevicarpa</i> ; <i>S. macrocarpa</i> ; <i>S. panacoco</i> ; <i>S. polyphylla</i> ; <i>Tachigali paniculata</i> ; <i>Vatairea guianensis</i> .	63 espécies 49 gêneros 13 famílias
Taninos hidrolisáveis	<i>Cariniana integrifolia</i> ; <i>Eschweilera odora</i> ; <i>Manilkara bidentata</i> .	3 espécies 3 gêneros 2 famílias
Sem taninos	<i>Aniba</i> sp.; <i>A. canelilla</i> ; <i>A. duckei</i> ; <i>Brosimum parinarioides</i> ; <i>Byrsonima crista</i> ; <i>Caryocar glabrum</i> ; <i>Ceiba pentandra</i> ; <i>Clarisia racemosa</i> ; <i>Didymopanax morototoni</i> ; <i>Duckeodendron cestroides</i> ; <i>Emmotum fagifolium</i> ; <i>Erisma uncinatum</i> ; <i>Euxylophora paraensis</i> ; <i>Hura creptans</i> ; <i>Iryanthera</i> sp.; <i>I. tricornis</i> ; <i>Jacaranda copaia</i> ; <i>Licaria aritu</i> ; <i>L. canella</i> ; <i>Manilkara amazonica</i> ; <i>Martiodendron elatum</i> ; <i>Micrandropsis scleroxylon</i> ; <i>Nectandra cuspidata</i> ; <i>Ochroma pyramidale</i> ; <i>Osteophloeum platyspermum</i> ; <i>Panopsis rubescens</i> ; <i>Qualea paraensis</i> ; <i>Roupala montana</i> ; <i>Sacoglottis guianensis</i> ; <i>Simarouba amara</i> ; <i>Virola</i> sp.; <i>V. surinamensis</i> ; <i>Vismia guianensis</i> ; <i>Vochysia maxima</i> .	34 espécies 29 gêneros 17 famílias *

* 5 famílias com taninos condensados e sem taninos.

Utilizando a mesma referência do estudo (método úmido), Barbosa *et al.* (2006) detectaram taninos condensados em 100% das espécies arbóreas de Fabaceae. Em outro estudo sobre taninos, Varejão *et al.* (2009) encontraram um percentual menor, 70% das espécies continham taninos condensados, neste estudo os autores ressaltam a precisão da técnica, pois concentrações < 10 ppm podem dificultar a detecção de taninos em testes reativos (colorimétricos). Além disso, Coq *et al.* (2010) e Oliveira *et al.* (2010) realizaram pesquisas com taninos de espécies tropicais incluídas no presente estudo, como *Caryocar glabrum*, *Goupia glabra*, *Hymenaea courbaril*, *Peltogyne venous*, *Platonia insignis*, *Simarouba amara* e *Virola surinamensis*.

Os taninos produzidos pelas plantas fornecem proteção biológica, defesa contra a radiação solar e regulam o fluxo de água (Dominy *et al.* 2002; Taiz *et al.* 2017). As espécies nas quais não foram detectados taninos (Tabela 3) foram *Ceiba pentandra*, *Didymopax morototoni*, *Ematum fagifolium*, *Hura creptans* e *Simarouba amara*, entre outras, sendo madeiras de baixa densidade, de cor branca e com baixa resistência natural a organismos xilófagos.

Análise Discriminante (AD)

A questão central deste estudo foi: É possível utilizar a espectroscopia FT-NIR para discriminar o tipo de taninos presentes no tecido do xilema? Após a obtenção dos resultados da PCA e a detecção dos taninos, os espectros NIR foram utilizados como entrada de dados para a classificação multivariada. O resultado da AD (25/75) gerou um modelo preditivo com 99,9% de variabilidade descrita e uma taxa de acerto de 98% quando foram utilizados espectros sem derivação.

O resultado da AD resultou na separação e classificação dos taninos condensados (TC), taninos hidrolisáveis (TH) e sem taninos (ST) adequadamente para a maioria das espécies. A Figura 4 mostra o agrupamento calculado usando a distância de Mahalanobis (DM) com o conjunto de dados de calibração. DM é um algoritmo que pode explicar o agrupamento ou remoção de indivíduos. As espécies *Enterolobium schomburgkii* (Fabaceae) e *Maquira guianensis* (Moraceae) ficaram fora do grupo TC, embora próximas a outras espécies desta classe.

A Tabela 4 apresenta os resultados de sensibilidade, erros e índice de identificação (II), quando aplicado o tratamento matemático. O melhor modelo é indicado quando há baixos erros e altos índices de identificação e sensibilidade. Na

análise geral, o melhor modelo de classificação foi aquele que utilizou apenas filtro Savitzky-Golay no conjunto de espectros, seguido do modelo com tratamento espectral de 2ª derivada e filtro de Norris, pois estão no limite aceitável para métodos não destrutivos, que seria sensibilidade, e $II > 90\%$ e Erros (E_{Cal}, E_{Val} e MCE) $< 10\%$.

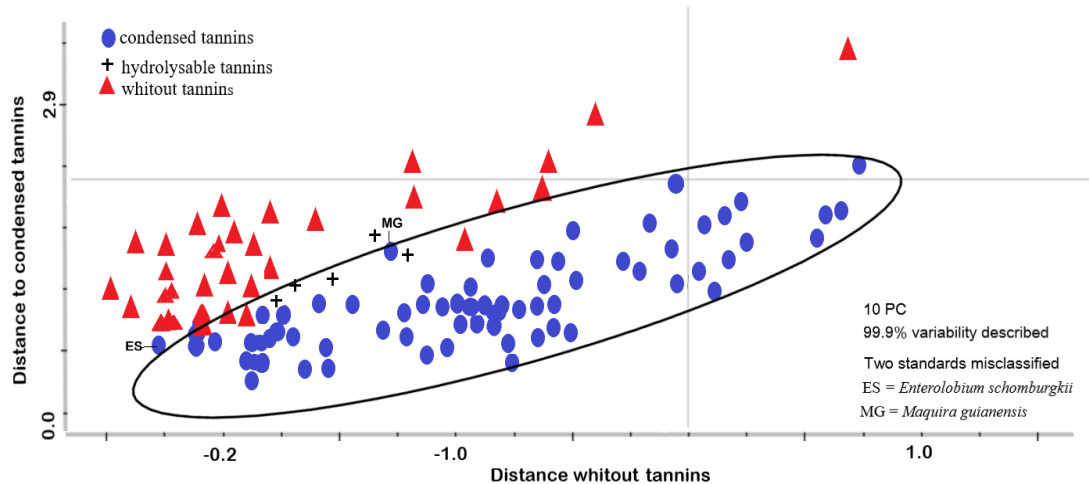


Figura 4. Resultados da análise discriminante de 100 madeiras amazônicas em relação à classe de taninos.

Tabela 4. Parâmetros de avaliação dos modelos quimiométricos*.

Tratamento espectral	Sensibilidade	Erro de calibração	Erro de validação	Erro total	Índice de Identificação
Savitzky-Golay	98,25	2,30	0,00	1,75	100,00
1ª. derivada Savitzky-Golay	88,60	11,49	11,11	11,40	88,89
1ª. derivada Norris	89,47	9,19	14,81	12,28	85,19
2ª. derivada Savitzky-Golay	84,21	16,09	14,81	15,79	85,19
2ª. derivada Norris	90,35	10,34	7,41	9,65	92,59

* %

A eficiência do FT-NIR em discriminar madeiras com e sem taninos está associada às propriedades químicas e físicas das amostras, onde a AD funciona como uma ferramenta de reconhecimento de padrões (Teye *et al.* 2013). De acordo com Ricci *et al.* (2015), a faixa espectral $6.250-4.500\text{ cm}^{-1}$ é caracterizada pela banda associada à ligação -OH (estrutura aromática) atribuída aos taninos condensados. Aliado a este parâmetro, a análise exploratória do PC, descreve as variações dos

espectros com as possíveis concentrações químicas, potencializando a separação dos grupos.

Morozova *et al.* (2013) realizaram estudos com espectroscopia NIR em conjunto com AD e DM para explicar o agrupamento correto de suas amostras. Na pesquisa os autores realizaram um levantamento de artigos científicos (1987-2010) que demonstraram a eficiência da distância de Mahalanobis no método de reconhecimento de padrões baseado em distância, e concluíram que o algoritmo AD apresenta relações confiáveis ao considerar as características qualitativas das amostras. O espectro NIR é representado pelo número de ondas \times absorvância que é resultado da quantidade de energia absorvida pelas ligações características OH, CH, CN e CO. O estudo espectral pode ser facilitado quando existe uma biblioteca de referência (picos, assinatura digital de compostos). Caso contrário, as interpretações das bandas ocorrem por meio de uma comparação entre espectros padrão (Schwanninger *et al.* 2011; Ricci *et al.* 2015).

Um grupo de 27 espécies foi selecionado aleatoriamente (TQ analyst) para compor o conjunto de validação. Todas as amostras utilizadas neste conjunto foram classificadas corretamente, garantindo um índice de identificação de 100% (Tabela 5). O sistema que utiliza DM, forneceu dois resultados, onde o primeiro (classe preditiva 1) indica a distância da amostra ao centro do grupo mais próximo. A Classe Preditiva 2 indica quão perto a amostra está do centro do próximo grupo. O grupo TC teve uma distância central na faixa de 0,522-0,791, ST de 1,135-1,720 e TH de 2,070-2,310. As espécies *E. schomburgkii* e *M. guianensis* que compõem o conjunto de calibração foram denominadas em laboratório como TC, mas na Classe Preditiva 1, foram classificadas como ST. No entanto, essas amostras foram classificadas corretamente ao comparar as distâncias do próximo grupo.

A análise dos resultados apresentados na Tabela 5 e na Figura 4 mostra uma forte tendência de que *E. Schomburgkii* e *M. guianensis* são realmente do grupo TC. De acordo com Morozova *et al.* (2013), distâncias mais curtas indicam similaridade espectral com uma classe, números mais altos indicam dissimilaridade espectral. Vale ressaltar que a espectroscopia NIR é baseada na medida do comprimento de onda \times absorvância, sendo uma variável intimamente associada à concentração química (Budinova *et al.* 2008; Prades *et al.* 2012). Os resultados da AD com a DM apresentados neste estudo demonstraram serem recursos satisfatórios para justificar as classificações dos tipos de taninos nas madeiras amazônicas.

Na Figura 5, os espectros padrão são taninos condensados (TC), sem taninos (ST) e das espécies *E. Schomburgkii* e *M. guianensis* que foram erroneamente classificados na AD (espectros não derivados). Nesta figura, é possível verificar uma melhor distinção dos padrões e buscar uma possível explicação para essa tendência de agrupar as amostras em uma classe diferente da referência. A análise realizada no laboratório (úmida) foi alterada e/ou registrada incorretamente? As amostras podem ser consideradas um outlier, e devem ser excluídas e/ou continuadas na modelagem? Os espectros apresentaram ruídos que pudessem comprometer a qualidade da discriminação? A justificativa mais plausível que encontramos seria que o possível agrupamento de espécies na classe ST pode estar relacionado às propriedades físicas, químicas e anatômicas dessas espécies. Por exemplo, baixa concentração de extrativos, densidade básica, madeira muito porosa, e por serem madeiras brancas, que, em geral, apresentam baixa concentração e/ou ausência de taninos no tecido lenhoso (Santiago *et al.* 2018). Tal justificativa a princípio pode explicar parcialmente a capacidade do modelo multivariado de discriminar madeira com e sem taninos.

Tabela 5. Resultados da classificação das espécies de madeira conforme a classe de taninos (conjunto de validação).

Espécies	Classe referência	Predição classe 1	Predição classe 2
<i>Albizia inundata</i> ; <i>A. subdimidiata</i> ; <i>Andira parviflora</i> ; <i>Campsiandra chigo-montero</i> ; <i>Cedrela odorata</i> ; <i>Clathrotropis nitida</i> ; <i>Crudia amazonica</i> ; <i>Cynometra spruceana</i> ; <i>Dipteryx odorata</i> ; <i>Heterostemon mimosoides</i> ; <i>Macrolobium angustifolium</i> ; <i>Manilkara amazonica</i> ; <i>Mora paraensis</i> ; <i>Ocotea cymbarum</i> ; <i>Platonia insignis</i> ; <i>Protium puncticulatum</i> ; <i>Sacoglottis guianensis</i> ; <i>Stryphnodendron guianense</i> ; <i>Swartzia laevicarpa</i> ; <i>Tachigali paniculata</i> ; <i>Vatairea guianensis</i>	Taninos condensados	Taninos condensados	Sem taninos
<i>Manilkara bidentata</i>	Taninos condensados	Taninos condensados	Taninos hidrolisáveis
<i>Eschweilera odora</i>	Taninos hidrolisáveis	Taninos hidrolisáveis	Taninos condensados
<i>Aniba duckei</i> ; <i>Martiodendron elatum</i> ; <i>Qualea paraensis</i> ; <i>Simarouba amara</i>	Sem taninos	Sem taninos	Taninos condensados
<i>Enterolobium schomburgkii</i> *; <i>Maquira guianensis</i> *	Taninos condensados	Sem taninos	Taninos condensados

*Espécies usadas na calibração.

Bandas com maiores alturas são influenciadas pela concentração dos

compostos químicos da matriz investigada. Na Figura 5, a espécie *E. Schomburgkii* (linha verde) está mais próxima do espectro padrão TC (linha vermelha). Onde este padrão é a média espectral de amostras ricas em polifenóis. Enquanto isso, o espectro de *M. guianensis* (linhas roxas) se sobrepõe ao padrão ST (linha azul) em quase toda extensão NIR. Em geral, a madeira classificada sem taninos é esbranquiçada, mostrando que as amostras não possuem taninos, ou sua concentração é muito baixa. Portanto, acredita que as bandas utilizadas na distinção NIR estão sendo influenciadas pelas concentrações da amostra.

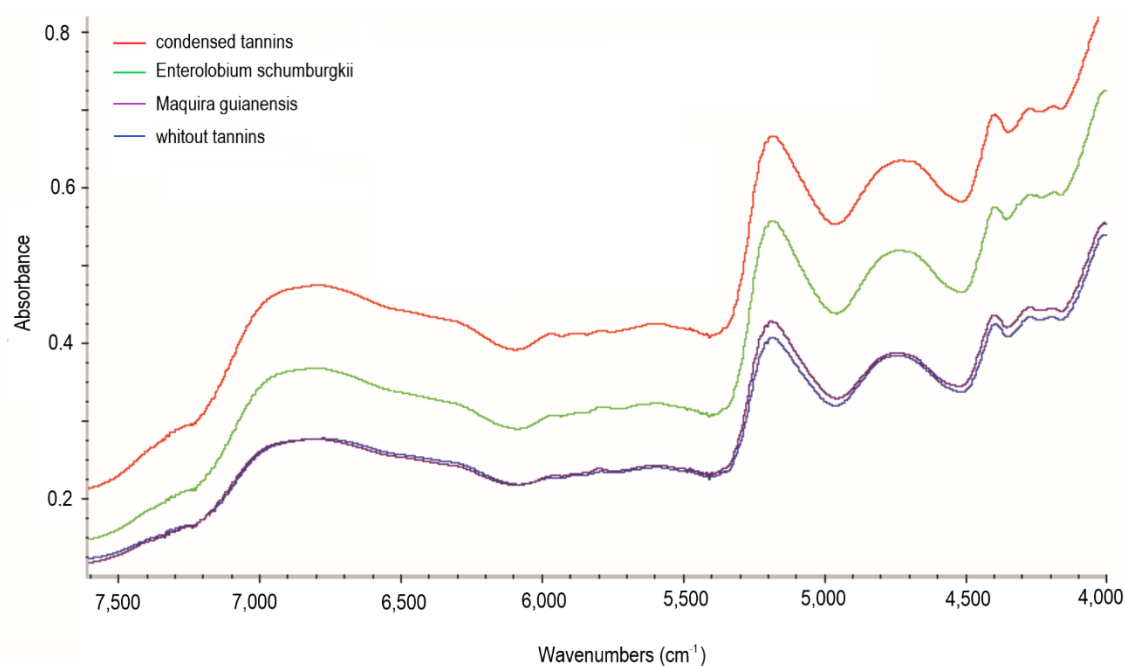


Figura 5. Perfil dos espectros NIR obtidos a partir do padrão de tanino condensado (linha vermelha) e sem padrão de tanino (linha azul), e também das espécies *Enterolobium schomburgkii* (linha verde) e *Maquira guianensis* (linha roxa), na faixa de 7.500-4.000 cm^{-1} .

Análise de cluster das classes de taninos

O objetivo desta análise é agrupar populações semelhantes. Os elementos de um mesmo grupo são homogêneos entre si, no que diz respeito às variáveis (características) que neles foram medidas. As distâncias entre pontos entre todas as amostras contidas no conjunto de dados e suas características são representadas por um gráfico bidimensional chamado dendrograma, onde é possível visualizar agrupamentos e semelhanças entre amostras e/ou variáveis (Härdle e Simar 2007;

Sádecká e Tóthová 2009).

As madeiras estudadas estão agrupadas em 27 famílias, onde 15 delas tinham indivíduos com tanino (TC e TH), 12 famílias sem tanino (ST), e cinco famílias tinham indivíduos com TC e ST. A análise discriminante como ferramenta de reconhecimento de padrões também pode fornecer tendências de agrupamento visíveis, conforme mostrado na Figura 6.

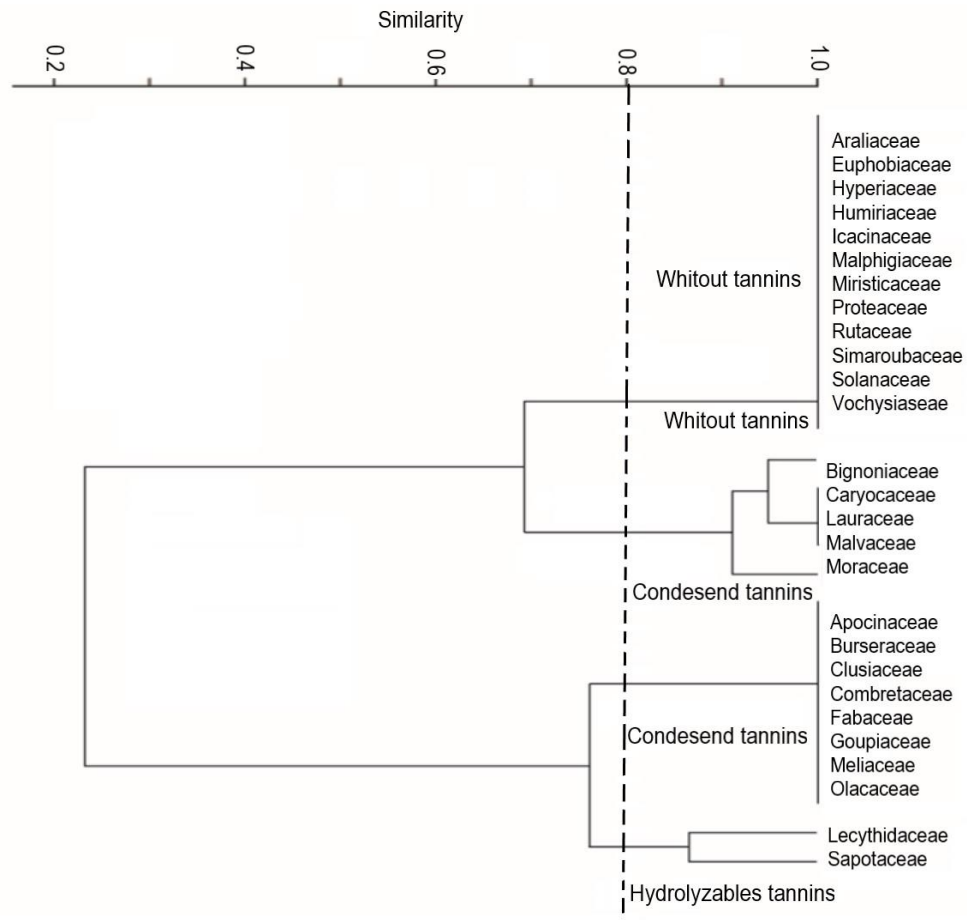


Figura 6. Dendrograma dos espectros de refletância obtidos pela análise de Cluster usando a distância euclidiana, em relação às famílias.

A similaridade entre as amostras foi o parâmetro de agrupamento. Com características muito semelhantes (semelhança ~ 1), foram formados inicialmente quatro grupos: ST (Araliaceae, Euphorbiaceae, Hyperiaceae, Humiriaceae, Icacinaceae, Malphigiaceae, Miristicaceae, Proteaceae, Rutaceae, Simaroubaceae, Solanaceae e Vochysiaceae), TC (Apocinaceae, Burseraceae, Clusiaceae, Combretaceae, Fabaceae, Goupiaceae, Meliaceae e Olacaceae), TC/ST (Bignoniaceae, Caryocaceae, Lauraceae, Malvaceae e Moraceae) e o quarto grupo

foi TH (Lecythidaceae e Sapotaceae) com similaridade de 0,88.

Os agrupamentos podem ser explicados pelas propriedades químicas e físicas de cada amostra (Sandak *et al.* 2011). No caso em estudo, diferentes tipos de taninos podem explicar a aproximação, enquanto sua ausência indica outro grupo, conforme as contribuições das três primeiras PCA (98,84%) para as variações totais dos dados.

Souza *et al.* (2017) confirmaram a eficiência da PCA e da análise de agrupamento em explicar a separação de três espécies de plantas relacionadas ao número de compostos fenólicos e flavonóides na região 8.663–3.757 cm^{-1} . Grasel e Ferrão (2016) relataram a formação de seis grupos associados a taninos condensados/hidrolisáveis x origem vegetal. Em estudos de quimiosistemas, a presença de taninos pode explicar agrupamentos botânicos associados a fatores ambientais e evolutivos.

CONCLUSÃO

Uma combinação de espectroscopia NIR com análise multivariada revelou resultados satisfatórios com probabilidade de 90% na distinção de vários tipos de taninos. O modelo desenvolvido pode ser utilizado como ferramenta em ecologia, silvicultura e quimiotaxonomia, com foco em compostos fenólicos como taninos. A metodologia proposta apresenta vantagens sobre os métodos de referência, como menor necessidade de preparo de amostras, menor tempo de análise, não utilização de reagentes e, conseqüentemente, não geração de resíduos.

Material complementar (MC)*

MC1. Coordenadas geográficas, dados dendrológicos e registro botânico das amostras.

MC2. Resultados de testes qualitativos taninos.

MC3. Espectros NIR de amostras (CSV).

Material complementar deste estudo podem ser encontrados on-line em <https://doi.org/10.5281/zenodo.5551137>

* Dados da Pesquisa

CONCLUSÃO GERAL

A indicação de uso de espécies de pequeno diâmetro de áreas de manejo florestal da Amazônia pode ser uma alternativa a superexploração de espécies tradicionais madeireiras, entretanto o conhecimento das propriedades tecnológicas de espécies substitutas é fundamental, visto que o manejo florestal sustentável somente é possível com tecnologia, onde a compreensão da qualidade da madeira a ser explorada é uma garantia do aproveitamento sustentável dos recursos da floresta. Nesta tese, foram pronunciados os resultados da caracterização física, mecânica e química de espécies de pequeno diâmetro utilizando metodologias tradicionais e não destrutivas, a fim de responder qual o melhor uso das espécies, auxiliando assim nas melhores práticas de manejo sustentável.

A caracterização química apontou o perfil químico das espécies, onde *Eschweilera odora* tem altas concentrações em extrativos e polifenóis totais, *Micrandropsis scleroxylon* apresentou a maior concentração em lignina no estudo e *Byrsonima crispera* maior teor em celulose bruta. Quanto aos extrativos, certas classes estudadas podem indicar possível agrupamento taxonômico como foi observado em nível de gênero botânico, *Byrsonima* é composta de flavonóides, taninos e triterpenos, *Eschweilera* alcalóides, antraquinonas e cumarinas, *Micrandropsis* antraquinonas, esteróides e flavonóides, *Inga* com flavona, flavanona e flavanonol e *Protium* foi triterpenos. Quanto ao perfil físico-mecânico das espécies foi verificado que as espécies estudadas são de média à alta densidade, e as espécies *Eschweilera truncata* e *Micrandropsis scleroxylon* apresentaram as maiores resistências mecânicas (MOE e MOR).

O uso da metodologia não destrutiva (espectroscopia NIR) mostra-se como recurso satisfatório para determinação de traços químicos e físico-mecânicos de madeiras e ainda pode ser utilizado para discriminar tipos de taninos, visto que seus resultados são robustos, gerados em curto espaço de tempo e não produzem resíduos, e ainda os valores preditos foram compatíveis com as obtidas pelas determinações tradicionais de espécies tropicais.

Os resultados da análise de agrupamento mostrou-se uma ferramenta eficaz para o agrupamento de madeiras considerando suas similaridades. *Eschweilera coriacea*, *E. odora*, *E. truncata*, *Micrandropsis scleroxylon*, *Protium tenuifolium* e *Swartzia recurva* podem ser utilizadas na construção pesada (vigas, mourões), uso

interno e externo, pisos, pontes, tacos, dormentes, instrumentos musicais, chapas e painéis (EGP), móveis, artigos de esportes e energia. Enquanto *Inga alba*, que apresentou menor perfil de qualidade, pode ser utilizada em manufaturas de ambientes internos, peças não estruturais para habitação (forros, lambris, venezianas), compensados e chapas, torneados, artesanato, embalagens e energia.

O conhecimento sobre as propriedades da matéria-prima madeira contribuem para seu melhor aproveitamento. A qualidade da madeira de espécies de pequeno diâmetro de área manejada da Amazônia por meio da caracterização tecnológica pode auxiliar nas tomadas de decisões nos planos de manejo florestais que podem indicar o uso de novas espécies ao setor florestal.

Referências bibliográficas

- Almeida, A.P.S.; Rodrigues, D.A.; Castelo, P.A.R. 2015. Determinação das propriedades químicas de madeiras da Amazônia Meridional. *Scientific Electronic Archives* 8:1-4.
- Almeida, T.H.; Almeida, D.H.; Araújo, V.A.; Silva, S.A.M.; Christoforo, A.; Lahr, F.A.R. 2017. Density as estimator of dimensional stability quantities of Brazilian tropical woods. *BioResources* 12(3): 6579-6590.
- Alvarenga, M.A.; Silva, J.; Gottlieb, H.E.; Gottlieb, O.R. 1981. Diterpenoids from *Micrandropsis scleroxylon*. *Phytochemistry* 20: 1159-1161.
- American Society for Testing and Materials – ASTM. 2021. *Annual book of ASTM standards (Section 4 – Construction, Volume 04.10 – Wood)*. ASTM, West Coshohocken, 1054p.
- Andrade C.R.; Trugillo, P.F; Napoli, A.; Vieira, R.S.; Lima, J.T.; Sousa, L.C. 2010. Estimation of the mechanical properties of wood from *Eucalyptus urophylla* using near infrared spectroscopy. *Cerne* 16(3): 291-298.
- Araújo, H.J.B. 2007. Relações funcionais entre as propriedades físicas e mecânicas de madeiras tropicais brasileiras. *Floresta* 37(3): 399-416.
- Araújo, R.D.; Santos, J.; Nascimento, C.C.; Nascimento, C.S.; Barros, S.V.S.; Lima, M.P. 2019. Surface roughness of edge glued panels (EGP) of amazon grown species. *Ciência e Agrotecnologia* 43: e019119.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT. 1997. *Projeto de estruturas de madeira - ABNT (NBR 7190)*. ABNT, Rio de Janeiro, 68p.
- Baba, R.K.; Vaz, M.S.M.G.; Costa, J. da. 2014. Correção de dados agrometeorológicos utilizando métodos estatísticos. *Revista Brasileira de Meteorologia* 29(4): 515 – 526.
- Balboni, B.M.; Silva, T.S.; Andrade, F.W.C.; Freitas, L.J.M.; Moutinho, V.H.P. 2018. Physical-mechanical characterization of two amazon woods coming from the second cutting cycle. *Anais da Academia Brasileira de Ciências* 90: 3565-3572.
- Barbosa, A.P.; Palmeira, R.C.F.; Nascimento, C.S.; Feitoza, D. 2006. Leguminosas florestais da Amazônia Central. I - Prospecção das classes de compostos presentes na casca de espécies arbóreas. *Fitos* 1: 47-57.
- Barros, J.O.A.; Politano, R. 2019. Effects of frequency, temperature and test duration in the viscoelasticity of brazilian hardwoods used in handmade musical instruments. *Materials Research* 22: e20190190.
- Braz, E.M.; Mattos, P.P. de. 2015. Manejo de produção em florestas naturais da Amazônia: mitos e verdades. *Nativa* 3: 292–295.

- Bieker, D.; Rust, S. 2010. Non-destructive estimation of sapwood and heartwood width in Scot's pine (*Pinus sylvestris* L.). *Silva Fennica* 44: 267–273.
- Braga, J.W.B.; Pastore, T.C.M.; Coradin, V.T.R.; Camargo, J.A.A.; Silva, A.R. 2011. The use of near infrared spectroscopy to identify solid wood specimens of *Swietenia macrophylla*. *Journal International Association of Wood Anatomists* 32: 285-296.
- British Standard – BS. 1999. *Methods of Testing small clear specimens of timber*. British Timber Industry Standards Committee/BSI, London, 32p.
- Budinova, G.; Dominak, I.; Strother, T. 2008. FT-NIR Analysis of Czech Republic beer: A qualitative and quantitative approach. *Application Thermo-Scientific* 5172: 1-4.
- Callegari-Jacques, S.M. 2003. *Bioestatística: Princípios e aplicações*. Artemed, Porto Alegre, 255p.
- Cardoso D.; Särkinen, T.E.; Alexander, S.; Amorim, A.M.A.; Bittrich, V.; Celis, M. et al. 2017. Amazon plant diversity revealed by a taxonomically verified species list. *PNAS* 114: 10695-10700.
- Castilho, M.E.U. 1984. Determinacion del poder calorífico de 20 especies florestales de la Amazonia peruana. *Revista Florestal do Peru* 12: 98-117.
- Chave J.; Coomes. D.; Jansen, S.; Lewis, S.L.; Swenson, N.G.; Zanne, A.E. 2009. Towards a worldwide wood economics spectrum. *Ecology Letters* 12: 351-366.
- Christoforo, A.L.; Aftimus, B.H.C.; Panzera, T.H.; Machado, G.O.; Lahr, F.A.R. 2017. Physico-mechanical characterization of the *Anadenanthera colubrina* wood specie. *Journal of the Brazilian Association of Agricultural Engineering* 37(2): 376-384.
- Coldebella, R.; Giesbrecht, B.M.; Saccol, A.F.O.; Gentil, M.; Pedrazzi, C. 2018. Propriedades físicas e químicas da madeira de *Maclura tinctoria* (L.) D. Don ex Steud. *Brazilian Journal of Wood Science* 9(1): 54-61.
- Comisión Panamericana de Normas Técnicas – COPANT. 1973. *COPANT 555, Método de ensayo de flexión estática*. COPANT, Buenos Aires, 10p.
- Coq, S.; Souquet, J-M.; Meudec, E.; Cheynier, V.; Hattenschwiler, S. 2010. Interspecific variation in leaf litter tannins drives decomposition in a tropical rain forest of French Guiana. *Ecology*, 91: 2080–2091.
- Cordeiro, I.; Secco, R. 2015. *Micrandropsis in list of species of the Flora of Brazil*. Jardim Botânico do Rio de Janeiro. Disponível em: <http://floradobrasil.jbrj.gov.br/jabot/floradobrasil/FB36175>, acessado em 10 de dezembro, 2021.
- Cordeiro, I.M.C.C.; Schwartz, G.; Barros, P.L.C. 2019. Timber species performance in secondary forests with over used soils in Eastern Amazonia. *Nativa* 7: 800-806.

- De Paula, M.H. 2016. *Efeito do tratamento térmico em propriedades tecnológicas das madeiras de Angelim vermelho (Dinizia excelsa Ducke) e Sapucaia (Lecythis pisonis Cambess)*. Dissertação de Mestrado. Universidade de Brasília. Brasília, 103p.
- Dominy, N.J.; Lucas, P.W.; Wright, S.J. 2003. Mechanics and chemistry of rainforest leaves. *Journal of Experimental Botany* 54: 2007-2014.
- Egekeze J.O.; Oehme F.W. 1980. Cyanides and their toxicity: A literature review. *Veterinary Quarterly* 2: 104-114.
- Durgante, F.M.; Higuchi, N.; Almeida, A.; Vicentini, A. 2013. Species spectral signature: discriminating closely related plant species in the Amazon with NIR Leaf-Spectroscopy. *Forest Ecology and Management* 291: 240-248.
- Evans, W.C. 2017. Cyanogenetic glycosides, glucosinolate compounds and miscellaneous glycosides. In: Evans, W.C (Ed.) *Trease and Evans Pharmacognosy*. Chapter 26, 16 th edition, Elsevier, London, p. 327-332.
- Falcão, L.; Araújo, M.E.M. 2011. Tannins characterization in new and historic vegetable tanned leather fibers by spot tests. *Journal of Cultural Heritage* 12:149-156.
- Fan, Z.X.; Sterck, F.; Zhang, S.B.; Fu, P.L.; Hao, G.Y. 2017. Tradeoff between stem hydraulic efficiency and mechanical strength affects leaf-stem allometry in 28 *Ficus* tree species. *Frontiers in Plant Science* 8:e1619.
- Fengel, D.; Wegener, G. 2003. *Wood chemistry, ultrastructure, reactions*. Walter de Gruyter, Berlin, 895p.
- Fernandes, C.; Gaspar, M.J.; Pires, J.; Alves, A.; Simões, R.; Rodrigues, J.C.; Silva, M.E.; Carvalho, M.; Brito, J.E.; Lousada, J.L. 2017. Physical, chemical and mechanical properties of *Pinus sylvestris* wood at five sites in Portugal. *IForest* 10: 669-679.
- Forest Products Laboratory - FPL. 2021. *Wood handbook - wood as an engineering material*. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Madison, Wisconsin, 463p.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations - FAO. 2010. *Global Forest Resources Assessment 2020 – Key findings*. Rome. Disponível em: <https://doi.org/10.4060/ca8753en>. Acessado 15 de dezembro, 2021.
- Freitas, J.A.; Vasconcellos, F.J. 2019. *Identificação de madeiras comerciais da Amazônia*. INPA, Manaus, 70p.
- Fróes, D.F.; Nascimento, C.C.; Freitas, J.A.; Silva, G.M.; Araújo, R.D.; Dantas, G.S.; São Pedro Filho, F. 2019. Managing the technological potential of *Eschweilera truncata* A. C. Sm in the Amazon. *International Journal for Innovation Education and Research* 7 (11): 585-598.
- Fujimoto, T.; Kurata, Y.; Matsumoto, K.; Tsuchikawa, S. 2008. Application of near infrared spectroscopy for estimating wood mechanical properties of small clear and full-length lumber specimens. *Journal of Near Infrared Spectroscopy* 16: 529–537.

Garcia, M.G.; Gomes, R.F.; Nascimento, C.C.; Oliveira, L.M.; Thomasi, S.S.; Ferreira, A.G.; Lima, M.P. 2021. Isolation of new compounds from *Andira parviflora* and *Inga alba* wood residues using LC-DAD-SPE/NMR. *Chemistry of Natural Compounds* 57: 300-305.

Garcia, F.M.; Manfio, D.R.; Sansigolo, C.A.; Magalhães, P.A.D. 2012. Yield of Itaúba (*Mezilaurus itauba*) and Tauari (*Couratari guianensis*) logs sawmill according to log quality classification. *Floresta e Ambiente* 19(4): 468-474.

Gomes R.F.; Nascimento C.C.; Ferreira A.G.; Tomasi S.S.; Lima M.P. 2016. Avaliação de resíduos madeireiros de *Inga alba* Willd. e *Inga paraensis* Ducke: Uma contribuição da fitoquímica para o setor madeireiros. In: *39a Reunião Anual da Sociedade Brasileira de Química*. p. 1-5.

Grasel, F.S.; Ferrão, M.F. 2016. A rapid and non-invasive method for the classification of natural tannin extracts by near infrared spectroscopy and PLS-DA. *Analytical Methods* 8: 644–649.

Halward, A.; Sanchez, C. 1975. *Métodos de ensaios nas indústrias de celulose e papel*. Brusco, São Paulo, 75p.

Hammer, O.; Harper, D.A.T.; Ryan, P.D.A. 2001. PAST: Paleontological static's software package for education and data analysis. *Palaeontologia Electronica* 4: 1-9.

Hampton, H.M.; Sesnie, S.E.; Dickson, B.G.; Rundall, J.M.; Sisk, T.D.; Snider, G.B.; Bailey, J.D. 2008. *Analysis of small-diameter wood Supply in Northern Arizona*. Forest Ecosystem Restoration analysis project, Center for Environmental Sciences and Education, Northern Arizona University.

Härdle, W.; Simar, L. 2007. *Applied multivariate statistical analysis*. Springer, Berlin. 455p.

Hausen B.M.; Schmalle H. 1981. Quinoid constituents as contact sensitizers in Australian blackwood (*Acacia melanoxylon* RBR). *British Journal of Industrial Medicine* 38(2): 105-109.

Hayasida W.; Lima M.P.; Nascimento C.C.; Ferreira A.G. 2011. Resíduos madeireiros do alburno de pau-rainha. *Acta Amazonica* 41 (2): 285-288.

Higuchi, T. 1997. *Biochemistry and molecular biology of wood*. Springer Verlag, Berlin, 362p.

Higuchi, F.G.; Siqueira, J.D.P.; Lima, A.J.N.; Figueiredo Filho, A.; Higuchi, N. 2012. influência do tamanho da parcela na precisão da função de distribuição diamétrica de Weibull na floresta primária da Amazônia Central. *Floresta* 42(3): 599 – 606.

Imai T.; Inoue S.; Ohdaira N.; Matsushita Y.; Suzuki R.; Sakurai M.; Jesus J.M.H.; Ozaki S.K.; Finger Z.; Fukushima K. 2008. Heartwood extractives from the Amazonian trees *Dipteryx odorata*, *Hymenaea courbaril*, and *Astronium lecointei* and their antioxidant activities. *Journal of Wood Science* 54: 470–475.

Instituto de Pesquisas Tecnológicas – IPT. 2020. *Wood information*. Acesso http://www.ipt.br/informacoes_madeiras3.php?madeira=7.

Instituto do Homem e Meio Ambiente da Amazônia - IMAZON. 2015. *Floresta para sempre*. Acesso <https://imazon.org.br/floresta-para-sempre-um-manual-para-a-producao-de-madeira-na-amazonia>.

Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia - INPA/CPPF. 1991. *Catálogo de madeiras da Amazônia*. INPA, Manaus, 78p.

Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia Madeiras da Amazônia. 2009. *Proposta de pesquisa INPA*, INPA, Manaus, 90p.

Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia Madeiras da Amazônia. 2017. *Relatório Parcial de Pesquisa*, INPA, Manaus, 60p.

Jacobsen, A.L.; Agenbag, L.; Esler, K.J.; Pratt, R.B.; Ewers, F.W.; Davis, S.D. 2007. Xylem density, biomechanics and anatomical traits correlate with water stress in 17 evergreen shrub species of the Mediterranean-type climate region of South Africa. *Journal of Ecology* 95: 171–183.

Jesus, J.M.H.; Logsdon, N.B.; Finger, Z. 2015. Classes de resistência de algumas madeiras de Mato Grosso. *Engineering and Science* 3(1): 35-42.

Kilic, A.; Niemz, P. 2012. Extractives in some tropical woods. *European Journal of Wood and Wood Products* 70: 79–831.

Kniess, D.D.C.; Vieira, H.C.; Boulscheid, C.B.; Grubert, W.; Cordova, F.; Zulianello, V. et al. 2015. Propriedades físicas de painéis aglomerados produzidos com fibras e maravalha de *Pinus* spp. In: CBTM (ed) *Anais do II Congresso Brasileiro de Ciência e Tecnologia da Madeira*. CBTM, Belo Horizonte, p. 20–22.

Krenitsky, A.; Ramsauer, K.; Hossler, E.; Mowad, C. 2019. Allergic contact dermatitis following occupational exposure to various exotic and domestic woods. *Contact Dermatitis* 81: 477-479.

Kollmann, F.FP.; Cotê Junior, W.A. 1968. *Principles of wood science and technology* (Vol. 2). Springer, Berlin, 674p.

Lang, C.; Almeida, D.R.A.; Costa, F.R.C. 2017. Discrimination of taxonomic identity at species, genus and family levels using Fourier Transformed near-infrared spectroscopy. *Forest Ecology and Management* 406: 219-227.

LeVan-Green S. L.; Livingston, J. 2001. Exploring the uses for small-diameter trees. *Forest Products Journal* 51(9): 9-21.

Lima, N.N.; Mendes, L.M.; Sá, V.A.; Bufalino, L. 2013. Mechanical and physical properties of LVL panels made from three amazonic species. *Cerne* 19: 407-413.

Lira, J.N.; Santos, J.; Nascimento, C.C. 2017. Agrupamento da qualidade de duas

espécies arbóreas amazônicas por método de ondas de tensão. *Nativa* 5: 203-207.

Liu, C.; Zhang, S.Y.; Cloutier, A.; Rycabel, T. 2007. Modeling lumber bending stiffness and strength in natural black spruce stands using stand and tree characteristics. *Forest Ecology and Management* 242(2-3): 648-655.

Lobão, M.S.; Castro, V.R.; Rangel, A.; Sarto, C.; Tomazello Filho, M.; Silva Júnior, F.G. et al. 2011. Agrupamento de espécies florestais por análises univariadas e multivariadas das características anatômica, física e química das suas madeiras. *Scientia Forestalis* 39(92): 469-477.

Lovaglio, T.; D'Auria, M.; Rita, A.; Todaro, L. 2017. Compositions of compounds extracted from thermo-treated wood using solvents of different polarities. *iForest* 10: 24-28.

Loncar, M.; Jakovljevic, M.; Šubaric, D.; Pavlic, M.; Služek, V.B. Cindric, I.; Molnar, M. 2020. Coumarins in food and methods of their determination. *Foods* 9: 1-34.

Luna, A.S.; Da Silva, A.P.; Pinho, J.S.A.; Ferré, J.; Boqué, R. 2013. Rapid characterization of transgenic and non-transgenic soybean oils by chemometric. *Spectrochimica Acta part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy* 100: 115-119.

Mancini, M.; Leoni, E.; Nocetti, M.; Urbinati, C.; Duca, D.; Brunetti, M.; Toscano, G. 2019. Near infrared spectroscopy for assessing mechanical properties of *Castanea sativa* wood samples. *Journal of Agricultural Engineering* L953: 191-197.

Mascarenhas, A.R.P.; Scoti, M.S.V.; Melo, R.R.; Corrêa, F.L.O.; Souza, E.F.M.; Pimenta, A.S. 2021. Physico-mechanical properties of the wood of freijó, *Cordia goeldiana* (Boraginaceae), produced in a multi-stratified agroforestry system in the southwestern Amazon. *Acta Amazonica* 51: 171-180.

Matos, F.J.A. 2009. *Introdução a fitoquímica experimental*. UFC, Fortaleza. 147p.

Matta, L.B.V.; Scudeller, V.V. 2012. Lecythidaceae Poit. in the Tupé sustainable development reserve, Manaus, Brazil. *Brazilian Journal of Botany* 35: 195-217.

Melo, R.R.; Araldi, D.B.; Stangerlin, D.M.; Müller, M.T.; Gatto, D.A. 2013. Uso das características tecnológicas da madeira para o agrupamento de espécies florestais. *Nativa* 1(1): 1-7.

Menezes, C.M.; Costa, A.B.; Renner, R.R.; Bastos, L.F.; Ferrão, M.F.; Dresslere, V.L. 2014. Direct determination of tannins in *Acacia mearnsii* bark using near-infrared spectroscopy. *Analytical Methods* 6: 8299-8305.

Miranda, I.; Sousa, V.; Ferreira, J.; Pereira, H. 2017. Chemical characterization and extractives composition of heartwood and sapwood from *Quercus faginea*. *PLoS ONE* 12: e0179268.

Monteiro, J.M.; Albuquerque, U.P.P.; Araújo, E.L.; Amorim, E.L.C. 2005. Taninos: uma abordagem da química à ecologia. *Química Nova* 28: 892-896.

Morozova, M.; Elizarova, T.; Pleteneva, T. 2013. Discriminant analysis and Mahalanobis distance in the assessment of drug's batch-to-batch dispersion and quality threshold establishment. *European Scientific Journal* 9: 8-25.

Moulin, J.C.; Rodrigues, B.P.; Oliveira, J.T.S.; Rosa, R.A.; Oliveira, J.G.L. 2016. Wood characterization of black laurel wood. *Pesquisa Florestal Brasileira* 36: 415-421.

Moutinho, V.H.P.; Couto, A.M.; Lima, J.T.; De Aguiar, O.J.R.; Nogueira, M.O.G. 2011. Energetic characterization of matá-matá wood from the Brazilian rainforest (*Eschweilera* Mart Ex Dc). *Scientia Forestalis* 39: 457-461.

Nascimento, C.C.; Garcia, J.N.; Diáz, M.P. 1997. Agrupamento de espécies madeireiras da Amazônia em função da densidade básica e propriedades mecânicas. *Madera y Bosques* 3: 33-52.

Nascimento, C.C.; Brasil, M.M.; Nascimento, C.S.; Barros, S.V.S. 2017. Estimation of the basic density of wood *Eschweilera odora* (Poepp.) Miers by near infrared spectroscopy. *Brazilian Journal of Wood Science* 8: 42-53.

Nascimento, C.C.; Nascimento, C.S.; Araújo, R.D.; Lima, M.P. Freitas, J.A. 2022. Influence of different sites on the physical and mechanical Properties of tree species in the Brazilian Amazon. *Forest Science* 68: 197-184. (no prelo)

Nascimento, C.C.; Nascimento, C.S.; Brasil, M.M. 2016. *NIR models for predicting physico-mechanical properties of Amazonian wood - LEAM/INPA (version 1.0-16)*. Acesso <http://portal.inpa.gov.br/cotei/learn>.

Nascimento, C.S.; Nascimento, C.C.; Araújo, R.D.; Soares, J.C.R.; Higuchi, N. 2021. Characterization of technological properties of matá-matá wood (*Eschweilera coriacea* [DC.] S.A. Mori, *E. odora* Poepp. [Miers] and *E. truncata* A.C. Sm.) by Near Infrared Spectroscopy. *IForest* 14: 400-407.

Nascimento, C.S.; Nascimento, C.C.; Higuchi, N.; Lima, M.P.; Cruz, I. A. 2019. Exploring chemical compounds in extracts of *Eschweilera coriacea* and *E. truncata*. *Pesquisa Florestal Brasileira* 39: 434-434.

Nascimento, C.S.; Varejão, M.J.C. 2012. *NIR models for predicting chemical and physical properties of Amazonian woods - LQM/INPA (version 1.0-12)*. Acesso <http://portal.inpa.gov.br/cotei/lqm>.

Nascimento, C.S.; Varejão, M.J.C.; Vianez, B.F. 2012. Espectroscopia FT-NIR na predição de extrativos e polifenóis totais em cascas de espécies florestais da Amazônia. In: Vianez et al. (ed) *Potencial tecnológico de madeiras florestais da Amazônia Central*. INPA, Manaus, p. 213-224.

Nuopponen, M.H.; Birch, G.M.; Sykes, R.J.; Lee, S.J.; Stewart, D. 2006. Estimation of wood density and chemical composition by means of diffuse reflectance mid-infrared Fourier transform spectroscopy. *Journal Agriculture Food Chemical* 4: 34-40.

Oliveira, L.S.; Santana, A.L.B.D.; Maranhão, C.A.; Miranda, R.C.M.; Lima, V.L.A.;

Silva, S.I.; Bieber, L. 2010. Natural resistance of woods to *Phanerochaete* degradation. *International Biodeterioration & Biodegradation* 64: 711-715.

Oliveira, A.N.; Amaral, I.L. 2004. Florística e fitossociologia de uma floresta de vertente na Amazônia Central, Amazonas, Brasil. *Acta Amazonica* 34(1): 21-34.

Oliveira, A.N.; Amaral, I.L.; Ramos, M.B.P.; Nobre, A.D.; Couto, L.B.; Sahdo, R.M. 2008. Composição e diversidade florístico-estrutural de um hectare de floresta densa de terra firme na Amazônia Central, Amazonas, Brasil. *Acta Amazonica* 38(4): 627-642.

Ono, K.; Hiraide, M.; Amari, M. 2003. Determination of lignin, holocellulose, and organic solvent extractives in fresh leaf, litter fall, and organic material on forest floor using NIR spectroscopy. *Journal of Forest Research* 8: 191-198.

Organización Internacional de las Maderas Tropicales – OIMT. 2015. *Reseña bienal y evaluación de la situación mundial de las maderas*. OIMT, Yokohama, 145p.

Pasquini, C. 2018. Near infrared spectroscopy: A mature analytical technique with new perspectives – A review. *Analytica Chimica Acta* 1026: 8-36.

Paritala, V.; Chiruvella, K.; Thammineri, C.; Ghanta, R.G.; Mohammed, A. 2015. Phytochemicals and antimicrobial potentials of mahogany family. *Revista Brasileira de Farmacognosia* 25: 61-83.

Pesquisas ecológicas de longa duração - PELD. 2015. *Estação experimental de silvicultura florestal e reserva florestal de Cuieiras*. Acesso <http://peld.inpa.gov.br/sitios/silvicultura>.

Piva L.R.O.; Jardine K.J.; Gimenez B.O.; Oliveira Perdiz R.; Menezes V.S.; Durgante F.M.; Cobello L.O.; Higuchi N.; Chambers J.Q. 2019. Volatile monoterpene fingerprints of resinous *Protium* tree species in the Amazon rainforest. *Phytochemistry* 160: 61-70.

Pizzi, A. 2019. Tannins: Prospectives and actual industrial applications. *Biomolecules*, 9(344): 1-29.

Pohlman, M.C. 2007. Análise de conglomerados. In: L. J. Corrar, E. Paulo & J. M. Dias Filho (eds.) *Análise multivariada para os cursos de Administração, Ciências Contábeis e Economia*. Atlas, São Paulo, p. 145-178.

Prades, C.; Gómez-Sánchez, J.; García-Olmo, J.; González-Adrados, J.R. 2012. Discriminant analysis of geographical origin of cork planks and stoppers by NIR spectroscopy. *Journal of Wood Chemistry and Technology* 32: 66-85.

Precious Woods Amazon – PWA. 2013. *VI - Reformulação do plano de manejo florestal da Mil Madeiras Preciosas Ltda*, PWA, Itacoatiara, 177p.

Putz, F.E.; Zuidema, P.A.; Synnott, T.; Peña-Claros, M.; Pinard, M.A.; Sheil, D.; Vanclay, J.K.; Sist, P.; Gourlet-Fleury, S.; Griscom, B.; Palmer, J.; Zagt, R. 2012. Sustaining conservation values in selectively logged tropical forests: The attained and

the attainable. *Conservation Letters* 5(4): 296–303.

Ramadan, A.; Nasser, A. 2008. Specific gravity, fiber length and chemical components of *Conocarpus erectus* as affected by tree spacing. *Journal of Agriculture and Environment* 7: 52-59.

Ranzini, G. 1980. Identificação e caracterização de alguns solos da Estação Experimental de Silvicultura Tropical do INPA. *Acta Amazonica* 10: 7-41.

Reis, P.C.M.R.; Reis, L.P.; Souza, A.L.; Carvalho, A.M.M.L.; Mazzei, L.; Reis, A.R.S. et al. 2019. Agrupamento de espécies madeireiras da Amazônia com base em propriedades físicas e mecânicas. *Ciência Florestal* 29(1): 336-346.

Ribeiro, E.S. 2017. *Propriedades tecnológicas de vinte espécies de madeiras tropicais comercializadas pelo estado de Mato Grosso*. Tese de Doutorado. Universidade de Brasília, Brasília, 210p.

Ricci, A.; Parpinello, G.P.; Olejar, K.J.; Kilmartin, P.A.; Versaria, A. 2015. ATR-MID spectroscopy and chemometrics for the identification and classification of tannins. *Applied Spectroscopy* 69: 1243-1250.

Rodriguez-Jimenez, S.; Duarte-Aranda, S.; Canche-Escamilla, G. 2019. Chemical composition and thermal properties of tropical wood from the Yucatán dry forests. *BioResources* 14: 2651-2666.

Sádecká, J.; Tóthová, J.; Májek, P. 2009. Classification of brandies and wine distillates using front face fluorescence spectroscopy. *Food Chemistry* 117: 491-498.

Sandak, A.; Sandak, J.; Negri, M. 2011. Relationship between near-infrared spectra and the geographical provenance of timber. *Wood Science and Technology* 5: 35-48.

Santana, A.C.; Santos, M.A.S.; Santana, A.L.; Yared, J.A.G. 2012. O valor econômico da extração manejada de madeira no baixo Amazonas, estado do Pará. *Árvore* 36: 527-536.

Santiago, S.B.; Gonçalves, F.G.; Lelis, R.C.C.; Segundinho, G.A.; Paes, J.B.; Arantes, M.D.C. 2018. Colagem de madeira de eucalipto com adesivos naturais. *Matéria* 23: 1-12.

Santini, N.S.; Schmitz, N.; Bennion, V.; Lovelock, C.E. 2013. The anatomical basis of the link between density and mechanical strength in mangrove branches. *Functional Plant Biology* 40: 400–408.

Santos, A.C.M. 2020. *Influência do teor de extrativos na arquitetura hidráulica em espécies florestais da Amazônia Central*. Dissertação de mestrado. PPG em Ciências de Floresta Tropical/INPA, Manaus, 93p.

Santos, H.C.; Silva, S.J.; Nascimento, C.C.; Freitas, J.A.; Souza, J.V.B.; Cortez, A.C.A.; Ferreira, A.G.; Thomasi, S.S.; Marques, M.O.M.; Facanali, R.; Lima, M.P. 2021. Chemical investigation, antifungal activity and anatomical aspects of *Protium*

puncticulatum J.F Macbr. and *Protium tenuifolium* (Engl.) Engl. *International Journal for Innovation Education and Research* 9: 798-811.

Santos, R.P.; Almeida, F.; Pereira, T.; Brito, C. 2018. *Erythema multiforme* major induced by exotic wood. *Contact Dermatitis* 79: 252-253.

Schimleck, L.R.; Matos, J.L.M.; Trianoski, R.; Prata, J.G. 2018. Comparison of methods for estimating mechanical properties of wood by NIR spectroscopy. *Journal of Spectroscopy* 18: 1-10.

Schwanninger, M.; Rodrigues, J.C.; Fackler, K. 2011. A review of band assignments in near infrared spectra of wood and wood components. *Journal of Near Infrared Spectroscopy* 19: 287–308.

Senalik, C.A.; Farber, B. 2021. Mechanical properties of wood. Chapter 5. In: Forest Products Laboratory (ed.). *Wood handbook - wood as an engineering material*. U. S. Department of Agriculture, Forest Service/FPL, Madison, p. 1-46.

Serafimova, E.; Mladenov, M., Mihailova, I.; Pelovski, Y. 2011. Study on the characteristics of waste wood ash. *Journal of the University of Chemical Technology and Metallurgy* 46(1): 31-34.

Silva, A.C.; Silva, M.B.C. 1991. *Influência da anatomia e química nas propriedades da madeira*. CEPEF/UTAM, Manaus, 55p.

Silva, A.P.; Nascimento, C.C.; Nascimento, C.S.; Carmo, M.A.; Araújo, R.D.; Freitas, J.A. 2020. Technological characterization of wood residues from the Amazon for the production of briquetes. *International Journal of Advanced Engineering Research and Science* 7(9): 408-417.

Silva, A.R.; Pastore, T.C.M.; Braga, J.W.B.; Davrieux, F.; Okino, E.V.A. Coradin, V.T.R. 2013. Assessment of total phenols and extractives of mahogany wood by NIR spectroscopy. *Holzforschung* 67: 1-8.

Silva, D.A.; Almeida, V.C.; Viana, L.C.; Klock, U.; Muñoz, G.I.B. 2014. Evaluation of the energy - related properties of tropical wood waste using NIR spectroscopy. *Floresta e Ambiente* 21: 561-568.

Silveira, L.H.C.; Rezende, A.V.; Vale, A.T. 2013. Moisture content and basic wood density of nine commercial Amazonian tree species. *Acta Amazonica* 43: 197-184.

Simões, C.M.O.; Schenkel, E.P.; G.; Mello, J.C.P.; Mentz, L.A.; Petrovick, P.R. 2017. *Farmacognosia: do produto natural ao medicamento*. Artmed, Porto Alegre. 1102p.

Siviero, M.A.; Rusche, A.R.; Yared, J.A.G.; Vieira, S.B.; Sales, A.; Pereira, J.F.; Aguiar, O.J.R.; Brienza Junior, S.; Pereira, P.C.G.; Berberian, G.A.; Contini, K.P.S. 2020. Manejo de florestas naturais degradadas na Amazônia: Estudo de caso sobre critérios de colheita. *Ciência Florestal* 30(1): 43-59.

Sjöström, E. 2013. *Wood chemistry. Fundamentals and applications* (2nd edn).

Academic Press, Espoo, 293p.

Soares, A.K.; Lourenço, T.V.; Delucis, R.A.; Gatto, D.A. 2018. Chemical composition and dimensional stability of three eucalypts wood. *Matéria* 23(4): e12226.

Souza, F.C.; Dexter, K.G. Phillips, O.L.; Brienen, R.J.W.; Chave, J.; Galbraith, D.R. *et al.* 2016. Evolutionary heritage influences Amazon tree ecology. *Proceedings of the Royal Society B* 283: 20161587.

Sousa, L.R.F.; Santos, M.H.F.; Severino, V.G.P.; Severino, R.P.; Vieira, P.C. 2018. New degraded quinone diterpenoid from the stems of *Byrsonima coccolobifolia* Kunth. (Malpighiaceae). *Química Nova* 41: 184-188.

Souza, M.; Kuhnen, S.; Kazama, D.C.S.; Kurtz, C.; Trapp, T.; Müller Júnior, V.; Comin, J.J. 2017. Predição dos teores de compostos fenólicos e flavonóides na parte aérea das espécies *Secale cereale* L., *Avena strigosa* L. e *Raphanus sativus* L. por meio de espectroscopia NIR. *Química Nova* 40: 1074-1081.

Steege, H.T.; Vaessen, R.W.; Cárdenas-López, D.; Sabatier, D.; Antonelli, A.; Oliveira, S.M.; Pitman, N.C.A.; Jørgensen, P.M.; Salomão, R.P. 2016. The discovery of the Amazonian tree flora with an updated checklist of all known tree taxa. *Scientific Reports* 6: 29549.

Stojanović, G.S.; Jovanović S.Č.; Zlatković, B.K. 2015. Distribution and taxonomic significance of secondary metabolites occurring in the methanol extracts of the Stonecrops (*Sedum* L., Crassulaceae) from the Central Balkan Peninsula. *Natural Product Communications* 10: 941-944.

Taiz, L.; Zeiger, E.; Moller, I.M.; Murphy, A. 2017. *Plant physiology and development*. 6th edn, Sinauer Associates, Sunderland, 888p.

Technical Association of the Pulp and Paper Industry – TAPPI. 2016. *pH and electrical conductivity of hot water extracts of pulp, paper and paperboard – T 252 om*. TAPPI, Atlanta, 16p.

Telmo, C.; Lousada, J. 2011. The explained variation by lignin and extractive contents on higher heating value of wood. *Biomass and Bioenergy* 35: 1663-1667.

Teye, E.; Huang, X.; DAI, H.; Chen, Q. 2013. Rapid differentiation of *Ghana cocoa* beans by FT-NIR spectroscopy coupled with multivariate. *Spectrochimica Acta part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy* 114: 183-189.

Tigabu, M.; Farhadi, M.; Stener, L-G.; Odén, P.C. 2018. Visible+Near Infrared Spectroscopy as taxonomic tool for identifying birch species. *Silva Fennica* 52: 1-13.

Todaro, L.; Rita, A.; Cetera, P.; D'Auria, M. 2015. Thermal treatment modifies the calorific value and ash content in some wood species. *Fuel* 140: 1–3.

Tsuchikawa, S.; Schwanninger, M. 2013. A review of recent near-infrared research for wood and paper (Part 2). *Applied Spectroscopy Reviews* 48: 560–587.

Vale, A.T.; Dias, I.S.; Santana, M.A.E. 2010. Relationships among chemical properties, physical and energy wood properties of five species. *Ciência Florestal* 20: 137-145.

Varejão, M.J.C.; Nascimento, C.S.; Cruz, I.A. 2012a. Avançando fronteiras: potencial químico, ecológico-econômico de espécies florestais de São Gabriel da Cachoeira, AM. In: Souza, L.A.G.; Guillermo-Castellón, E. (Orgs). *Desvendado as fronteiras do conhecimento na região amazônica rio Negro*. INPA - Fronteiras, Manaus, p. 51-67.

Varejão, M.J.C.; Nascimento, C.S.; Nakajima, G.S.; Cruz, I.A. 2009. Madeiras amazônicas e os efeitos nocivos ao homem. *Amazônia: Ciência & Desenvolvimento* 5(9): 173-186.

Varejão, M.J.C.; Nascimento, C.S.; Souza, L.A.G.; Arruda, K.A. 2012b. Leguminosas florestais da Amazônia central. II - Prospecção das classes químicas nas cascas de espécies arbóreas. In: Vianez et al. (org.) *Potencial tecnológico de madeiras florestais da Amazônia Central*. INPA, Manaus, p. 57-65.

Vetter, R.E.; Barbosa, A.P. 1995. Mangrove bark: A renewable resin source for wood adhesives. *Acta Amazonica* 25: 69-72.

Vleminckx, J.; Salazar, D.; Fortunel, C.; Mesones, I.; Dávila, N.; Lokvam, J.; Beckley, K.; Baraloto, C.; Fine, P.V.A. 2018. Divergent secondary metabolites and habitat filtering both contribute to tree species in the Peruvian Amazon. *Frontiers in Plant Science* 9: 1-10.

Vyas, P.; Yadav, D.K.; Khandelwal, P. 2019. *Tectona grandis* (teak) - A review on its phytochemical and therapeutic potential. *Natural Product Research*, 33: 2338–2354.

Wolfslehner, B.; Huber, P.; Lexer, M.J. 2013. Smart use of small-diameter hardwood – A forestry-wood chain sustainability impact assessment in Austria. *Scandinavian Journal of Forest Research* 28(2): 184-192.

Xiao, Y.; Song, Y.; Wu, F-C.; Zhang, S-B.; Zhang, J.L. 2021. Divergence of stem biomechanics and hydraulics between lianas and trees. *AoB PLANTS* 13(3): 1-9.

Yang S.W.; Zhou B.N.; Wisse J.H.; Evans R.; Van Der Werff H.; Miller J.S.; Kingston D.G. 1998. Three new ellagic acid derivatives of *Eschweilera coriacea* from the Suriname rainforest. *Journal of Natural Products* 61(7): 901-6.

Yu, L.; Liang, Y.; Zhang, Y.; Cao, J. 2020. Mechanical properties of wood materials using near-infrared spectroscopy based on correlation local embedding and partial least-square. *Journal of Forestry Research* 31: 1053-1060.

Zieminska, K.; Butler, D.W.; Gleason, S.M.; Wright, I.J.; Westoby, M. 2013. Fibre wall and lumen fractions drive wood density variation across 24 Australian angiosperms. *AoB PLANTS* 5: plt046.