

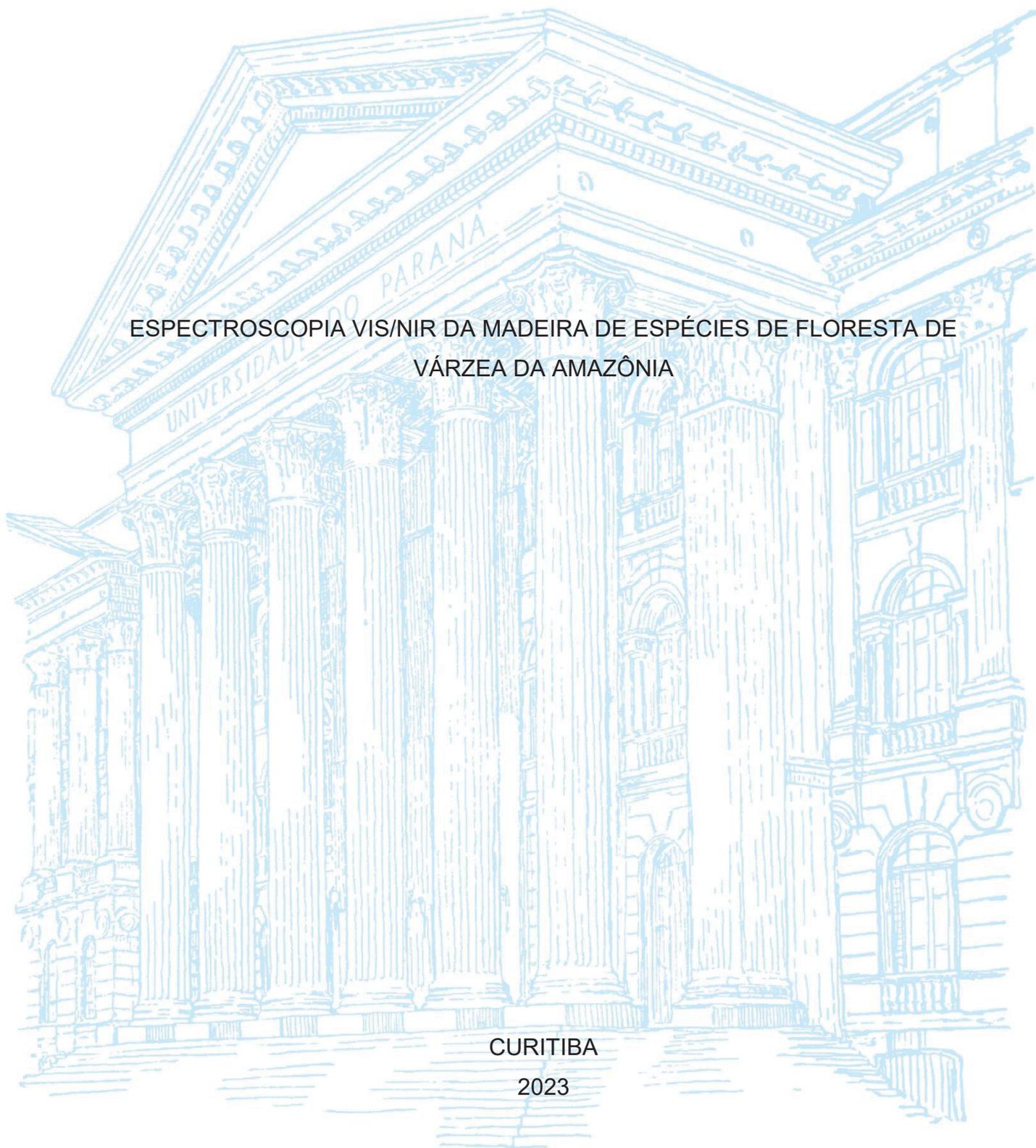
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

WASHINGTON DUARTE SILVA DA SILVA

ESPECTROSCOPIA VIS/NIR DA MADEIRA DE ESPÉCIES DE FLORESTA DE
VÁRZEA DA AMAZÔNIA

CURITIBA

2023



WASHINGTON DUARTE SILVA DA SILVA

ESPECTROSCOPIA VIS/NIR DA MADEIRA DE ESPÉCIES DE FLORESTA DE
VÁRZEA DA AMAZÔNIA

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Florestal. Área de Concentração: Tecnologia e Utilização de Produtos Florestais

Orientadora: Prof.^a Dr.^a Silvana Nisgoski

Coorientadores: Prof. Dr. Leonardo Pequeno Reis e Prof.^a Dr.^a Graciela Inés Bolzon de Muñiz

CURITIBA

2023

Ficha catalográfica elaborada pela
Biblioteca de Ciências Florestais e da Madeira - UFPR

Silva, Washington Duarte Silva da
Espectroscopia VIS/NIR da madeira de espécies de floresta de
várzea da Amazônia / Washington Duarte Silva da Silva. - Curitiba,
2023.

1 recurso on-line : PDF

Orientadora: Prof.^a Dr.^a Silvana Nisgoski
Coorientadores: Prof. Dr. Leonardo Pequeno Reis
Prof.^a Dr.^a Graciela Inés Bolzón de Muñiz

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Paraná, Setor de
Ciências Agrárias. Programa de Pós-Graduação em Engenharia
Florestal. Defesa: Curitiba, 15/12/2023.

1. Madeira - Amazônia. 2. Madeira - Identificação. 3. Madeira -
Composição. 4. Colorimetria. 5. Espectroscopia de infravermelho.
6. Florestas de várzea - Amazônia. I. Nisgoski, Silvana. II. Reis,
Leonardo Pequeno. III. Bolzón de Muñiz, Graciela Inés. IV. Universidade
Federal do Paraná. Setor de Ciências Agrárias. V. Título.

CDD - 634.909811
CDU - 634.0.811(811)
634.0.812(811)

Bibliotecária: Marilene do Rocio Veiga – CRB9/424



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SETOR DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO ENGENHARIA
FLORESTAL - 40001016015P0

TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação ENGENHARIA FLORESTAL da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da Dissertação de Mestrado de **WASHINGTON DUARTE SILVA DA SILVA** intitulada: **ESPECTROSCOPIA VIS/NIR DA MADEIRA DE ESPÉCIES DE FLORESTA DE VÁRZEA DA AMAZÔNIA**, sob orientação da Profa. Dra. SILVANA NISGOSKI, que após terem inquirido o aluno e realizada a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua **APROVAÇÃO** no rito de defesa.

A outorga do título de mestre está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

CURITIBA, 15 de Dezembro de 2023.

Assinatura Eletrônica

16/12/2023 10:59:42.0

SILVANA NISGOSKI

Presidente da Banca Examinadora

Assinatura Eletrônica

18/12/2023 09:33:04.0

HELENA CRISTINA VIEIRA

Avaliador Externo (UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO)

Assinatura Eletrônica

18/12/2023 09:05:48.0

SIMONE RIBEIRO MORRONE

Avaliador Externo (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

À minha mãe Raquel Silva e meu pai Welton Silva, por todo amor, carinho, esforço e incentivo na minha formação pessoal e profissional.

Dedico

*Aos meus avós Antônio Duarte (in memoriam), Maria Luzia e Maria das Neves, por
todas as orações e por acreditarem nos meus sonhos!*

Ofereço

AGRADECIMENTOS

À Deus, pelo dom da vida, por todas as bênçãos, amor, por nunca ter me deixado sozinho e por ter me dado forças para chegar até aqui. À Nossa Senhora de Nazaré, por toda intercessão, amor e cuidado em todos os momentos.

À minha família, meus pais Welton Silva e Raquel Silva, por toda educação, dedicação, amor e por sempre me incentivarem a crescer de maneira justa e honesta. Meu irmão Wilhamis Duarte por acreditar em mim e por me presentear com o amor mais lindo, meus sobrinhos Davi Duarte e Melinda Duarte. Meus avós Antônio Duarte (*in memoriam*), Maria Luzia e Maria das Neves, por todo apoio e carinho. À minha bisavó Rosinda Oliveira (*in memoriam*), por todo amor e alegria que recebi. À minha madrinha Pamella Reis, minha grande inspiração na carreira, por todos os ensinamentos, dedicação e confiança. Às minhas tias Welma Soares, Welem Oliveira e meu tio Vitor Oliveira, por tudo que fizeram por mim. Aos meus primos Felipe Silva, Woliver Duarte, Ithalo Oliveira e Iago Oliveira. À minha cunhada Larissa Silva, por todo carinho de sempre. E, a todos familiares que foram presentes nesse período de pós-graduação.

Às minhas vidas de quatro patas Safira Duarte e Pandora Duarte, por toda fidelidade, lealdade e amor que sentem por mim. Nesse período de mestrado foi muito difícil deixá-las, pois sempre foram uma das minhas válvulas de escape de toda tristeza e desânimo, pelos momentos de brincadeira, carinho e os “lambeijos” sempre me faziam entender o quanto sou abençoado e feliz por todas as coisas que eu conquistei até aqui.

À minha orientadora Prof.^a Silvana Nisgoski, por me receber tão bem, pela orientação, confiança, ensinamentos e dedicação. Por possibilitar meu crescimento profissional, serei eternamente grato por tudo que conquistei com seu apoio.

Aos meus coorientadores Prof. Leonardo Reis e Prof.^a Graciela Muñiz, pela orientação, paciência, ensinamentos e por todo auxílio nessa pesquisa.

À minha família de Capitão Poço, Adriane Santos, Ana Paula, Ana Clara, Luiz Carlos e Milton Costa, que sempre me incentivaram a seguir e conquistar meus sonhos. Aos meus amigos Jordan Modesto, André Vitor, Magda Farias e Lídia Amaral, pelas conversas, conselhos e torcida.

Às minhas amigas e parceiras de laboratório Tawani Naide e Joilan Xipaia, pela amizade, lealdade, ensinamentos e por todos os momentos compartilhados,

deixando os dias mais leves e divertidos. Ao Deivison Souza, pela amizade, por toda ajuda e parceria, sempre muito atencioso. A todos os amigos da pós, em especial Alessandra Pessoa e Raimundo Junior, pela amizade, conversas e pelos momentos de descontração.

À banca avaliadora, Prof.^a Helena Vieira, Prof.^a Simone Morrone e Prof.^a Patricia Soffiatti, por gentilmente aceitarem o convite em contribuir e sugerir melhorias ao trabalho.

A todos os professores que contribuíram na minha formação.

À Universidade Federal do Paraná (UFPR) e ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Florestal (PPGEF), pela minha formação e oportunidade de crescimento profissional e pessoal.

Ao Laboratório de Anatomia e Qualidade da Madeira (LANAQM), por tudo que desenvolvi nas suas instalações.

Ao Instituto de Desenvolvimento Sustentável Mamirauá (IDSM), pela parceria em projetos e pela coleta do material de estudo.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelo fomento na concessão da bolsa de mestrado.

A todos que contribuíram direta e indiretamente no desenvolvimento desta pesquisa e da minha vida acadêmica.

“Deus é bom o tempo todo, o tempo todo Deus é bom”

(Filme Deus não está morto, 2014)

RESUMO

O objetivo desta pesquisa foi comparar o comportamento das características colorimétricas e dos espectros visíveis e no infravermelho próximo da madeira de quatro espécies, ocorrentes em floresta de várzea da Amazônia: *Hevea spruceana*, *Hura crepitans*, *Ocotea cymbarum* e *Pseudobombax munguba*. Para as análises colorimétricas e do espectro no infravermelho próximo, as leituras nas amostras foram obtidas de forma aleatória no plano anatômico transversal. Avaliou-se visualmente o comportamento espectral das amostras de madeira na região do visível e da região do infravermelho próximo. Nas análises estatísticas foram realizadas as comparações dos parâmetros colorimétricos, espectros no visível e no infravermelho da madeira das espécies de várzea. Utilizou-se também a análise dos classificadores *k*-NN, PLS-DA e SVM para verificar acurácia na discriminação das madeiras analisadas a partir dos dados do NIR. Além disso, foi determinado a densidade básica para as madeiras. Como resultados, a melhor diferenciação de algumas espécies foi alcançada para diferentes parâmetros, principalmente o ângulo de tinta (*h*), a espécie *P. munguba* apresentou a mediana significativamente maior para coordenada do eixo verde-vermelho (*a**), e as medianas das espécies *P. munguba* e *H. spruceana* obtiveram maiores valores na coordenada do eixo azul-amarelo (*b**) e saturação (*C**). Todas as espécies avaliadas foram classificadas como madeiras claras e de baixa densidade. Considerando a espectroscopia no infravermelho próximo para as espécies, foi observado o comportamento similar, porém com intensidade de absorbâncias diferenciadas. Verificou-se uma tendência de afastamento da curva de absorbância da espécie *H. crepitans* em relação às demais. O PLS-DA foi o classificador de maior acurácia. Assim, pode-se concluir, que no geral, as técnicas apresentaram potencial de separação para a distinção das espécies de floresta de várzea da Amazônia, contudo, são necessárias novas pesquisas que objetivem determinar uma abrangência de mais espécies desse ecossistema.

Palavras-chave: *Machine learning*. Discriminação de madeiras. Colorimetria. Assacú. Louro-inamuí. Seringa barriguda. Munguba.

ABSTRACT

The objective of this research was to compare the behavior of colorimetric characteristics and visible and near-infrared spectra of wood from four species, occurring in floodplain forests in the Amazon: *Hevea spruceana*, *Hura crepitans*, *Ocotea cymbarum* and *Pseudobombax munguba*. For colorimetric and near-infrared spectrum analyses, readings on the samples were obtained randomly in the transverse anatomical plane. The spectral behavior of wood samples was visually evaluated in the visible and near-infrared regions. In statistical analyses, comparisons were made of colorimetric parameters, visible and infrared spectra of wood from floodplain species. The analysis of the k-NN, PLS-DA and SVM classifiers was also used to verify the accuracy in discriminating the wood analyzed from the NIR data. Furthermore, the basic density for the wood was determined. As a result, the best differentiation of some species was achieved for different parameters, mainly the ink angle (h), the species *P. munguba* presented a significantly higher median for the green-red axis coordinate (a^*), and the medians of the species *P. munguba* and *H. spruceana* obtained higher values in the coordinate of the blue-yellow axis (b^*) and saturation (C^*). All species evaluated were classified as light and low-density wood. Considering near-infrared spectroscopy for the species, similar behavior was observed, but with different absorbance intensities. There was a tendency for the absorbance curve of the *H. crepitans* species to move away from the others. PLS-DA was the most accurate classifier. Thus, it can be concluded that, in general, the techniques presented separation potential for distinguishing Amazon floodplain forest species, however, further research is needed to determine the scope of more species in this ecosystem.

Keywords: *Machine learning*. Wood discrimination. Colorimetry. Assacú. Louro-inamuí. Seringa barriguda. Munguba.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 -	MAPA DE LOCALIZAÇÃO DA RESERVA DE DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL MAMIRAUÁ, ESTADO DO AMAZONAS.....	30
FIGURA 2 -	AMOSTRAS DE BAGUETAS COLETADAS DAS QUATRO ESPÉCIES.....	31
FIGURA 3 -	COMPARAÇÃO ENTRE AS MEDIANAS DO PARÂMETRO COLORIMÉTRICO L^* DAS QUATRO ESPÉCIES ANALISADAS. ..	40
FIGURA 4 -	COMPARAÇÃO ENTRE AS MEDIANAS DO PARÂMETRO COLORIMÉTRICO a^* DAS QUATRO ESPÉCIES ANALISADAS. ..	41
FIGURA 5 -	COMPARAÇÃO ENTRE AS MEDIANAS DO PARÂMETRO COLORIMÉTRICO b^* DAS QUATRO ESPÉCIES ANALISADAS. ..	42
FIGURA 6 -	COMPARAÇÃO ENTRE AS MEDIANAS DO PARÂMETRO COLORIMÉTRICO C^* DAS QUATRO ESPÉCIES ANALISADAS. ...	43
FIGURA 7 -	COMPARAÇÃO ENTRE AS MEDIANAS DO PARÂMETRO COLORIMÉTRICO h DAS QUATRO ESPÉCIES ANALISADAS.	44
FIGURA 8 -	GRÁFICO DE ESCORES DA ANÁLISE DE COMPONENTES PRINCIPAIS USANDO OS PARÂMETROS COLORIMÉTRICOS DAS QUATRO ESPÉCIES AVALIADAS.....	46
FIGURA 9 -	ESPECTROS MÉDIOS NA REGIÃO DO VISÍVEL PARA AS QUATRO ESPÉCIES AVALIADAS.	47
FIGURA 10 -	ESPECTROS MÉDIOS NIR DE MADEIRAS DAS QUATRO ESPÉCIES AVALIADAS.	48
FIGURA 11 -	ANÁLISE DE COMPONENTES PRINCIPAIS RESULTANTE DA UTILIZAÇÃO DOS ESPECTROS NIR ORIGINAIS MÉDIOS DAS QUATRO ESPÉCIES AVALIADAS.....	49
FIGURA 12 -	TAXA DE RECONHECIMENTO POR ESPÉCIE NA VALIDAÇÃO CRUZADA REPETIDA USANDO OS CLASSIFICADORES PLS-DA MAIS ACURADO.	52
FIGURA 13 -	COMPARAÇÃO ENTRE AS MÉDIAS DA DENSIDADE BÁSICA DA MADEIRA DE QUATRO ESPÉCIES.....	53
FIGURA 14 -	DISPERSÃO, POLÍGONO DE FREQUÊNCIA E CORRELAÇÃO DE PEARSON PARA A DENSIDADE BÁSICA E PARÂMETROS COLORIMÉTRICOS	55

LISTA DE QUADROS

QUADRO 1 - AMOSTRAS DE MADEIRAS COLETADAS NA RESERVA DE DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL MAMIRAUÁ, ESTADO DO AMAZONAS.....	30
QUADRO 2 - VARIANTES DE HIPERPARÂMETROS AVALIADAS PARA CADA ALGORITMO DE APRENDIZADO DE MÁQUINA E PACOTES USADOS.....	37

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 -	GRUPOS DE CORES OBTIDOS POR CAMARGOS E GONÇALEZ (2001) UTILIZANDO AS VARIÁVEIS CROMÁTICAS L^* , a^* , b^* , C^* E h	24
TABELA 2 -	DESEMPENHO DOS CLASSIFICADORES NA VALIDAÇÃO CRUZADA REPETIDA.....	50

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANN	- <i>Artificial Neural Network</i> – Redes neurais artificiais
CIE	- <i>Comisión Internacional de L'Eclairage</i> - Comissão Internacional de Iluminantes
DAP	- Diâmetro à altura do peito
IVI	- Índice de Valor de Importância
<i>k</i> -NN	- <i>K Nearest Neighbors</i> – Vizinho mais próximo
MLR	- Regressão Linear Múltipla
NIR	- Espectroscopia no infravermelho próximo
PCA	- <i>Principal Component Analysis</i> - Análise dos Componentes Principais
PLS-DA	- <i>Partial Least Squares Discriminant Analysis</i> – Análise discriminante por soma dos quadrados parciais
RBAC	- Reserva da Biosfera da Amazônia Central
RDS	- Reserva de Desenvolvimento Sustentável
SISGEN	- Sistema Nacional de Gerenciamento do Patrimônio Genético
SNUC	- Sistema Nacional de Unidades de Conservação da Natureza
SVM	- <i>Support Vector Machine</i> - Máquina de vetores de suporte
UNESCO	- Organização das Nações Unidas para a Educação, a Ciência e a Cultura
VIG	- Valor de Importância Global
X	- Plano Transversal

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
2	OBJETIVOS	19
2.1	OBJETIVO GERAL	19
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	19
3	REVISÃO DE LITERATURA	20
3.1	FLORESTA AMAZÔNICA DE VÁRZEA	20
3.2	TÉCNICAS NÃO DESTRUTIVAS PARA A CARACTERIZAÇÃO DA MADEIRA	22
3.2.1	COLORIMETRIA E ESPECTROSCOPIA NO VISÍVEL	23
3.2.2	ESPECTROSCOPIA NO INFRAVERMELHO PRÓXIMO	27
4	MATERIAL E MÉTODOS	30
4.1	ÁREA DE ESTUDO	30
4.2	COLORIMETRIA – ESPECTROSCOPIA NO VISÍVEL	31
4.3	ESPECTROSCOPIA NO INFRAVERMELHO PRÓXIMO	32
4.4	DENSIDADE BÁSICA	32
4.5	ANÁLISE ESTATÍSTICA	33
4.5.1	Colorimetria – espectroscopia no visível	33
4.5.2	Espectroscopia no infravermelho próximo.....	34
4.5.2.1	<i>Support Vector Machine - SVM</i>	34
4.5.2.2	<i>Partial Least Squares – Discriminant Analysis - PLS-DA</i>	35
4.5.2.3	<i>k-Nearest Neighbors - k-NN</i>	35
4.5.2.4	Experimentos, validação cruzada e métricas de avaliação	36
4.5.3	Densidade básica e a relação com os parâmetros colorimétricos.....	38
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	39
5.1	COLORIMETRIA - ESPECTROSCOPIA NO VISÍVEL	39
5.2	ESPECTROSCOPIA NO INFRAVERMELHO PRÓXIMO	47
5.3	DENSIDADE BÁSICA (Db) E A RELAÇÃO COM OS PARÂMETROS COLORIMÉTRICOS.....	52
6	CONCLUSÕES	56
7	RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	57
	REFERÊNCIAS	58

1 INTRODUÇÃO

A floresta amazônica apresenta uma diversidade de fauna e flora com importância mundial, além de abrigar uma diversidade de ecossistemas únicos. Dentre esses ecossistemas destaca-se as florestas de terra firme e as de várzea. As áreas de várzea estão sujeitas a ciclos de inundação, que podem ser diários ou de ciclos anuais. Na Amazônia as áreas de alagamento estão margeadas pelos rios, lagos, furos d'água ou igarapés. As características desses ambientes influenciam diretamente na composição das espécies ocorrentes nessas áreas, em razão da variação hídrica no decorrer do ano.

Assim como em outras áreas do bioma amazônico, o manejo florestal é uma realidade nas florestas de várzea, desde quando foi permitida a pequenos produtores a extração de madeira para efeito de comercialização. As espécies em estudo estão entre as principais madeiras comercializadas na região. Portanto, devido à diversidade de espécies no ecossistema de várzea, surge a necessidade de técnicas que auxiliem na discriminação dessas espécies, evitando-se a troca involuntária ou dolosa, desperdício e emprego inadequado.

A identificação madeireira na Amazônia é desafiadora, em virtude da grande variedade de espécies arbóreas, onde muitas compartilham características semelhantes, principalmente a cor e a textura. Em áreas de várzea essa dificuldade é ainda maior, tanto pelo acesso e em razão de menos estudos de caracterização de espécies madeireiras desse ambiente, quando comparado com as de floresta de terra firme.

A caracterização anatômica vai além de respaldar estudos taxonômicos que possam identificar a madeira das espécies, é de grande importância também para prever inicialmente a utilização adequada da madeira de uma espécie, levando em conta sua formação estrutural. Tradicionalmente, a identificação de madeiras é realizada pelos métodos anatômico macroscópico e microscópico, sendo o segundo mais preciso, por possibilitar a visualização de mais elementos.

Nos últimos anos, outros métodos de identificação passaram a ser usados na identificação de madeiras, como as técnicas não destrutivas. Uma delas é a colorimetria e espectroscopia no visível, que possibilita a caracterização da cor numericamente. A coloração da madeira é inicialmente uma das principais

características para diferenciação de espécies, geralmente é determinante para escolha e indicação de uso.

Outra técnica que vem apresentando eficiência para discriminar e classificar espécies através de amostras de madeira é a espectroscopia no infravermelho próximo (NIR), a qual proporciona uma abordagem não destrutiva e rápida, através de instrumentos portáteis e de bancada, por métodos quimiométricos. Estudo de Santos *et al.* (2021c), abordam que esta técnica, aliada ao aprendizado de máquina (*Support Vector Machine (SVM)*; *Partial Least Squares – Discriminant Analysis (PLS-DA)*; e *k-nearest neighbors (k-NN)*), tem potencial para discriminar espécies madeiras de forma eficaz. Partindo desta premissa, este trabalho busca a utilização de técnicas não destrutivas e o aprendizado de máquinas para auxiliar na discriminação de espécies arbóreas com potencial madeireiro da floresta de várzea da Amazônia Central.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Discriminar espécies florestais com potencial madeireiro oriundas de floresta de várzea na Amazônia através de técnicas não destrutivas.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Analisar o uso da colorimetria e influência de duas posições do fuste na discriminação de espécies da várzea amazônica;
- Determinar a densidade básica e relacionar com os parâmetros colorimétricos das madeiras das espécies da várzea amazônica;
- Avaliar o emprego da Espectroscopia no Infravermelho Próximo e os espectros do NIR no aprendizado de modelos de classificação na discriminação de espécies da várzea amazônica.

3 REVISÃO DE LITERATURA

3.1 FLORESTA AMAZÔNICA DE VÁRZEA

A floresta amazônica abriga uma variedade de ecossistemas, alguns com características únicas. Dessa forma, torna-se necessário o monitoramento e desenvolvimento de pesquisas que contribuam para a conservação desse bioma. Para isso, em 1972 a Organização das Nações Unidas para a Educação, a Ciência e a Cultura (UNESCO), criou um instrumento para contribuir na conservação de áreas florestais, denominada de Reservas da Biosfera. De acordo com o Sistema Nacional de Unidades de Conservação - SNUC (Lei 9.985 de 18 de julho de 2000), a Reserva da Biosfera trata-se de um modelo de gestão integrada, participativa e sustentável dos recursos naturais, que tem por objetivo básico a preservação da biodiversidade e o progresso das atividades de pesquisa científica que contribuam para o desenvolvimento sustentável e a melhoria da qualidade de vida das populações, sendo formado por uma coleção representativa dos ecossistemas característicos da região.

No Brasil, foi aprovada em 2001 a criação da Reserva da Biosfera da Amazônia Central (RBAC), que está localizada no interior do estado do Amazonas, na área do Projeto Corredor Ecológico Central da Amazônia. A reserva tem por elemento estrutural de seus territórios o conjunto de áreas protegidas contínuas, formado pelo(a): Parque Nacional do Jaú; Estação Ecológica de Anavilhamas; Reservas Ecológicas do Rio Negro, Javari-Solimões e de Juami-Japurá; Reserva Biológica de Uarumã; Floresta Nacional de Tefé; Reservas de Desenvolvimento Sustentável Mamirauá e Amanã, entre outras de menor extensão territorial (MAB/UNESCO, 2001). Vale ressaltar nessas áreas, a extensa porção territorial de florestas de várzea.

As florestas de várzea da Amazônia são áreas que estão sob influência hídrica anualmente, em decorrência da sua localização às margens dos rios, igarapés, lagos e furos d'água (ABREU *et al.*, 2014). A extensão territorial desse ecossistema é superior a 75.000 km², equivalente a 1,6% da área total da Amazônia brasileira (JUNK *et al.*, 2014). A variação hídrica é um fator determinante para o estabelecimento de espécies arbóreas, assim nota-se a diferença nas espécies ocorrentes na floresta de terra firme e de várzea (MONTERO; PIEDADE; WITTMANN, 2014).

As várzeas da Amazônia dividem-se basicamente em dois grupos, a várzea alta e a várzea baixa, cada uma apresentando características distintas em relação à sua estrutura, estádios sucessionais e riqueza de espécies (WITTMANN *et al.*, 2010; WITTMANN *et al.*, 2022). As adaptações das espécies às condições de inundação são fundamentais, com plantas da várzea baixa, ocorrente nas áreas mais baixas, demonstrando maior tolerância e desenvolvendo mais mecanismos adaptativos em comparação com as da várzea alta (WITTMANN *et al.*, 2010). A influência de eventos climáticos extremos, como períodos de seca e/ou alagamento, são fatores importantes no estabelecimento e distribuição das espécies. As adaptações fisiológicas variam entre as espécies, influenciadas pela carga genética e pela disponibilidade de recursos ambientais, afetando a capacidade fotossintética e a absorção de nutrientes do solo (WITTMANN *et al.*, 2010).

A vegetação de várzea apresenta fragilidade pois, quando sofre alteração antrópica o processo de recuperação é difícil (JUNK *et al.*, 2014). A resiliência de áreas de planícies alagadas é baixa, e a remoção da cobertura vegetal pode resultar na perda do habitat, evidenciando a clara importância estrutural e ecológica que a vegetação desempenha na conservação da região (ESQUIVEL-MUELBERT *et al.*, 2019). Flores *et al.* (2017), observando os padrões de distribuição de toda a cobertura arbórea da bacia amazônica, constataram que as planícies aluviais podem ser consideradas o ponto fraco do bioma Amazônia, levando em conta o risco de transição em grande escala impulsionada pelo clima.

As espécies arbóreas ocorrentes nas florestas de várzea, nas margens dos rios e de planícies inundáveis, geralmente apresentam menor diversidade de espécies em comparação com as florestas de terra firme (BREDIN *et al.*, 2020). A diversidade e estrutura de espécies em locais alagados podem ser relacionadas com o tempo de inundação e a profundidade (HAWES *et al.*, 2012). A menor diversidade de espécies arbóreas é explicada pelo fato da pouca ocorrência de espécies que apresentem adaptações morfofisiológicas ao ciclo sazonal de inundações (BREDIN *et al.*, 2020).

Pode-se destacar que as espécies arbóreas influenciadas pelos ciclos sazonais de inundação podem apresentar diferenças anatômicas, quando comparadas com as mesmas espécies que ocorrem nos dois ecossistemas. Isso ocorre em virtude da formação estrutural do lenho se adaptar à condição que é exposta, acarretando conseqüentemente em alterações nas características anatômicas e físicas (FIRMINO *et al.*, 2019). Estudos de Fontes *et al.* (2020) indicam

que o principal elemento que se adapta à influência hídrica são os elementos de vasos.

Em relação à composição de espécies arbóreas em florestas de várzea, verificou-se a ocorrência de 73 famílias, cerca de 320 gêneros e mais de 900 espécies identificadas. As famílias que apresentam maior Índice de Valor de Importância (IVI) são: Fabaceae (11,2%), Euphorbiaceae (7,7%), Bombacaceae (7,5%), Moraceae (7,5%) e Arecaceae (7,4%). Dentre as principais espécies com maior Valor de Importância Global (VIG) estão: *Pseudobombax munguba* (Mart. & Zucc.) Dugand, *Laetia corymbulosa* Spruce ex. Benth., *Crataeva bentharii* Eichler, *Brosimum lactescens* (S. Moore) CC Berg, *Theobroma cacao* L. e *Hura crepitans* L. (WITTMANN *et al.*, 2006).

As espécies estudadas nessa pesquisa são: *Hura crepitans* L. (Euphorbiaceae), *Hevea spruceana* (Benth.) Müll.Arg. (Euphorbiaceae), *Ocotea cymbarum* Kunth (Lauraceae) e *Pseudobombax munguba* (Mart. & Zucc.) Dugand. (Malvaceae). Todas as espécies são nativas do bioma Amazônia, com ocorrência confirmada no Norte do Brasil, são comumente encontradas em áreas com influência hídrica. Além da importância ecológica, enquanto componente desse ecossistema, apresentam importância econômica para a região, pois são exploradas nos manejos florestais que são realizados nessas áreas. As madeiras dessas espécies são empregadas em diversos usos, como: compensado, laminado, construção civil (leve interna e/ou de uso temporário), barcos e móveis (LPF, 2023; IPT, 2023).

3.2 TÉCNICAS NÃO DESTRUTIVAS PARA A CARACTERIZAÇÃO DA MADEIRA

Existem diferentes métodos para caracterizar a madeira, com abordagens distintas. Uma parcela deles utiliza técnicas destrutivas, onde torna-se necessário a derrubada de árvores para o estudo, além disso, as amostras também são danificadas conforme o desenvolvimento das análises. Em contrapartida, outros métodos vêm sendo aplicados, como os não destrutivos, que não há a necessidade de destruir as amostras.

A aplicação da técnica não destrutiva vem sendo utilizada cada vez mais, especialmente quando a amostra já está em utilização e não pode ser destruída. Na última década, observou-se que as pesquisas que aplicam a técnica não destrutiva baseiam-se na termografia, radiação eletromagnética, resistência elétrica, ultrassom,

espectroscopia, entre outras (NIEMZ; MANNES, 2012). Estudos como esses demonstram a importância do método, os bons resultados e as vantagens de serem utilizados.

Entre essas e tantas pesquisas, destacam-se especialmente as análises de colorimetria, espectroscopia no visível e o infravermelho próximo. Essas técnicas compartilham características fundamentais em comum, como a capacidade de avaliar uma peça sem a necessidade de extrair corpos de prova, além de proporcionar agilidade e rapidez, em comparação aos métodos tradicionais de análises para caracterizar madeiras (COSTA *et al.*, 2011).

Contudo, cada técnica apresenta particularidades. Logo abaixo, será explanado sobre o funcionamento e especificidade das análises.

3.2.1 COLORIMETRIA E ESPECTROSCOPIA NO VISÍVEL

A cor é uma das principais características sensoriais da madeira, perceptível visualmente, porém é um parâmetro muito subjetivo, pois pode ocorrer de cada observador classificar a madeira com uma coloração diferente. Assim, para resolver essa subjetividade foram desenvolvidos métodos que aplicam a matemática para determinar o padrão de cor da madeira. No princípio, o método utilizado era o comparativo de Munsell, que se trata de um atlas de cores para definir a coloração de determinado material por comparação. Nos últimos anos, devido à sua alta precisão, o método que vem sendo utilizado é a colorimetria (BONFATTI JÚNIOR; LENGOWSKI, 2018).

A colorimetria é o método que caracteriza a cor da amostra de madeira no espectro do visível, assim é possível descrever, quantificar e simular, com auxílio de modelos matemáticos, a percepção da cor pelo olho humano. Para garantir uma determinação com o mínimo de interferência na cor da madeira, é recomendado o uso do sistema de leitura CIE $L^*a^*b^*$, estabelecido pela CIE (Comissão Internacional de L'Eclairage ou Comissão Internacional de Iluminantes). Essas leituras podem ser obtidas por meio de espectrofotômetros ou por colorímetros (MORI *et al.*, 2005).

Com o sistema CIELAB, é possível a determinação precisa da localização da cor da madeira dentro do espectro total da cor, resultando em valores de L^* (luminosidade), a^* (coordenadas do eixo verde-vermelho), b^* (coordenada do eixo azul-amarelo) e também a saturação (C^*) e o ângulo de tinta (h), calculados através

dos valores de a^* e b^* . Com o intuito de padronizar e facilitar a colorimetria em madeiras, Camargos e González (2001) reuniram as informações dos parâmetros cromáticos (L^* , a^* , b^* , C^* e h) coletados de 350 madeiras e assim publicaram uma tabela contendo 25 grupos de cores que representam a maioria das madeiras brasileiras (Tabela 1).

TABELA 1 - GRUPOS DE CORES OBTIDOS POR CAMARGOS E GONÇALEZ (2001) UTILIZANDO AS VARIÁVEIS CROMÁTICAS L^* , a^* , b^* , C^* E h .

COR	Intervalo das variáveis cromáticas				
	L^*	a^*	b^*	C^*	h
Marrom-escuro	38-51	06-11	10-16	12-19	50-61
Amarelo-claro	65-76	07-11	26-37	28-38	71-77
Oliva	40-55	05-10	12-22	13-24	60-71
Cinza-rosado	61-76	04-08	13-20	14-21	67-76
Oliva-amarelado	51-69	06-09	20-27	21-28	69-76
Rosa-acinzentado	55-71	07-11	14-22	16-25	59-68

FONTE: Adaptação de Camargos e González (2001).

Além dos parâmetros colorimétricos, com o espectrofotômetro pode ser obtido o espectro de reflectância, onde são apresentados a variação de valores para cada comprimento de onda, proporcionando uma compreensão mais detalhada das características espectrais da madeira.

A técnica já apresentou potencial comprovado em pesquisas que a aplicaram para o controle do estado de conservação da madeira (SOTO-MARTÍN, 2014), avaliando também se o aquecimento natural e artificial influencia na mudança de cor de objetos feitos de madeira (KRŽIŠNIK *et al.*, 2018), teor de extrativos e fenol (MOYA *et al.*, 2012) e a avaliação dos parâmetros colorimétricos com a densidade de alburno (NISHINO *et al.*, 2000).

Em relação à diferenciação e determinação de características de espécies madeireiras, a técnica também já foi utilizada e apresentou bons resultados, especialmente quando são consideradas informações como o valor agregado da peça de madeira. Nessa situação, a coloração da madeira é uma das propriedades organolépticas mais crucias. Continuamente ela é determinante para utilização e aceitação do consumidor final (BONFATTI JÚNIOR; LENGOWSKI, 2018).

Vários trabalhos já foram desenvolvidos com a aplicação da colorimetria, principalmente para gêneros e espécies que não são nativos do Brasil. Assim como

em outras técnicas, o gênero *Eucalyptus* L'Hér. é um dos protagonistas em vários trabalhos. Será listado alguns dos estudos com o gênero:

- Nisgoski *et al.* (2017) utilizaram a espectroscopia no visível para discriminação de espécies de eucalipto, usando amostras sólidas;
- Martins *et al.* (2015) aplicaram a colorimetria para agrupar clones de eucalipto;
- Garcia *et al.* (2014) fizeram a relação da colorimetria com a densidade das madeiras dos gêneros *Corymbia* K.D.Hill & L.A.S.Johnson e *Eucalyptus*;
- Zanuncio, Farias e Silveira (2014), analisaram a colorimetria e a termorreificação da madeira de *Eucalyptus grandis* W.Hill;
- Cademartori *et al.* (2013) avaliaram a variação dos parâmetros colorimétricos durante a modificação térmica da madeira de *E. grandis*;
- Vanclay, Henson e Palmer (2008), utilizaram a colorimetria para avaliar as variações de cores de madeiras serradas de *Eucalyptus dunnii* Maiden;
- Mori *et al.* (2005) caracterizaram os parâmetros colorimétricos de clones de híbridos de *Eucalyptus* spp.;
- Mori *et al.* (2004) analisaram a influência das propriedades tecnológicas na cor da madeira de eucaliptos.

Para a floresta amazônica, verificou-se estudos que também utilizaram da técnica para diferentes situações:

- Reis *et al.* (2023) utilizaram os parâmetros colorimétricos para auxiliar na discriminação de madeiras de *Manilkara* spp. de uma área de exploração em uma unidade de conservação na Amazônia brasileira;
- Santos *et al.* (2022) aplicaram a colorimetria para descrição de algumas espécies de madeiras comercializadas como “tauari” na Amazônia brasileira;
- Silva *et al.* (2022) utilizaram os parâmetros colorimétricos CIELAB para caracterizar a deterioração superficial de cinco madeiras amazônicas expostas ao intemperismo natural;

- Santos *et al.* (2021b) caracterizaram madeiras conhecidas como “Louros” na Amazônia brasileira por espectroscopia no visível e parâmetros CIELAB;
- Lima *et al.* (2021) aplicaram a colorimetria como critério de segregação de resíduos madeireiros provenientes do manejo florestal sustentável na Amazônia brasileira para bioenergia;
- Santos *et al.* (2021a) utilizaram espectroscopia VIS e parâmetros CIELAB de seis espécies de madeira da família Fabaceae comercializadas na Amazônia brasileira;
- Sousa *et al.* (2020) avaliaram a utilização da colorimetria da madeira para subsidiar uma classificação mais eficiente de espécies arbóreas da Amazônia;
- Ribeiro *et al.* (2018) utilizaram a colorimetria em madeiras comerciais amazônicas;
- Barros *et al.* (2014) realizaram a caracterização colorimétrica de três espécies madeireiras da Amazônia, para analisar a variabilidade da cor da madeira nas seções anatômicas;
- Autran e Gonzalez (2006) utilizaram a colorimetria para caracterizar as madeiras de seringueira (*Hevea brasiliensis* (Willd. ex A.Juss.) Müll.Arg.) e muirapiranga (*Brosimum rubescens* Taub.), para serem utilizadas em ambientes internos;
- Pastore, Santos e Rubim (2004) conduziram uma análise espectrocolorimétrica para analisar o efeito da radiação em quatro espécies madeireiras da Amazônia.

Como se observa nos trabalhos listados anteriormente, a aplicação da técnica colorimétrica cada vez mais vem sendo utilizada na tecnologia da madeira e nota-se os resultados promissores. Vale evidenciar a importância de que novos estudos sejam desenvolvidos, levando em conta outras espécies nativas tropicais e de ocorrência em outras formações florestais, como as florestas de várzea. Ainda mais porque os parâmetros colorimétricos podem apresentar diferenças na mesma espécie ocorrente no mesmo ambiente, como mostra a pesquisa de Meints *et al.* (2017). Também se constatou variações colorimétricas em uma mesma variedade crescendo em locais

distintos (CSORDÓS; NÉMETH; BAK, 2014) e até mesmo diferenças entre indivíduos da mesma espécie (SILVA *et al.*, 2017).

É importante ressaltar que a cor da madeira pode variar até mesmo dentro do mesmo indivíduo. A textura da amostra pode influenciar nessa variação da cor (BUCHELT; WAGENFÜHR, 2012) e a variação radial em decorrência da presença de lenho adulto e juvenil (DELUCIS *et al.*, 2014). O plano anatômico de corte em que a análise é realizada também apresenta variação de cor (ATAYDE; GONÇALEZ; CAMARGOS, 2011).

Dessa maneira, para que a colorimetria seja utilizada na prática para identificação de madeiras, é fundamental que seja construído um banco de dados com o máximo de informações colorimétricas das espécies, para assim diferenciar corretamente as espécies pela cor.

3.2.2 ESPECTROSCOPIA NO INFRAVERMELHO PRÓXIMO

A espectroscopia no infravermelho consiste em uma caracterização que resulta na resposta química das amostras, sendo dividida em números de onda: espectroscopia no infravermelho distante (200 a 10 cm^{-1}), infravermelho médio (4.000 a 200 cm^{-1}) e infravermelho próximo (12.800 a 4000 cm^{-1}). Diferentes informações das amostras podem ser fornecidas de acordo com cada região do infravermelho analisada (SKOOG; HOLLER; CROUCH, 2017).

A utilização da espectroscopia no infravermelho próximo (NIR) no início era mais atrelada aos setores da indústria de fármacos, polímeros, petroquímica, alimentos e produtos agrícolas (TSUCHIKAWA; KOBORI, 2015). Nos últimos anos, encontram-se muitos estudos que empregam a utilização do NIR em outras áreas e nas ciências florestais, como exemplo, para solos e para madeiras (SILVA *et al.*, 2020). Especificamente na área de tecnologia da madeira, o uso da técnica iniciou no setor de papel e celulose, em seguida expandiu-se para outras áreas da linha.

Durante os anos, diversos trabalhos foram publicados, pois percebeu-se a necessidade de entender melhor o funcionamento da técnica NIR na ciência e tecnologia da madeira. Hein, Pakkanen e Santos (2017) publicaram uma revisão de literatura sobre as dificuldades de utilização do NIR para avaliar a qualidade da madeira; Pasquini (2018) preparou uma revisão de literatura abrangente com novas perspectivas sobre a técnica do NIR; Tsuchikawa e Kobori (2015) detalharam em sua

revisão a técnica do NIR relacionado com a ciência e tecnologia da madeira; e Schwanninger, Rodrigues e Fackler (2011) contribuíram com uma revisão com enfoque nas atribuições de bandas nos espectros de infravermelho próximo em relação aos componentes da madeira. Além dessas revisões sobre a técnica do NIR, destaca-se a seguir pesquisas que fizeram uso da técnica:

- Nisgoski *et al.* (2023) fizeram o uso do NIR para a identificação de proveniência de folhas e castanhas de *Bertholletia excelsa* Bonpl para extração sustentável;
- Nisgoski *et al.* (2020) utilizaram NIR para diferenciar processos de carbonização de madeiras africanas;
- Nisgoski *et al.* (2018) determinaram a influência da toposequência na espectroscopia da casca e da madeira de barbatimão;
- Nisgoski *et al.* (2016a) aplicaram NIR para diferenciação de madeira e casca de indivíduos de *Pinus taeda* com diferentes níveis de adubação;
- Bergo *et al.* (2016) utilizaram NIR para diferir as madeiras de origens geográficas distintas;
- Nisgoski *et al.* (2016b) discriminaram com NIR as variedades de *Cryptomeria japonica* D.Don de povoamentos do sul do Brasil;
- Hwang *et al.* (2016) aplicaram a técnica do NIR para identificação de espécies de carvão e madeira;
- Tsuchikawa, Yamato e Inoue (2003) utilizaram NIR para diferir materiais com base em madeira.

Para caracterização e diferenciação da madeira de espécies com características anatômicas similares, é possível utilizar a técnica do NIR, associado com outras análises (HORIKAWA; TAZURU; SUGIYAMA, 2015), composição química, predição de caracteres anatômicos (VIANA *et al.*, 2009), identificação de espécies (LAZARESCU *et al.*, 2017), predizer resultados de densidade da madeira (AYANLEYE; AVRAMIDIS, 2021) e determinação de outras propriedades tecnológicas da madeira, químicas e mecânicas (NASCIMENTO *et al.*, 2021).

Pesquisas como essas podem ter aplicabilidade em diferentes setores. Toscano *et al.* (2017) usaram a técnica do NIR no setor de pellets, para diferenciação de cascas e madeiras das espécies; Acquah *et al.* (2015) analisaram a utilização do NIR na predição das propriedades da biomassa; Vieira *et al.* (2021), aplicaram a

técnica NIR para diferir o carvão de espécies de Myrtaceae nativas da Floresta Ombrófila Mista; Kita *et al.* (2020) classificaram madeiras utilizadas em edifícios modernos e antigos com NIR e análise multivariada; e Gonçalves *et al.* (2021) realizaram a identificação arqueológica de madeiras alagadas com análise do infravermelho próximo na Amazônia Oriental.

No Brasil, vem crescendo a utilização da técnica NIR e está cada vez mais sendo voltada para aplicações práticas em órgãos fiscalizadores. Na região Norte, seis espécies de madeiras amazônicas foram diferenciadas com o uso do NIR portátil (SOARES *et al.*, 2017); Pastore *et al.* (2011) realizaram a identificação de quatro madeiras de diferentes espécies, similares ao mogno brasileiro; e Muñiz *et al.* (2016) diferenciaram madeiras conhecidas por “angelim” aplicando NIR.

Santos *et al.* (2021c) discriminaram madeiras de “Louros” da Amazônia brasileira por espectroscopia no infravermelho próximo e técnicas de aprendizado de máquina; Vieira *et al.* (2020) utilizaram a técnica NIR para distinção de madeira e carvão vegetal de espécies de Fabaceae em conjunto com os modelos ANN, KNN E SVM; Santos *et al.* (2020) aplicaram a técnica NIR para separação de madeira de “tauari” ocorrente na floresta amazônica brasileira.

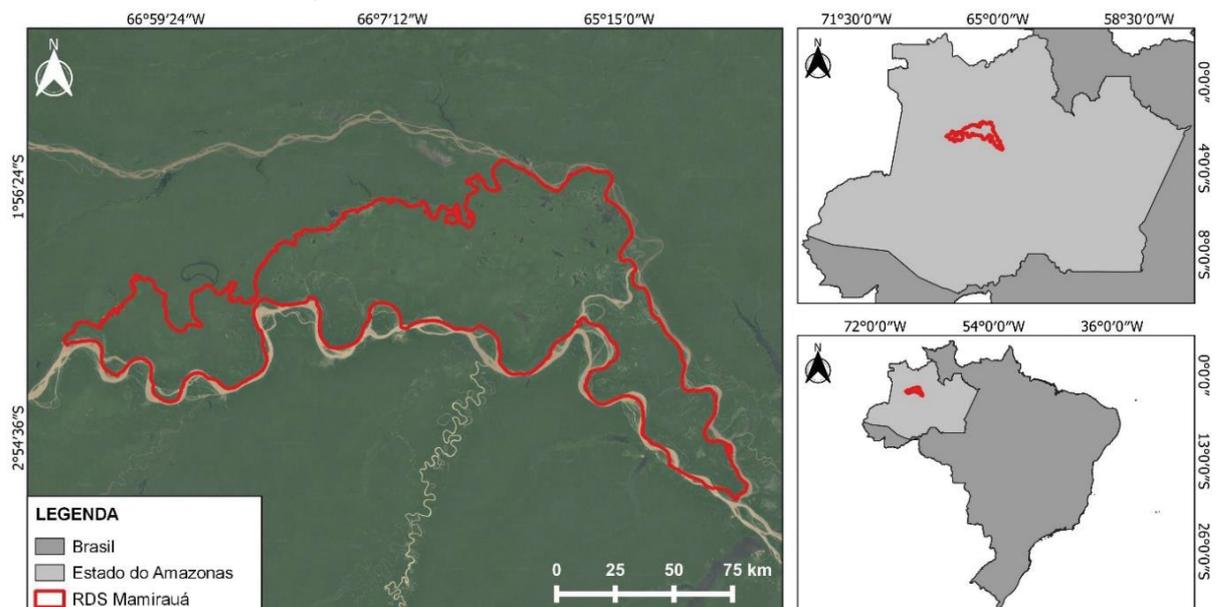
Vale ressaltar que, para a aplicação prática da técnica do NIR na identificação madeireira, o desafio vai além da simples leitura da amostra. É fundamental a construção de um extenso banco de dados contendo vários espectros de amostras de madeiras para comparação, permitindo uma diferenciação precisa entre as diferentes espécies.

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 ÁREA DE ESTUDO

A área de coleta das amostras de madeira foi na Reserva de Desenvolvimento Sustentável (RDS) Mamirauá (Figura 1), localizada na região do médio Solimões, nas proximidades da cidade de Tefé, no Centro-Oeste do estado do Amazonas (03°08'S e 64°45'W e 02°36'S e 67°13'W), em área de floresta de várzea alta. O território da RDS Mamirauá recobre uma área de 1.240.000 ha de florestas inundáveis de várzea, sendo delimitada pelos rios Solimões, Auati Paraná e Japurá (RAMALHO *et al.*, 2009). A área está dentro da composição da Reserva da Biosfera da Amazônia Central (RDAC). As espécies coletadas para a avaliação estão no Quadro 1.

FIGURA 1 - MAPA DE LOCALIZAÇÃO DA RESERVA DE DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL MAMIRAUÁ, ESTADO DO AMAZONAS



FONTE: O autor (2023).

QUADRO 1 - AMOSTRAS DE MADEIRAS COLETADAS NA RESERVA DE DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL MAMIRAUÁ, ESTADO DO AMAZONAS.

Nome vernacular	Nome científico	Família	Árvores	Nº de baguetas	Nº de leituras
Assacú	<i>Hura crepitans</i>	Euphorbiaceae	4	8	160
Seringa barriguda	<i>Hevea spruceana</i>	Euphorbiaceae	4	8	160
Louro inamuí	<i>Ocotea cymbarum</i>	Lauraceae	4	8	160
Munguba	<i>Pseudobombax munguba</i>	Malvaceae	4	8	160
Total de amostras			16	32	640

FONTE: O autor (2023).

As amostras para as análises foram coletadas pelo método não destrutivo invasivo, com o uso do trado de incremento (Figura 2). Foram amostrados quatro indivíduos adultos de cada espécie em duas posições no fuste, no DAP (1,30 m do solo) e em 2 m. Todas as amostras de baguetas de madeira coletadas foram identificadas em campo e armazenadas separadamente em suporte com divisória. Nesta pesquisa foram utilizadas 32 baguetas de madeira maciça (Quadro 1).

FIGURA 2 - AMOSTRAS DE BAGUETAS COLETADAS DAS QUATRO ESPÉCIES



Fonte: O Autor (2023)

Em todas as árvores amostradas foi realizado a coleta de material botânico, seguindo os procedimentos de coleta proposto por Martins-da-Silva (2002). A identificação foi feita *in loco* por parobotânico experiente, além disso, o material vegetativo foi enviado para o herbário do INPA-AM para confirmação da identificação. Todas as espécies analisadas estão cadastradas no Sistema Nacional de Gerenciamento do Patrimônio Genético (SisGen) sob o código A66D164.

4.2 COLORIMETRIA – ESPECTROSCOPIA NO VISÍVEL

A análise colorimétrica foi conduzida com base no sistema CIEL*a*b*, utilizou-se o espectrofotômetro *Konica Minolta CM-5* e o software *Spectra Magic NX*, com iluminante D65 e ângulo de observação de 10°, na faixa espectral de 360 a 740 nm e 10 nm de resolução. Para padronização das superfícies e eliminação das influências de oxidação nas baguetas, todas as amostras no plano anatômico transversal (X)

passaram pelo polimento com lixas na granulometria de 180 e 320. Para manter a uniformidade e qualidade, todas as baguetas foram mantidas em temperatura de $23^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ e umidade relativa de $60\% \pm 5\%$. As baguetas de madeira permaneceram nessas condições durante todo o período de análise.

Com as amostras preparadas, realizou-se medições aleatórias no plano anatômico transversal. Em cada bagueta, realizaram-se 20 leituras, totalizando 640 leituras (Quadro 1) na região do espectro visível, no intervalo de 360 a 740 nm. Assim, foram obtidos os parâmetros colorimétricos de luminosidade (L^*), coordenada do eixo verde-vermelho (a^*) e coordenada do eixo azul-amarelo (b^*). Utilizando os dados dos parâmetros a^* e b^* , calculou-se a saturação (C^*) e o ângulo de tinta (h), a partir das equações 1 e 2, respectivamente.

$$C^* = (a^2 + b^2)^{1/2} \quad (1)$$

$$h = \arctg\left(\frac{b^2}{a^2}\right) \quad (2)$$

4.3 ESPECTROSCOPIA NO INFRAVERMELHO PRÓXIMO

O equipamento utilizado para a análise foi o espectrômetro *Vertex 70 (Bruker)*, atuando em reflectância difusa de 4.000 a 10.000 cm^{-1} com 8 cm^{-1} de resolução. De acordo com Hein *et al.* (2010), o preparo das amostras pode influenciar diretamente os espectros NIR. Com isso, para representação do método comumente utilizado no transporte de madeira, a obtenção dos espectros se deu diretamente da superfície. Para padronização das superfícies e eliminação das influências de oxidação nas baguetas, todas as amostras no plano anatômico transversal (X) passaram pelo polimento com lixa na granulometria de 180 e 320. Para manter a uniformidade e qualidade, todas as baguetas foram mantidas em temperatura de $23^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ e umidade relativa de $60\% \pm 5\%$. As baguetas de madeira permaneceram nessas condições durante todo o período de análise. Em seguida, estas foram submetidas a medições aleatórias no plano anatômico transversal, em cada bagueta, realizaram-se 20 leituras, totalizando 640 (Quadro 1).

4.4 DENSIDADE BÁSICA

Para determinação da Densidade básica (D_b), foram utilizadas as amostras de bagueta de madeira maciça. Cada amostra foi colocada separadamente em tubetes contendo água, até a saturação. Após essa etapa, para obtenção do volume saturado (V_{sat}), as amostras foram submetidas a pesagem pelo método de imersão, baseado na variação do peso líquido, onde foi utilizada uma balança semi-analítica de precisão com as amostras fixadas em um suporte móvel.

Para a obtenção da massa seca (M_s), as amostras foram colocadas na estufa de circulação forçada de ar, com temperatura de $103^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$. Para monitorar a secagem, as amostras foram pesadas periodicamente até atingir peso constante, com variação menor ou igual a 0,5 % em relação à última pesagem da massa. A partir da obtenção do volume saturado e da massa seca, foi feito o cálculo da densidade básica, conforme a Equação 3.

$$D_b = \frac{M_s}{V_{sat}} \quad (3)$$

Onde: D_b = densidade básica ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$), M_s = massa seca (g), V_{sat} = volume saturado (g).

4.5 ANÁLISE ESTATÍSTICA

4.5.1 Colorimetria – espectroscopia no visível

Neste estudo, o uso da Análise de Variância (ANOVA) paramétrica foi considerado inadequado para fins de inferências, pois as pressuposições de normalidade (Shapiro-Wilk, $\alpha = 0,05$), homocedasticidade (Bartlett, $\alpha = 0,05$) e independência (Durbin-Watson, $\alpha = 0,05$) dos resíduos não foram atendidas. Transformações (Logarítmica, Inversa, Box-Cox, Yeo-Johnson, Raiz Quadrada) das variáveis respostas foram aplicadas com auxílio do pacote “bestNormalize” (PETERSON, 2021), porém nenhuma proporcionou uma distribuição adequada para os resíduos. Portanto, o comportamento dos parâmetros colorimétricos (L^* , a^* , b^* , C^* e h) para as diferentes espécies, com 20 réplicas por bagueta de madeira maciça, foi avaliado por meio do teste não paramétrico de Kruskal-Wallis ($\alpha = 0,05$), seguido do teste de comparação múltiplo de Dunn ($\alpha = 0,05$), com auxílio das bibliotecas “AgroR” (SHIMIZU; MARUBAYASHI; GONÇALVES, 2023) e “ggstatsplot” (PATIL, 2021). O teste de Kruskal-Wallis é uma abordagem alternativa à ANOVA quando as

pressuposições do teste paramétrico são violadas, pois a chance de ocorrer erro do tipo I distancia-se de α (ELLIOTT; HYNAN, 2011). A hipótese nula (H_0) do teste de Kruskal-Wallis é de que todas as medianas são iguais entre os grupos comparados. A hipótese alternativa (H_a) é de que pelo menos duas medianas são diferentes entre os grupos.

Para avaliar a discriminação das espécies pelos parâmetros colorimétricos, realizou-se a Análise de Componentes Principais (PCA) com o pacote FactoMineR (KASSAMBARA; MUNDT, 2017; LÊ; JOSSE; HUSSON, 2008), e os principais resultados foram extraídos por meio do pacote FactoInvestigate (THULEAU; HUSSON, 2023). Os dados da análise de PCA foram padronizados para média zero e desvio padrão. O número de componentes principais foi decidido considerando a porcentagem cumulativa da variância explicada e o número de autovalor superior a 1. Os autovalores representam a quantidade de variação em cada PC. Além disso, foram avaliadas as cargas e calculada a contribuição de cada parâmetro para o componente principal (expressa em porcentagem), e construído um biplot para verificar a relação das amostras de PCA e a contribuição de cada variável para o componente principal. As curvas de refletância para o espectro visível foram traçadas utilizando o pacote de software ggplot2 (WICKHAM, 2016).

4.5.2 Espectroscopia no infravermelho próximo

Para testar o reconhecimento dos espectros NIR da madeira das espécies, foram utilizadas três técnicas de aprendizado de máquina: (a) *Support Vector Machine* (SVM); (b) *Partial Least Squares – Discriminant Analysis* (PLS-DA); e (c) *k-nearest neighbors* (*k*-NN). As referidas análises foram feitas com a linguagem R. A seguir será abordado sobre cada uma das técnicas.

4.5.2.1 *Support Vector Machine* - SVM

O SVM é a aplicação de um algoritmo com uma abordagem flexível, utilizado para resolver problemas de classificação (KUHN; JOHNSON, 2013). De maneira geral o funcionamento do SVM, é selecionar um ou mais hiperplanos com alta dimensão em um espaço, garantindo assim, a escolha da melhor separação entre as classes (respostas esperadas). Para estimar limites, um SVM não linear utiliza a função de

kernel (por exemplo: polinomial, radial), com o objetivo de ampliar os limites entre hiperplanos (AHMAD *et al.*, 2018). Para este estudo, a função de kernel radial serviu de base para o SVM, onde a implementação está disponível na biblioteca 'kernlab' (KARATZOGLOU *et al.*, 2004). A versão do algoritmo utilizada apresenta dois hiperparâmetros de ajuste: C (custo de violação de restrição) e sigma (parâmetro do kernel de base radial).

4.5.2.2 *Partial Least Squares – Discriminant Analysis - PLS-DA*

A PLS-DA é uma análise baseada no modelo clássico de regressão da soma dos quadrados parciais (PLS) (WOLD; SJÖSTRÖM; ERIKSSON, 2001; SANTANA *et al.*, 2020), onde na aprendizagem é aplicado em modelos preditivos, que é uma generalização da Regressão Linear Múltipla (MLR) (WOLD; SJÖSTRÖM; ERIKSSON, 2001). A técnica do PLS é relevante, pois funciona bem com poucos preditores e relativamente poucas amostras, além de ser robusta à presença de variáveis fortemente colineares e ruído (WOLD; SJÖSTRÖM; ERIKSSON, 2001; MEVIK; WEHRENS; LILAND, 2020). Em situações de classificação, a abordagem assemelha-se à empregada pelo PLS clássico, contudo, a variável de resposta desejada é uma categoria (SANTANA *et al.*, 2020). Para implementação da PLS-DA neste estudo, utilizou-se o algoritmo 'pls' no pacote CARET (KUHN *et al.*, 2016) que faz interface com o pacote de igual denominação (MEVIK; WEHRENS; LILAND, 2020). Neste contexto, uma matriz de variáveis fictícias foi gerada, com uma coluna para cada classe. Para a função `plsr()` do pacote 'pls' utilizou-se a matriz de resposta (KUHN, 2008). A função `softmax` faz a transformação da previsão dos modelos em “valores semelhantes à probabilidade”, e a classe com maior valor é a prevista. A versão do algoritmo utilizada possui um hiperparâmetro de ajuste, que representa o número de componentes principais (*ncomp*).

4.5.2.3 *k-Nearest Neighbors - k-NN*

O *k-NN* é um método não paramétrico de aprendizagem supervisionada, comumente aplicado à análise de regressão e classificação (SONG *et al.*, 2017; HECHENBICHLER; SCHLIEP, 2023). Este método faz parte das 10 principais formas de mineralização de dados (WU *et al.*, 2008). Ao empregar o método *k-NN*, faz-se

necessário alguns elementos: conjunto de dados rotulados, uma métrica de similaridade ou distância para avaliar a proximidade entre os objetos, o valor de k (número de vizinhos mais próximos), e um método para ponderar os vizinhos, conferindo maior peso para os mais próximos da distância prevista (MCROBERTS; NÆSSET; GOBAKKEN, 2015; LI; QIU; LIU, 2017). No presente estudo, implementou-se a aplicação do algoritmo 'knn' do pacote CARET (Treinamento de Classificação e Regressão) (KUHNS *et al.*, 2016). A versão do algoritmo utilizada possui um hiperparâmetro de ajuste, onde o número de vizinhos mais próximos é o k. Para o cálculo da distância entre a observação e o peso uniforme que é atribuído aos vizinhos mais próximos, foi utilizado o padrão da métrica euclidiana.

4.5.2.4 Experimentos, validação cruzada e métricas de avaliação

Os modelos preditivos foram construídos com espectros de infravermelho próximo, baseado na suposição de que espectros de diferentes posições do fuste da árvore podem produzir padrões para a discriminação de espécies.

O método de validação cruzada k-fold (validação cruzada 2 vezes, repetido 25 vezes) com base na estratificação das classes de espécie e bloqueio da posição de coleta da bagueta foi usado para estimar o desempenho dos classificadores. Dessa forma, avaliou-se 50 partições de validação de cada modelo de aprendizado preditivo. Para criar as divisões de validação cruzada, empregou-se a função `cvo_create_folds()` do pacote manyROC (GEGZNA, 2020). Nesse processo, o vetor correspondente à variável de resposta (espécie) foi selecionado como fator de estratificação, enquanto a coluna de posição da bagueta (amostras de madeira maciça) foi utilizada como fator de bloqueio. Portanto, o procedimento foi adotado com o intuito de assegurar que os dados da mesma bagueta de uma espécie, estivessem exclusivamente presentes no conjunto de treinamento ou validação. Assim, garantindo que os resultados nas estimativas de desempenho dos modelos fossem mais realistas.

Para o aprendizado dos modelos preditivos, utilizou-se um framework disponível em linguagem R para classificação e análise de regressão, a interface do pacote CARET (KUHNS *et al.*, 2016). Na etapa de pré-processamento, os preditores foram centralizados e escalados. Em cada algoritmo de aprendizado de máquina, foi estabelecida uma grade de hiperparâmetros. Assim, a estratégia utilizada de pesquisa em grade foi adotada para identificar hiperparâmetros de ajuste ideais. No quadro 2

são apresentadas as variantes dos hiperparâmetros para cada algoritmo de aprendizado de máquina.

QUADRO 2 - VARIANTES DE HIPERPARÂMETROS AVALIADAS PARA CADA ALGORITMO DE APRENDIZADO DE MÁQUINA E PACOTES USADOS.

Algoritmo	Variantes de Hiperparâmetros	Método/Pacote	Autores
Support Vector Machine (SVM)	C = 2 ^c (-2,0,2,4,6,7,8,9,10,11,12) Sigma = c(0,005, 0,01, 0,02, 0,03, 0,05)	svmRadial/kernlab	Karatzoglou <i>et al.</i> (2004)
Partial Least Squares -Discriminant Analysis	ncomp = seq(1:30)	pls/pls	Mevik ; Wehrens ; Liland (2020)
k-Nearest Neighbor	k = seq(2, 25, 1)	knn/caret	Kuhn <i>et al.</i> (2016)

FONTE: O autor (2023).

LEGENDA: SVM = Support Vector Machine; PLS-DA = Partial Least Squares Discriminant Analysis; k-NN = k-Nearest Neighbor; C = custo de violação de restrições; *sigma* = parâmetro kernel de base radial; k = número de vizinhos mais próximos; ncomp = número de componentes principais.

A seleção dos modelos foi por validação cruzada, avaliados aplicando-se a exatidão das métricas (Eq. 4), recall (Eq. 5) e pontuação F1 (Eq. 6). O modelo selecionado para a taxa de reconhecimento das espécies foi o de maior acurácia.

$$Acurácia = \frac{TP + TN}{TP + FP + TN + FN} \quad (4)$$

$$Recall = \frac{TP}{TP + FN} \quad (5)$$

$$F1 - score = (1 + \beta^2) \frac{Precisão \cdot Recall}{((\beta^2 \cdot Precisão) + Recall)} \quad (6)$$

Onde: Verdadeiro positivo (TP) = número de amostras classificadas corretamente na classe Ci;

Verdadeiro negativo (TN) = número de amostras corretamente classificadas como não pertencentes à classe Ci;

Falso positivo (FP) = número de amostras classificadas incorretamente na classe Ci;

Falso negativo (FN) = número de amostras classificadas incorretamente como não pertencentes à classe Ci.

4.5.3 Densidade básica e a relação com os parâmetros colorimétricos

Os dados de densidade básica da madeira foram submetidos a ANOVA (Fator único) sob o Delineamento Inteiramente Casualizados (DIC). As pressuposições da ANOVA ($\alpha = 0,05$) foram avaliadas por meio dos testes de hipóteses de Shapiro-Wilk (normalidade), Bartlett (homocedasticidade) e Durbin-Watson (independência) ($\alpha = 0,05$) que reportaram a não rejeição das hipóteses de nulidades dos testes. Após atestar significância do teste F da ANOVA, foi realizado o teste de comparações múltiplas de Tukey ($\alpha = 0,05$) para comparação das médias de densidade básica da madeira entre espécies. A análise foi realizada usando o pacote “ggstatsplot” (PATIL, 2021) disponível na linguagem R (versão 3.4.3).

Foi realizado a análise de correlação de Pearson ($\alpha = 0,05$), objetivando determinar a existência da relação linear entre a densidade básica da madeira e os parâmetros colorimétricos (L^* , a^* , b^* , C^* e h). Uma abordagem gráfica disponível no pacote "GGally" (SCHLOERKE *et al.*, 2021) foi usada para visualizar a dispersão, o polígono de frequência e o grau e a significância (teste t-Student; $\alpha = 0,05$, com o método de ajuste de Holm) da correlação linear entre pares de variáveis.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

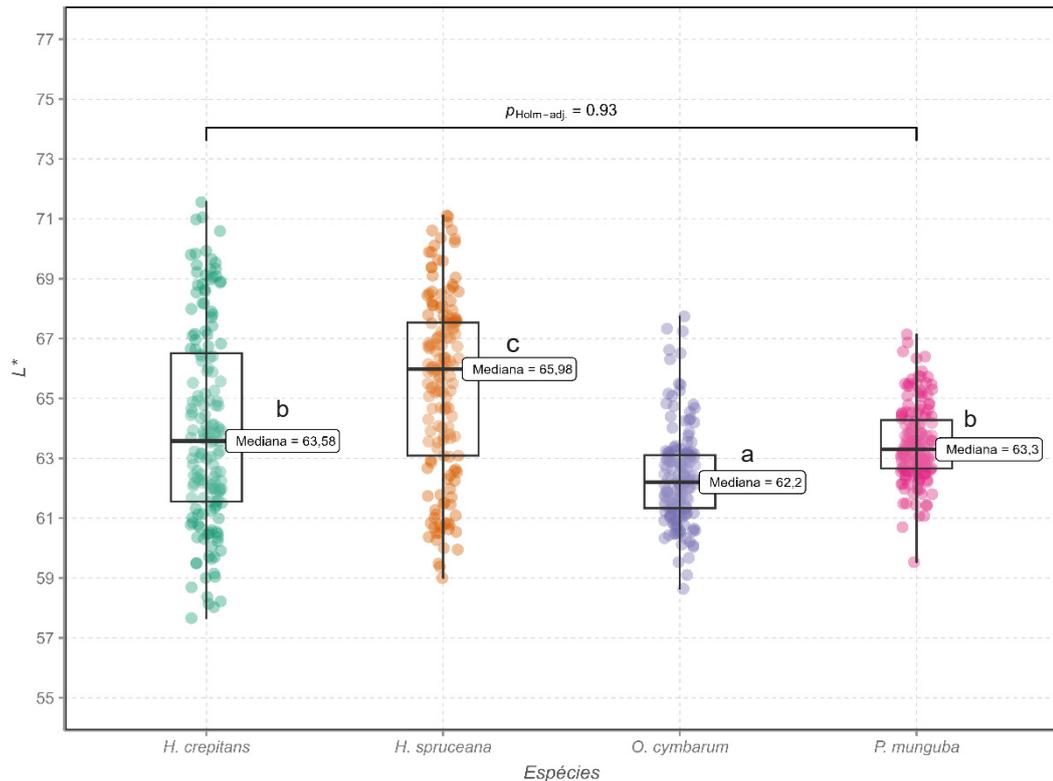
5.1 COLORIMETRIA - ESPECTROSCOPIA NO VISÍVEL

A cor das espécies obtida pela classificação aproximada de acordo com Camargos e Gonzalez (2001), indicou que todas as madeiras apresentaram uma tendência para a tonalidade cinza-rosado.

As medianas, com a significância estatística por meio do teste de Kruskal - Wallis ($\alpha = 0,05$), e os desvios padrões dos parâmetros colorimétricos (L^* , a^* , b^* , C^* , h) para cada espécie na seção anatômica transversal da madeira, estão apresentadas nas Figuras 3 a 7. Em muitos casos, as espécies exibiram diferenças significativas entre as medianas dos parâmetros colorimétricos.

Em relação à coordenada cromática L^* , que representa a luminosidade ou claridade, a qual varia de zero (preto) a 100 (branco), a espécie *H. spruceana* (seringa barriguda) apresentou mediana significativamente maior (Figura 3). As espécies *H. crepitans* (Assacú) e *P. munguba* (munguba) não se diferiram estatisticamente pelas medianas no pós-teste de comparação múltipla de Dunn ($\alpha = 0,05$). Enquanto que a madeira da espécie *O. cymbarum* (louro-inamuí) obteve menor valor de mediana para o parâmetro L^* . Valores superiores a 60 também foram observados em duas espécies do mesmo gênero botânico em estudos de Santos *et al.* (2021b).

FIGURA 3 - COMPARAÇÃO ENTRE AS MEDIANAS DO PARÂMETRO COLORIMÉTRICO L* DAS QUATRO ESPÉCIES ANALISADAS.



FONTE: O autor (2023).

LEGENDA: A barra horizontal no topo dos dados ligando dois grupos e as letras iguais, indicam que as espécies não foram diferentes significativamente para o parâmetro avaliado no teste de Kruskal-Wallis, seguido do teste de comparação múltiplo de Dunn ($\alpha = 0,05$) na seção anatômica transversal.

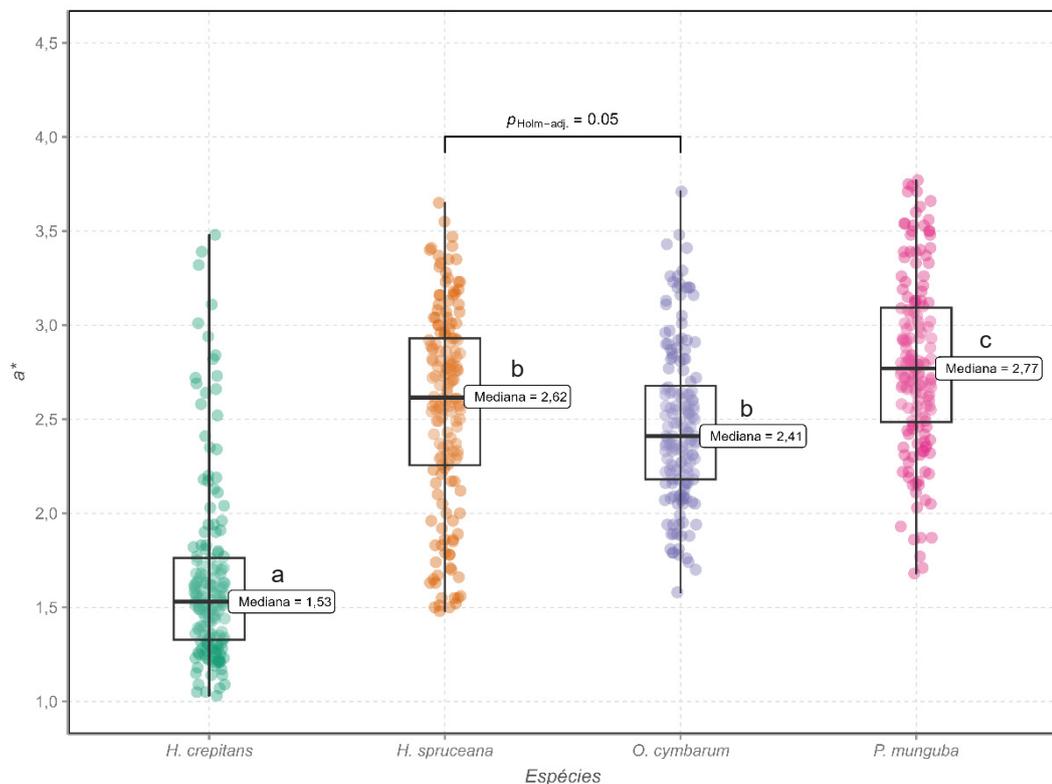
Os resultados da mediana para o parâmetro L* variaram de 62,20 a 65,98 (Figura 3). Camargos e Gonzalez (2001), baseados no parâmetro L*, sugeriram a classificação de madeiras em duas categorias quanto à luminosidade: 1) espécies de madeiras escuras: possuem luminosidade menor ou igual a 56 ($L^* \leq 56$); 2) espécies de madeiras claras: apresentam luminosidade maior do que 56 ($L^* > 56$). Neste estudo, portanto, todas as espécies apresentaram valores acima de 56, assim é possível enquadrá-las no grupo de madeiras claras (Figura 2).

O parâmetro L* pode ser influenciado pela composição química das células. Santos *et al.* (2021b), analisando a anatomia da madeira e os parâmetros colorimétricos das espécies *Euplassa* sp. e *Roupala* sp., observaram a similaridade entre quase todas as características anatômicas, somente diferindo no número de células na faixa do parênquima axial, contribuindo para a diferença no parâmetro L*. As células parenquimáticas são especializadas no armazenamento de substâncias e

podem conter uma variedade de extrativos (SANTOS *et al.* 2021a). Isso pode justificar a diferença e a similaridade verificada nas espécies do estudo (Figura 3).

Em relação à coordenada cromática a^* , *P. munguba* apresentou a mediana significativamente maior (Figura 4). Em geral, a menor mediana do parâmetro a^* , foi encontrada para a espécie *H. crepitans*. Além disso, verificou-se que as espécies *H. spruceana* e *O. cymbarum* margearam a significância do teste, mas ainda assim resultaram na não diferença estatística pelas medianas no pós-teste de comparação múltipla de Dunn ($\alpha = 0,05$) (Figura 4).

FIGURA 4 - COMPARAÇÃO ENTRE AS MEDIANAS DO PARÂMETRO COLORIMÉTRICO a^* DAS QUATRO ESPÉCIES ANALISADAS.



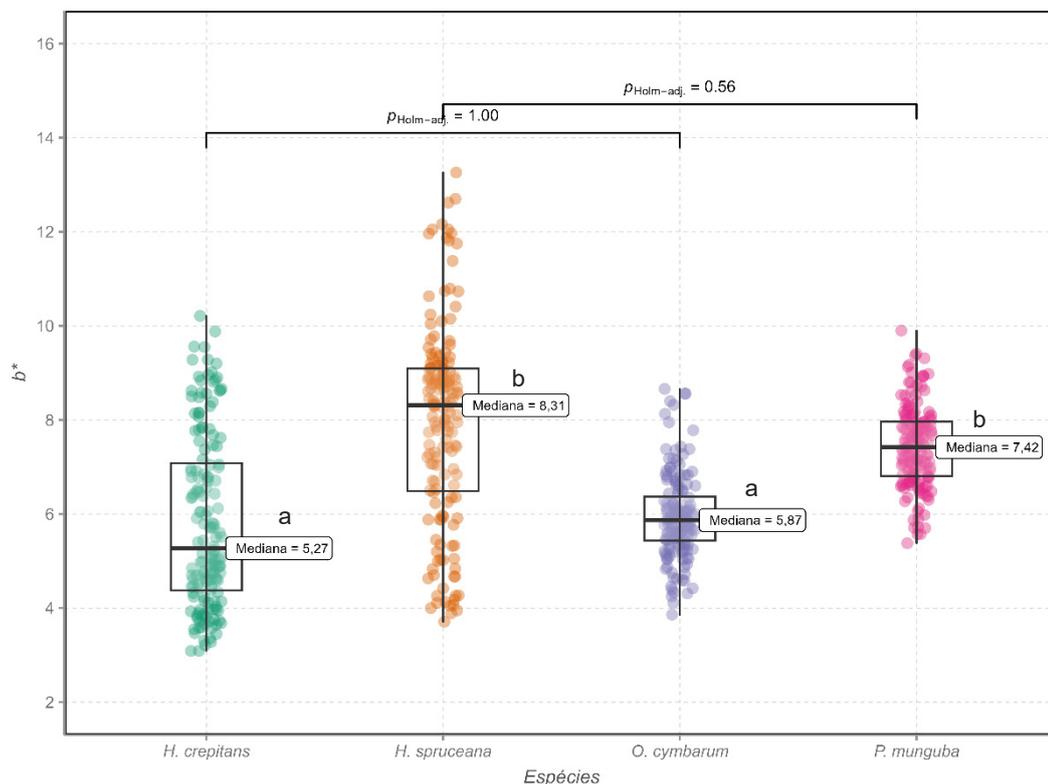
FONTE: O autor (2023).

LEGENDA: A barra horizontal no topo dos dados ligando dois grupos e as letras iguais, indicam que as espécies não foram diferentes significativamente para o parâmetro avaliado no teste de Kruskal-Wallis, seguido do teste de comparação múltiplo de Dunn ($\alpha = 0,05$) na seção anatômica transversal.

De acordo com a *Comission Internationale de L'Eclairage* (2004), a coordenada cromática a^* pode variar de 0 a 60. Os valores observados para as espécies estudadas variaram de 1,53 a 2,77, sendo considerados baixos. Melo et al. (2019) afirmaram que a combinação de valores elevados de L^* e baixos valores de a^* podem indicar um baixo percentual de extrativos presentes na madeira.

Em se tratando do parâmetro colorimétrico b^* , as espécies *H. spruceana* e *P. munguba* apresentaram semelhança e medianas superiores em relação às demais espécies (Figura 5). Além disso, foi possível observar a similaridade no parâmetro b^* entre as espécies *H. crepitans* e *O. cybarum* (Figura 5). Segundo Camargos e Gonzalez (2001), resultados da coordenada cromática de b^* positivos indicam que as madeiras analisadas tendem a ser mais amareladas. Os tons amarelados da madeira em grande maioria são decorrentes da fotoquímica da madeira, principalmente na lignina (SANDOVAL-TORRES et al., 2010). A similaridade do parâmetro entre as espécies pode ser em decorrência da semelhança do arranjo celular, dimensão dos vasos e tamanho dos raios (SOUSA et al., 2020).

FIGURA 5 - COMPARAÇÃO ENTRE AS MEDIANAS DO PARÂMETRO COLORIMÉTRICO b^* DAS QUATRO ESPÉCIES ANALISADAS.



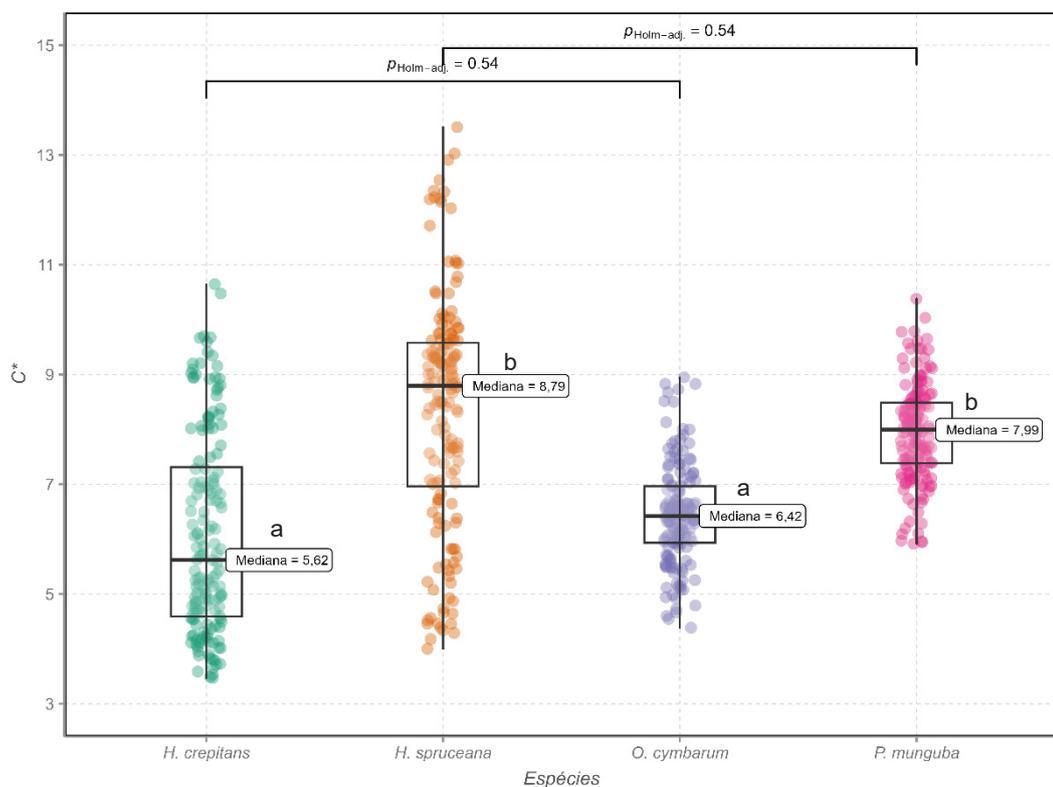
FONTE: O autor (2023).

LEGENDA: A barra horizontal no topo dos dados ligando dois grupos e as letras iguais, indicam que as espécies não foram diferentes significativamente para o parâmetro avaliado no teste de Kruskal-Wallis, seguido do teste de comparação múltiplo de Dunn ($\alpha = 0,05$) na seção anatômica transversal.

Em relação ao parâmetro C^* , as espécies *H. spruceana* e *P. munguba* apresentaram similaridade e medianas superiores em relação às demais espécies (Figura 6). Para as espécies *H. crepitans* e *O. cybarum* também foi possível observar

a similaridade no parâmetro C^* (Figura 6). Além do parâmetro b^* , a saturação (C^*) tem ótima relação com a cor amarela da madeira, podendo ser confirmada a relação entre os maiores valores do parâmetro C^* e os valores positivos do parâmetro b^* , e a diferença no tom devido ao parâmetro h (CAMARGOS; GONÇALEZ, 2001). Os baixos valores das coordenadas de cor a^* e b^* resultam no baixo valor de C^* (SOUSA *et al.*, 2020).

FIGURA 6 - COMPARAÇÃO ENTRE AS MEDIANAS DO PARÂMETRO COLORIMÉTRICO C^* DAS QUATRO ESPÉCIES ANALISADAS.



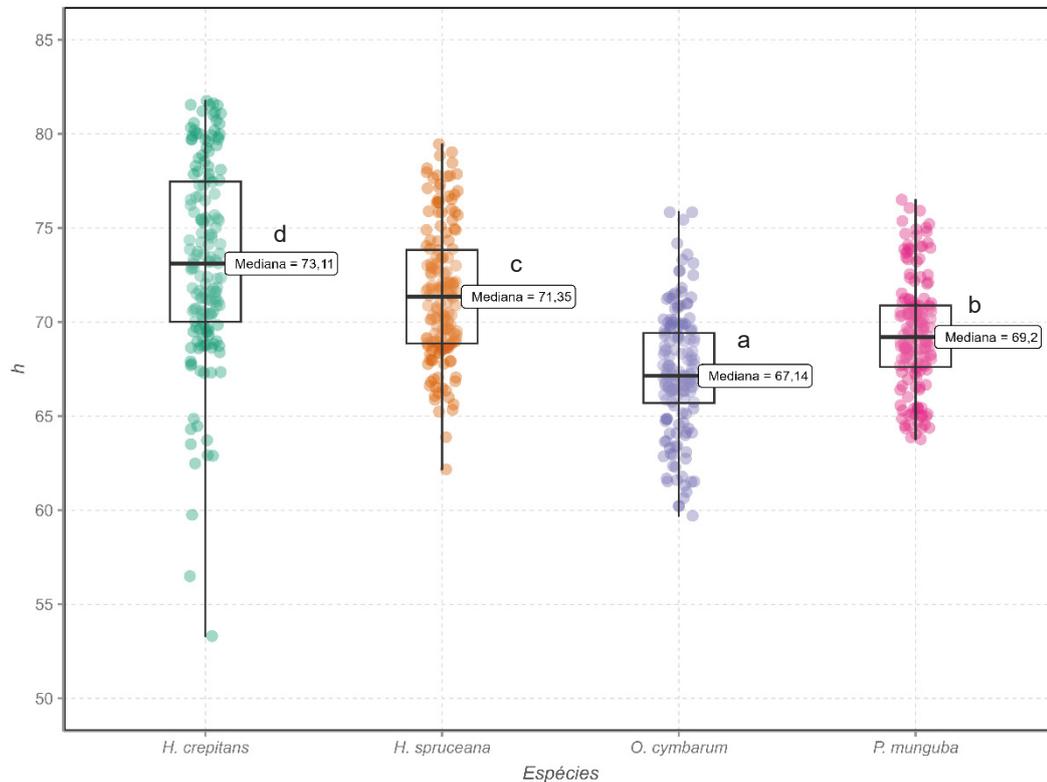
FONTE: O autor (2023).

LEGENDA: A barra horizontal no topo dos dados ligando dois grupos e as letras iguais, indicam que as espécies não foram diferentes significativamente para o parâmetro avaliado no teste de Kruskal-Wallis, seguido do teste de comparação múltiplo de Dunn ($\alpha = 0,05$) na seção anatômica transversal.

No que se refere ao ângulo de tinta h , a espécie *H. crepitans* apresentou valor de mediana maior. Verificou-se que todas as espécies foram estatisticamente diferentes para o ângulo de tinta (h) (Figura 7). Além disso, a espécie *O. cymbarum* apresentou mediana significativamente menor que as demais espécies (Figura 7). De acordo com Camargos e Gonzalez (2001), o ângulo da tinta é significativo da discriminação quando as madeiras apresentam luminosidade acima de 56, já para

madeiras de baixa luminosidade ($L \leq 56$), a variação no ângulo de tinta pode não ser significativo.

FIGURA 7 - COMPARAÇÃO ENTRE AS MEDIANAS DO PARÂMETRO COLORIMÉTRICO h DAS QUATRO ESPÉCIES ANALISADAS.



FONTE: O autor (2023).

LEGENDA: Ausência da barra horizontal no topo dos dados ligando dois grupos e as letras diferentes, indicam que as espécies foram diferentes significativamente para o parâmetro avaliado no teste de Kruskal-Wallis, seguido do teste de comparação múltiplo de Dunn ($\alpha = 0,05$) na seção anatômica transversal.

Em geral, os parâmetros colorimétricos mostraram potencial para discriminar diferentes espécies. A melhor diferenciação de algumas espécies foi alcançada para diferentes parâmetros colorimétricos na seção anatômica transversal da madeira. Destaca-se que o parâmetro h foi o que apresentou melhor contribuição para a discriminação das quatro espécies avaliadas.

As diferenças de tonalidades nas amostras de madeiras são naturais. Isto porque a cor da madeira é sensível a diversos fatores, como degradação natural, tratamento térmico (TORRES; JOMA; PUIGGALI, 2012; CADEMARTORI *et al.*, 2013), a idade da árvore, composição química, local de coleta e fatores genéticos (SILVA *et al.*, 2017; ARCE; MOYA, 2015; SOTELO-MONTES *et al.*, 2013; GONÇALEZ *et al.*, 2014), a densidade da madeira (SOUSA *et al.*, 2020) e também características de

cada seção anatômica (NISHINO *et al.*, 2000). Silva *et al.* (2017) relataram diferenças entre a colorimetria das madeiras de trinta espécies tropicais. Sousa *et al.* (2020) realizaram uma pesquisa visando subsidiar a fiscalização da comercialização da madeira utilizando a colorimetria e descreveram diferenças entre os resultados das espécies analisadas.

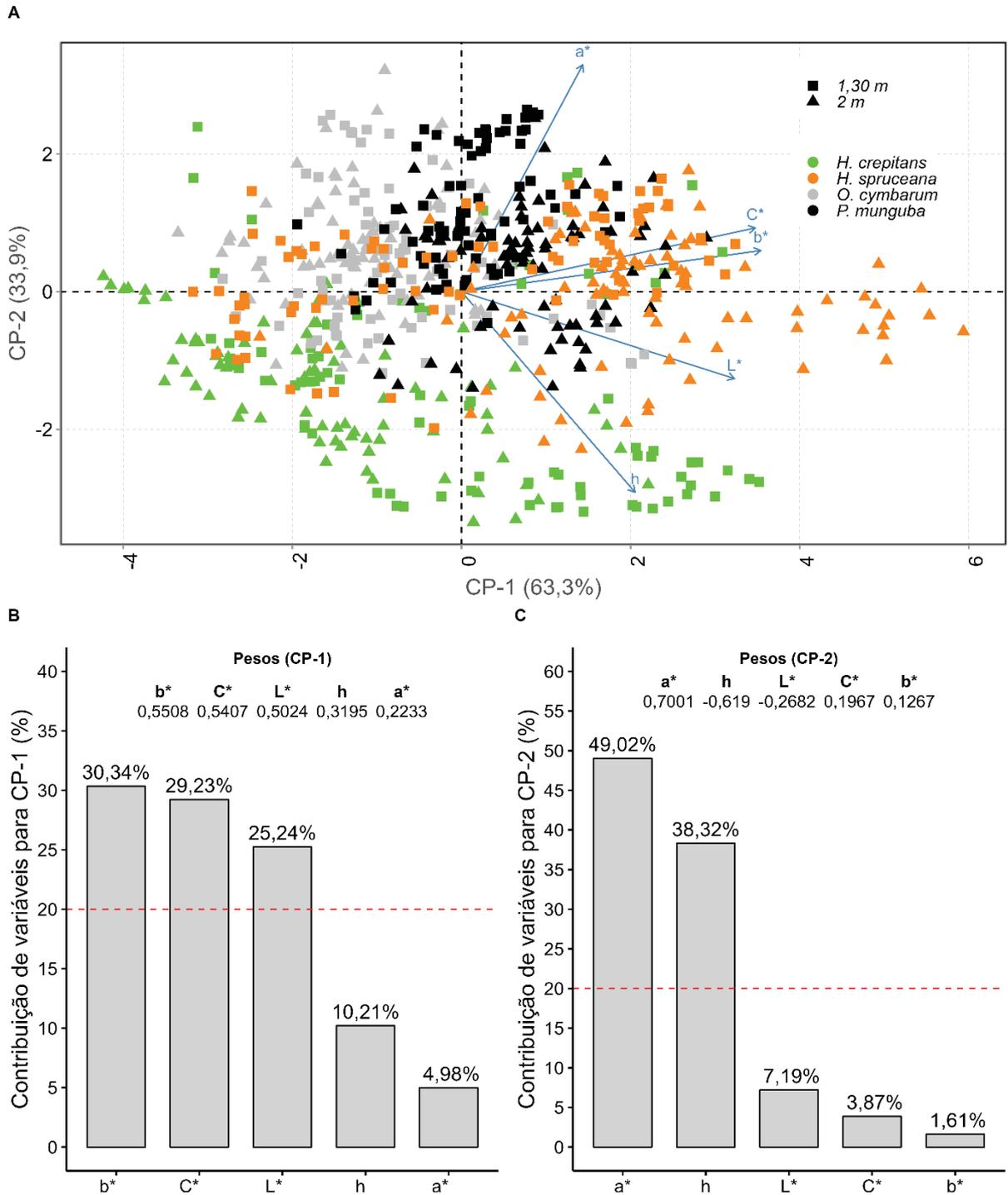
A Análise de Componentes Principais (PCA) foi realizada usando dados dos parâmetros colorimétricos, visando avaliar a existência de padrões de separação das espécies (Figura 8). O número de componentes a reter foi dois, pois apresentaram autovalores (λ_i) maiores do que 1. A variância total explicada pelos dois primeiros componentes principais foi de 97,2%, com 63,3% e 33,9% para PC-1 e PC-2, respectivamente (Figura 8A). Portanto, é confiável usar as duas primeiras componentes principais para realização de inferências sobre padrões aparentes, sendo as demais dimensões menos informativas.

Por meio do gráfico biplot (Figura 8A) é possível inferir sobre a contribuição dos parâmetros colorimétricos na tendência de aproximação ou separação entre as madeiras das espécies. Em geral, as amostras de madeiras de uma mesma espécie mostraram maior tendência de aproximação. Esta maior proximidade pode estar relacionada com alterações naturais resultantes do processo de crescimento das árvores entre outros fatores bióticos e abióticos.

Levando em consideração o gráfico biplot para as diferentes posições no fuste das árvores (Figura 8A), observa-se que há diferença nas amostras entre as espécies, além disso, a variável posição apresenta diferença para a mesma espécie. Ou seja, a posição altera a tendência das espécies nos parâmetros colorimétricos.

Na PCA, a magnitude dos pesos informa sobre a contribuição de cada parâmetro na construção dos componentes principais, e o sinal indica se estão diretas ou inversamente correlacionados (Figuras 8B e 8C). O parâmetro b^* mostrou maior contribuição na variância explicada pela PC-1, enquanto a coordenada a^* apresentou maior peso na PC-2. Somente o ângulo de tinta (h) e a luminosidade L^* foram inversamente correlacionadas com a PC-2.

FIGURA 8 - GRÁFICO DE ESCORES DA ANÁLISE DE COMPONENTES PRINCIPAIS USANDO OS PARÂMETROS COLORIMÉTRICOS DAS QUATRO ESPÉCIES AVALIADAS.

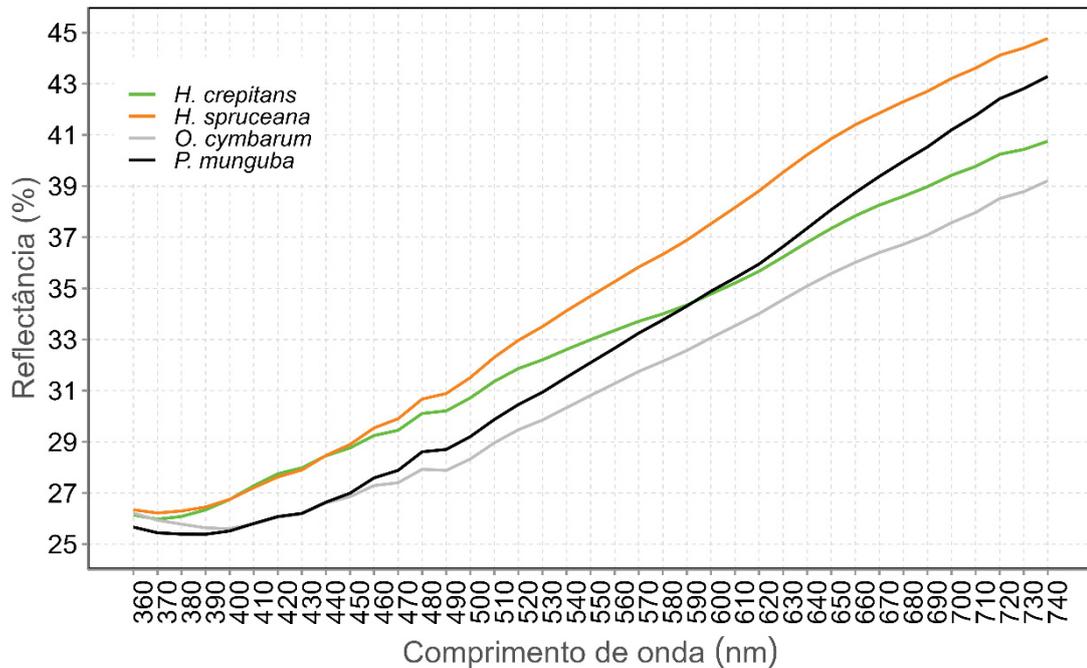


FONTE: O autor (2023).

Na Figura 9, estão os espectros médios na região do visível das quatro espécies amazônicas de várzea. Em geral, as espécies mostraram comportamento espectral semelhante, com valores de reflectância mais próximos para as espécies *H.*

crepitans e *H. spruceana*, *O. cymbarum* e *P. munguba*, sobretudo, na faixa de comprimento de onda de 360 nm a 500 nm.

FIGURA 9 - ESPECTROS MÉDIOS NA REGIÃO DO VISÍVEL PARA AS QUATRO ESPÉCIES AVALIADAS.



FONTE: O autor (2023).

5.2 ESPECTROSCOPIA NO INFRAVERMELHO PRÓXIMO

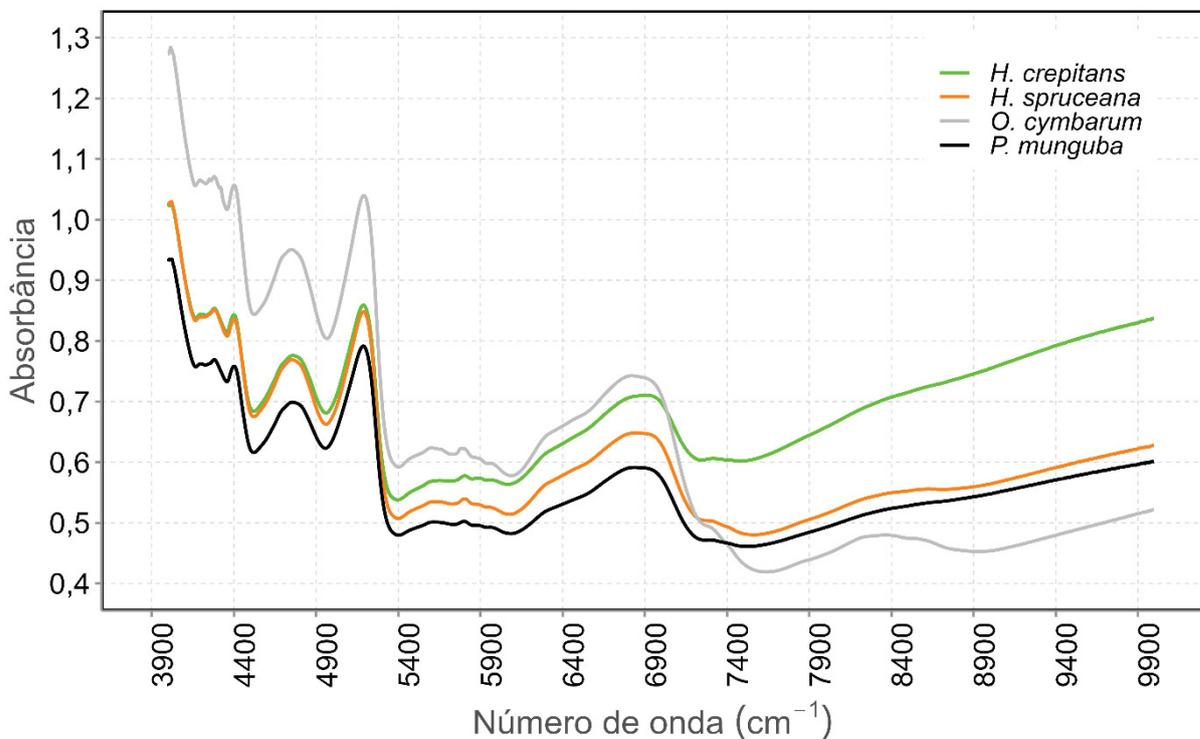
Os espectros médios do NIR para as quatro espécies de várzea amazônica, na faixa espectral entre 4.000 cm^{-1} a 10.000 cm^{-1} (Figura 10), exibiram comportamento similar, porém com intensidade de absorbâncias diferenciadas. Em geral, da faixa espectral inicial até a faixa de 7.400 cm^{-1} , constatou-se menores valores de absorbância para a espécie *P. munguba*, após essa faixa espectral a espécie *O. cymbarum* apresentou menor valor de absorbância (Figura 10).

Ao longo de toda a faixa espectral as espécies *H. spruceana* e *P. munguba* apresentaram similaridade no valor de absorbância. Na faixa de 7.400 cm^{-1} a 9.900 cm^{-1} , foi observada uma tendência de afastamento da curva da espécie *H. crepitans* em relação as demais, devido ao maior aumento da intensidade de absorbância (Figura 10). A absorbância das espécies está relacionada com a predominância de componentes constituintes da madeira (celulose, hemicelulose, lignina e extrativos)

nos diferentes comprimentos de onda (SCHWANNINGER; RODRIGUES; FACKLER, 2011).

Ao estudar espécies nativas da Amazônia, Soares *et al.* (2017) observaram grandes semelhanças entre os espectros das amostras, sugerindo a necessidade do uso de técnicas quimiométricas para melhor distinguir as espécies. Santos *et al.* (2021b), também verificaram semelhança nos espectros do NIR de espécies da Amazônia pertencentes a seis gêneros diferentes, porém a diferença foi verificada na intensidade de absorbância.

FIGURA 10 - ESPECTROS MÉDIOS NIR DE MADEIRAS DAS QUATRO ESPÉCIES AVALIADAS.



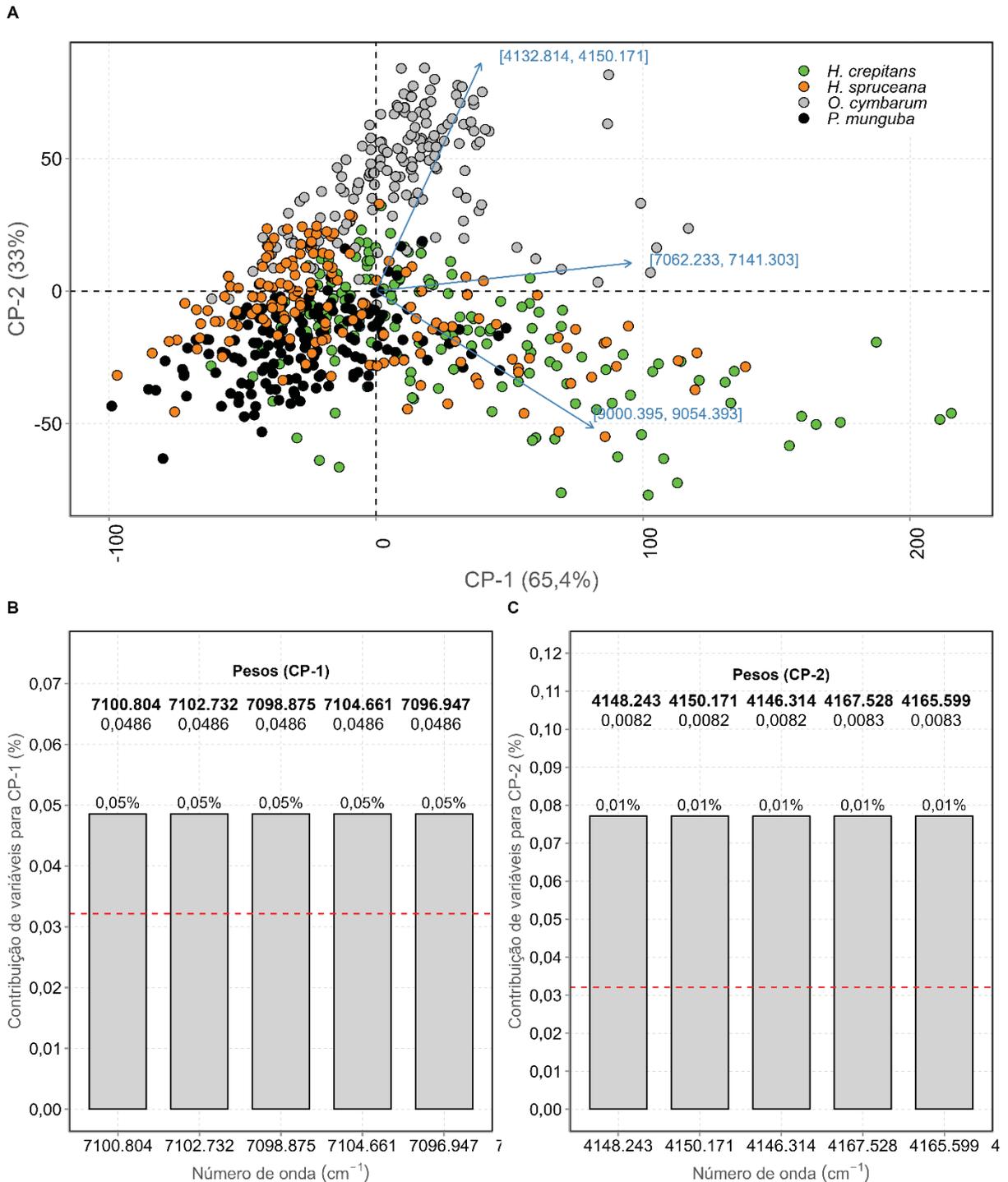
FONTE: O autor (2023).

Entre as faixas de comprimento de onda de 5400 a 5900 cm^{-1} todas as espécies apresentaram picos de absorbância (Figura 10). Comportamento semelhante foi verificado em amostras de madeira de *Mezilaurus* sp. e *Nectandra* sp. ocorrente na floresta amazônica (SANTOS *et al.*, 2021c). Esta região está associada a componentes da parede celular, grande parte celulose, além de lignina e hemicelulose (SCHWANNINGER; RODRIGUES; FACKLER, 2011).

A PCA realizada usando dados de espectros NIR de amostras das madeiras avaliadas, indicou que os dois primeiros componentes principais explicaram cerca de

98,4% da variância total dos dados originais, com 65,4% e 33% para PC-1 e PC-2, respectivamente. Além disso, estes componentes mostraram autovalores (λ_i) maiores do que 1, sendo confiável a realização de inferências a partir destes componentes (Figura 11).

FIGURA 11 - ANÁLISE DE COMPONENTES PRINCIPAIS RESULTANTE DA UTILIZAÇÃO DOS ESPECTROS NIR ORIGINAIS MÉDIOS DAS QUATRO ESPÉCIES AVALIADAS.



FONTE: O autor (2023).

Por meio do gráfico biplot (Figura 11A) foi possível identificar maior tendência de aproximação entre as amostras de madeiras de uma mesma espécie. Contudo, nota-se que a espécie *O. cymbarum* apresentou maior tendência de aproximação. As amostras de *O. cymbarum* foram caracterizadas por possuir altos valores na faixa espectral de 4.132,814 cm^{-1} e de 4.150,171 cm^{-1} . Além disso, não foi possível encontrar uma clara separação entre as outras espécies, pois tenderam a uma separação, mas ainda permaneceram muito próximas. As espécies *H. spruceana* e *P. munguba* compartilham composição semelhantes e já a *H. crepitans* apresentou comportamento mais disperso. A maioria das amostras das espécies se concentraram no entorno da coordenada central (0,0) do biplot, sendo, portanto, uma região de confusão entre as espécies (Figura 11A).

Os dados de espectros NIR foram usados também na construção de modelos de reconhecimento de espécies ($n = 4$) usando técnicas de aprendizado de máquina. Os resultados mostram o desempenho (acurácia e F1-Score) na validação cruzada (validação cruzada 2 vezes, repetida 25 vezes) para a melhor classificação no experimento. O classificador construído a partir do algoritmo PLS-DA mostrou melhor desempenho preditivo, com acurácia e F1-Score superior a 98% na validação cruzada repetida (Tabela 2). O modelo k -NN mostrou desempenho inferior entre os classificadores, com acurácia de 57,14%.

TABELA 2 - DESEMPENHO DOS CLASSIFICADORES NA VALIDAÇÃO CRUZADA REPETIDA.

Estatística	2x25 Partições de Validação Cruzada									
	PLS-DA			SVM				k-NN		
	HT	Acurácia	F1-Score	HT	Acurácia	F1-Score	Recall	HT	Acurácia	F1-Score
Média		98,46	98,46	sigma	62,77	62,74	62,77		57,14	56,79
Desvio Padrão	ncomp = 29	0,55	0,55	=	2,79	2,55	2,79	k = 5	2,75	2,66
Mínimo		97,19	97,19	0,005	57,50	57,71	57,50		50,31	49,91
Máximo		99,38	99,38	C = 64	69,69	68,86	69,69		63,44	62,39

FONTE: O autor (2023).

LEGENDA: Todas as medidas são expressas como uma porcentagem. SVM = *Support Vector Machine*; PLS-DA = *Partial Least Squares Discriminant Analysis*; k -NN = *k-Nearest Neighbor*; HT = Hiperparâmetro de Ajuste Ótimo; C = custo de violação de restrições; σ = parâmetro kernel de base radial, k = número de vizinhos mais próximos; ncomp = número de componentes principais.

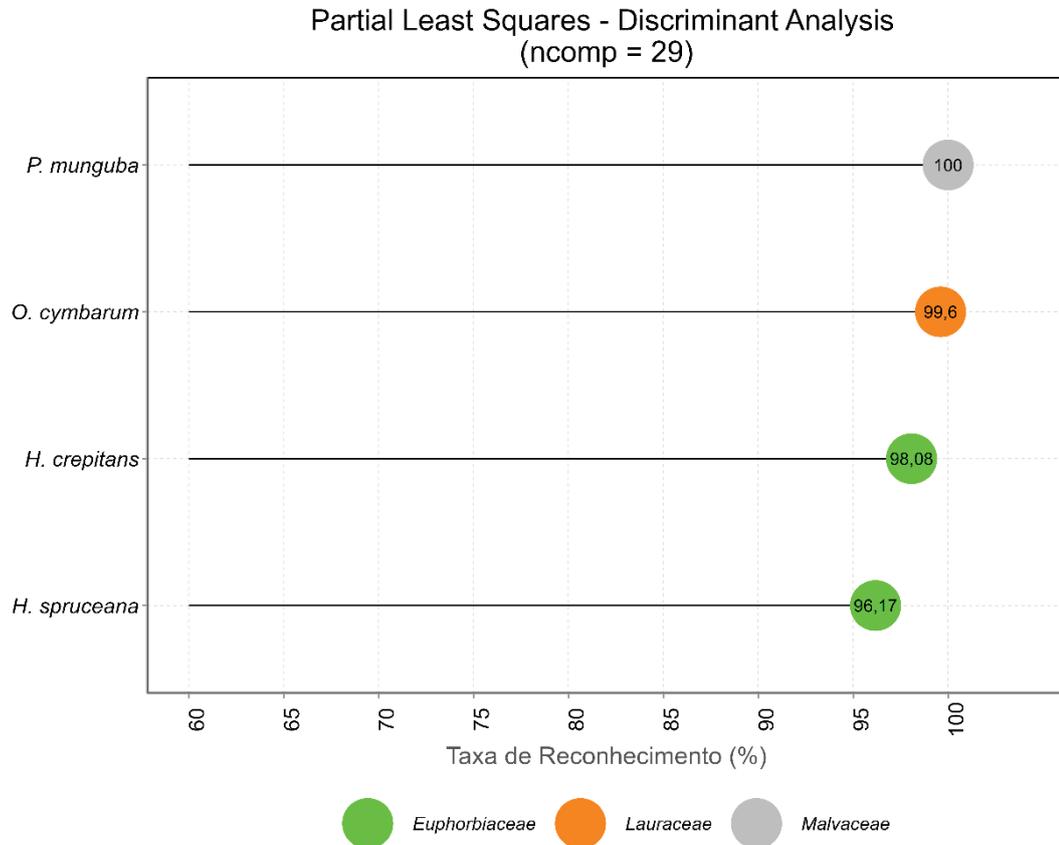
Outros estudos utilizaram os espectros do NIR aliado ao aprendizado de máquina e obtiveram resultados promissores para a discriminação de espécies tropicais. Pastore *et al.* (2011), obtiveram bons resultados usando espectros do NIR e

PLS-DA para distinguir quatro tipos de madeira que se confundem com mogno. Bergo *et al.* (2016), combinaram NIR e PLS-DA para diferenciar espécies de mogno, cedro e andiroba, usando amostras de pó e blocos sólidos, e verificaram taxa de classificação correta superior a 96% para amostras de mogno. Soares *et al.* (2017) obtiveram 90% de eficiência usando NIR portátil e PLS-DA para discriminação de seis espécies tropicais. Snell *et al.* (2018) avaliaram o potencial do NIR combinado com o PLS-DA em espécies de *Dalbergia* L.f. que estão na lista de espécies ameaçadas de extinção e encontraram eficiências superiores a 90%. Santos *et al.* (2021c) observaram que o PLS-DA foi mais adequado para discriminação de espécies do grupo “Louros” aplicando espectros NIR, com acurácia superior a 98%.

A taxa positiva verdadeira por espécie (recuperação média) nas amostras de validação para a classificação mais precisa de PLS-DA está apresentadas na Figura 12. O melhor desempenho no reconhecimento de espécies foi alcançado pelo classificador PLS-DA treinado usando apenas dados de espectros NIR das espécies, em que a *P. munguba* apresentou 100% de reconhecimento (Figura 12). Este resultado pode ser confirmado pelos espectros médios do NIR, onde visualmente nota-se um comportamento espectral distinto, principalmente em regiões de 7.200 a 9.900 cm^{-1} , que apresenta uma suavização de picos, tendendo a seguir em um movimento retilíneo (Figura 10).

De modo geral, todas as espécies avaliadas apresentaram uma ótima taxa de reconhecimento, superior a 96%. Alguns resultados de confusão entre as espécies *H. crepitans* e *H. spruceana* ocorreram e podem ser justificados por características anatômicas semelhantes como menor abundância de vasos e pouca ocorrência de parênquima axial (Figura 2) e por ambas serem da mesma família botânica (Euphorbiaceae).

FIGURA 12 - TAXA DE RECONHECIMENTO POR ESPÉCIE NA VALIDAÇÃO CRUZADA REPETIDA USANDO OS CLASSIFICADORES PLS-DA MAIS ACURADO.



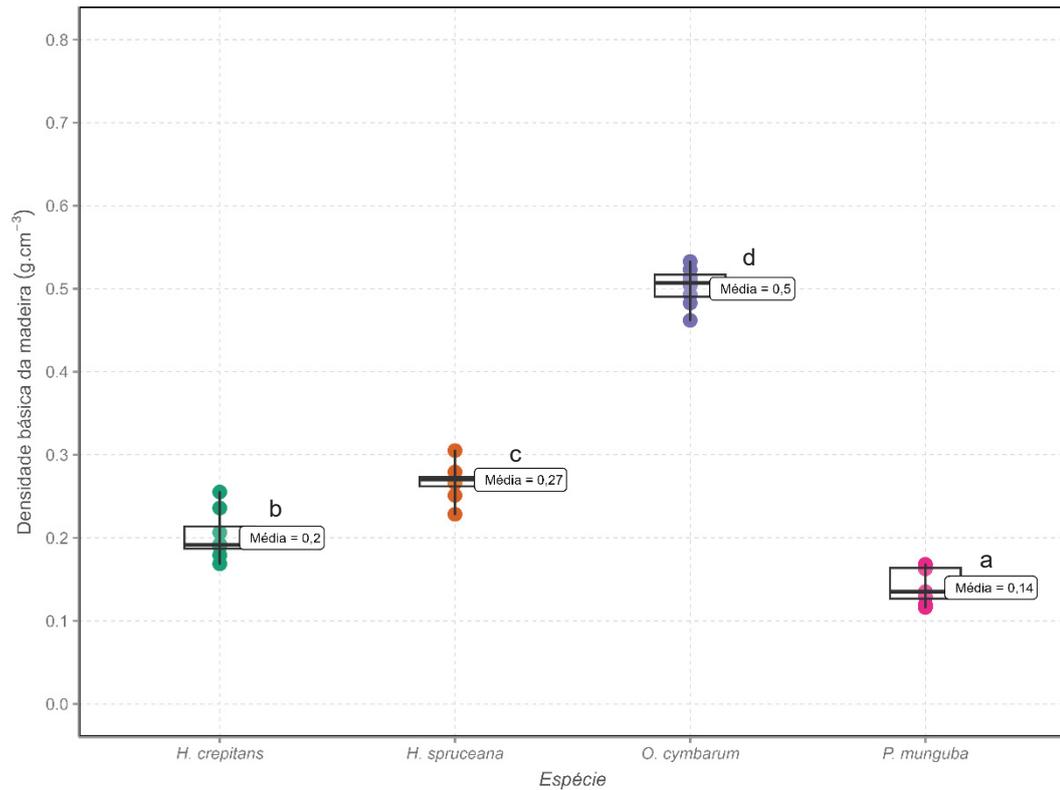
FONTE: O autor (2023).

LEGENDA: ncomp = número de componentes principais.

5.3 DENSIDADE BÁSICA (Db) E A RELAÇÃO COM OS PARÂMETROS COLORIMÉTRICOS

Os valores de Densidade básica das quatro espécies avaliadas variaram de 0,14 a 0,50 g.cm⁻³ (Figura 13), apresentando diferença significativa. Segundo Melo, Coradin e Mendes (1990), as madeiras podem ser classificadas de acordo com a Db como leve ($\leq 0,50$ g.cm⁻³), média ($> 0,50$ a 0,72 g.cm⁻³) e pesada ($> 0,72$ g.cm⁻³). Portanto, as espécies *H. crepitans*, *H. spruceana*, *O. cymbarum* e *P. munguba* podem ser classificadas como madeiras leves.

FIGURA 13 - COMPARAÇÃO ENTRE AS MÉDIAS DA DENSIDADE BÁSICA DA MADEIRA DE QUATRO ESPÉCIES.



FONTE: O autor (2023).

LEGENDA: Ausência da barra horizontal no topo dos dados ligando dois grupos e as letras diferentes, indicam diferença significativa entre as médias de densidade básica da madeira das espécies comparadas, pelo teste de comparações múltiplas de Tukey ($\alpha = 0,05$).

Estudos com a madeira de *H. crepitans* ocorrente em área de terra firme da floresta Amazônica verificaram valores de Db superiores a este estudo, variando de 0,33 a 0,39 g.cm⁻³ (JANKOWSKY, 1990; IBAMA, 1997). Essa diferença pode estar relacionada com o local de ocorrência da espécie, pois em locais com condições hídricas abundantes a Db das espécies são menores quando comparado com as de estação caracterizada por um longo período biologicamente seco (OLIVEIRA *et al.*, 2021). Para a espécie *O. cymbarum*, a Db determinada foi semelhante ao encontrado na literatura, que é g.cm⁻³ (LPF, 2023).

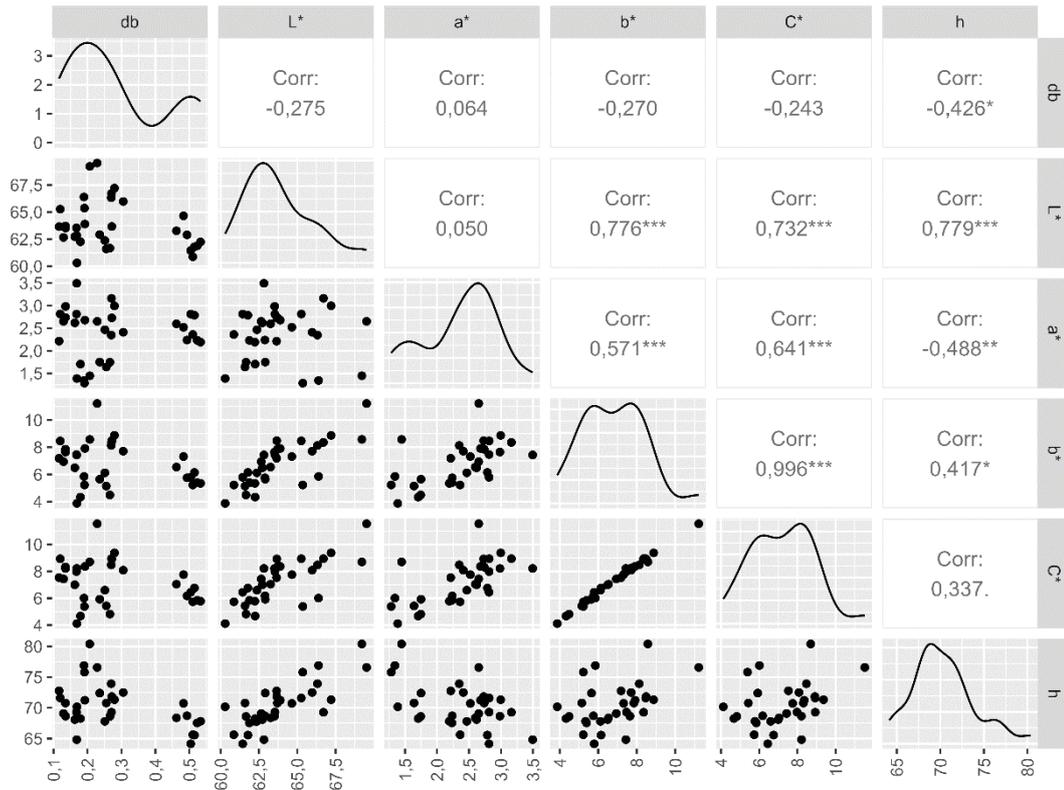
Em relação a Db da *H. spruceana* comparando com a Db da madeira de uma espécie pertencente ao mesmo gênero, de um povoamento na Malásia, observa-se que apresenta grande diferença, no qual a Db para *H. brasiliensis* é superior 0,50 g.cm⁻³ (NAJI *et al.*, 2014). Para a espécie *P. munguba* é comum espécies pertencentes ao gênero *Pseudobombax* Dugand apresentarem Db leve, como por exemplo a madeira de embiruçu (*Pseudobombax grandiflorum* (Cavanilles) A. Robyns) que possui Db variando de 0,26 a 0,39 g.cm⁻³ (CARVALHO, 2006), e a embiratanha

(*Pseudobombax marginatum* (A.St.-Hil., Juss. & Cambess.) A. Robyns) que apresenta D_b de $0,26 \text{ g.cm}^{-3}$ (DIÓGENES *et al.*, 2019).

A análise de correlação de Pearson ($\alpha = 0,05$) indicou não existir correlação linear significativa entre a densidade básica da madeira e os parâmetros colorimétricos (L^* , a^* , b^* e C^*). Observando a dispersão dos dados fica claro essa não correlação dos dados (Figura 14), somente o ângulo de tinta (h) apresentou significância de correlação negativa ($-0,426$), porém considerada fraca (Figura 14). Na pesquisa de Sousa *et al.* (2020) o parâmetro h também obteve melhor correlação com a densidade básica da madeira.

Madeiras mais densas tendem a ser mais escuras e apresentam mais pigmentação avermelhada ($+a^*$) (SOUSA *et al.*, 2020). Contudo para as madeiras claras essa relação pode não ocorrer, como pode-se observar na não significância das relações (Figura 14). Sousa *et al.* (2020), observaram a correlação não significativa entre a densidade básica da madeira e o parâmetro b^* para as espécies amazônicas avaliadas. A maior intensidade de correlação foi entre os parâmetros colorimétricos, em destaque as coordenadas cromáticas a^* e C^* ; e entre b^* e C^* (Figura 14), o que já era esperado, em virtude do parâmetro C^* ser calculado a partir do resultado de a^* e b^* .

FIGURA 14 - DISPERSÃO, POLÍGONO DE FREQUÊNCIA E CORRELAÇÃO DE PEARSON PARA A DENSIDADE BÁSICA E PARÂMETROS COLORIMÉTRICOS



FONTE: O autor (2023).

LEGENDA: A presença de * (asteriscos) indica correlação significativa (t-Student; $\alpha = 0,05$) entre os pares de variáveis quantitativas comparadas.

6 CONCLUSÕES

A partir dos dados do sistema CIEL*a*b* foi possível obter informações úteis para a discriminação das madeiras de *H. crepitans*, *H. spruceana*, *O. cymabrum*, *P. munguba*. Destaca-se o ângulo de tinta (h) como o parâmetro colorimétrico mais significativo. Além disso, observou-se que as posições de coleta das amostras afetaram a capacidade de discriminação entre as espécies.

Em relação à densidade básica, as madeiras avaliadas possuem densidade baixa. Em geral, a maioria dos parâmetros colorimétricos não apresentaram correlação com a densidade básica das espécies, somente o ângulo de tinta (h) foi significativo.

No que tange à técnica do NIR, as curvas espectrais foram semelhantes, sendo que a principal diferença foi na intensidade de absorbância. A análise de PCA revelou o potencial dessa técnica para identificar características compartilhadas entre as espécies. A combinação de dados NIR e algoritmos de aprendizado de máquina resultou em classificadores altamente precisos, destacando o modelo PLS-DA com acurácia e F1-Score de 98,46%. Esses resultados apontam claramente para o potencial informativo dos dados NIR na distinção de espécies arbóreas de várzea. Portanto, a técnica colorimétrica e do NIR podem ser ferramentas para auxiliar na separação de espécies de madeiras de várzea da Amazônia.

7 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Uma consideração essencial para pesquisas futuras é a ampliação das análises com outras espécies, proporcionando um banco de dados mais robusto e aplicável na prática. A inclusão de uma variedade de espécies, englobando diferentes gêneros e famílias botânicas, permitirá uma compreensão mais abrangente das características espectrais das madeiras na região amazônica de várzea.

Além disso, é fundamental explorar as variações dos espectros em outras alturas e em diferentes estratos da floresta. Realizar estudos com os estratos verticais, como as espécies do sub-bosque e do dossel, bem como variações horizontais ao longo de gradientes na floresta, proporcionará informações sobre as características espectrais das madeiras em diferentes condições ambientais.

A análise em diferentes épocas do ano também pode ser um fator interessante para compreender a variação nos espectros das madeiras. Considerando fatores como mudanças climáticas sazonais e eventos extremos, como secas ou períodos chuvosos intensos, permitirá uma visão mais abrangente das dinâmicas temporais nas características das madeiras.

No contexto das técnicas de aprendizado de máquina, é recomendável a exploração de outros algoritmos além dos modelos PLS-DA, SVM e k -NN. A comparação e avaliação de desempenho de diferentes algoritmos, como Redes Neurais Artificiais ou Random Forest, podem melhorar a precisão das classificações e a robustez do modelo.

Por fim, o desenvolvimento de uma plataforma que reúna o armazenamento e compartilhamento de dados espectrais coletados é uma iniciativa pertinente. Proporcionar acesso aberto a esses dados facilitará a colaboração e o uso dessas informações por outros pesquisadores, profissionais e gestores florestais.

Essas extensões representam passos significativos em direção a um entendimento mais completo dos espectros das madeiras na Amazônia, contribuindo não apenas para o avanço do conhecimento científico, mas também para aplicações práticas no manejo florestal sustentável.

REFERÊNCIAS

- ABREU, J. C.; GUEDES, M. C.; GUEDES, A. C. L.; BATISTA, E. M. Estrutura e distribuição espacial de andirobeiras (*Carapa* spp.) em floresta de várzea do Estuário Amazônico. **Ciência Florestal**, v. 24, n. 4, p. 1007-1016, 2014.
- ACQUAH, G. E.; VIA, B. K.; FASINA, O. O.; ECKHARDT, L. G. Non-destructive prediction of the properties of forest biomass for chemical and bioenergy applications using near infrared spectroscopy. **Journal of Near Infrared Spectroscopy**, v. 23, n. 2, p. 93-102, 2015.
- AHMAD, I.; BASHERI, M.; IQBAL, M.J.; RAHIM, A. Performance comparison of support vector machine, random forest, and extreme learning machine for intrusion detection. **IEEE Access**, n.6, p.33789–33795, 2018.
- ARCE, N.; MOYA, R. Wood characterization of adult clones of *Tectona grandis* growing in Costa Rica. **Cerne**, v.21, n.3, p.353-362, 2015.
- ATAYDE, C.M.; GONÇALEZ, J.C.; CAMARGOS, J.A.A. Características colorimétricas entre as seções anatômicas da madeira de muirapiranga (*Brosimum* sp.). **Cerne**, v. 17, n. 2. p. 231-235, 2011.
- AUTRAN, C. S.; GONÇALEZ, J. C. Caracterização colorimétrica das madeiras de muirapiranga (*Brosimum rubescens* Taub.) e de seringueira (*Hevea brasiliensis*), clone TJIR 16 Müll Arg. visando à utilização em interiores. **Ciência Florestal**, v. 16, n. 4, p. 445-451, 2006.
- AYANLEYE, S.; AVRAMIDIS, S. Predictive capacity of some wood properties by near-infrared spectroscopy. **International Wood Products Journal**, v. 12, n. 2, p. 83-94, 2021.
- BARROS, S. V. D. S.; MUNIZ, G. I. B. D.; MATOS, J. L. M. D. Caracterização colorimétrica das madeiras de três espécies florestais da Amazônia. **Cerne**, v. 20, n. 3, p. 337-342, 2014.
- BERGO, M. C. J.; PASTORE, T. C. M.; CORADIN, V. T. R.; WIEDENHOEFT, A. C.; BRAGA, J. W. B. NIRS identification of *Swietenia macrophylla* is robust across specimens from 27 countries. **IAWA Journal**, v.37, n. 3, p. 420-430, 2016.
- BONFATTI JÚNIOR, E. A; LENGOWSKI, E. C. Colorimetria aplicada à ciência e tecnologia da madeira. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v.38, p.10-13 - e201601394, 2018.
- BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. SNUC – Sistema Nacional de Unidades de Conservação da Natureza: Lei nº 9.985, de 18 de julho de 2000. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil/leis/L9985.htm>. Acesso em: 01 nov. 2023.

BREDIN, Y. K.; HAWES, J. E.; PERES, C. A.; HAUGAASEN, T. Structure and composition of Terra Firme and seasonally flooded Várzea forests in the Western Brazilian Amazon. **Forests**, v. 11, n. 12, p. 1361, 2020.

BUCHELT, B.; WAGENFÜHR, A. Evaluation of colour differences on wood surfaces. **European Journal of Wood and Wood Products**, v. 70, n. 1-3, p. 389-391, 2012.

CADEMARTORI, P. H. G.; SCHNEID, E.; GATTO, D. A.; STANGERLIN, D. M.; BELTRAME, R. Thermal modification of *Eucalyptus grandis* wood: variation of colorimetric parameters. **Maderas, Ciencia y Tecnología**, v.15, n.1, p.57-64, 2013.

CAMARGOS, J. A. A.; GONÇALEZ, J. C. A colorimetria aplicada como instrumento na elaboração de uma tabela de cores de madeira. **Brasil Florestal**, n.71, p.30-41, 2001.

CARVALHO, P. E. R. Espécies arbóreas brasileiras. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica. Colombo: Embrapa Florestas, 2006. v. 2.

COMMISSION INTERNATIONALE DE L'ECLAIRAGE. **Colorimetry**. 3rd. ed. Viena: Central Bureau of the CIE, 2004. 82 p.

COSTA, M. A.; DA COSTA, A. F.; PASTORE, T. C. M.; BRAGA, J. W. B.; GONÇALEZ, J. C. Caracterização do ataque de fungos apodrecedores de madeiras através da colorimetria e da espectroscopia de infravermelho. **Ciência Florestal**, v. 21, n. 3, p. 567-577, 2011.

CSORDÓS, D.; NÉMETH R.; BAK, M. Variation of colour properties between and within new *Robinia* varieties with enhanced growing rates from different sites. **BioResources**, v. 9, n. 4, p. 7099-7108, 2014.

DELUCIS, R. D. A.; TABORDA, V. C.; CORREA, L. W.; VEJA, R. D. A.; GATTO, D. A. Avaliação da cor dos lenhos juvenil e adulto de cedro por meio do método CIE L* a* b*. **Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração**, v. 11, n. 3, p. 251-259, 2014.

DIÓGENES, F. E. G.; MAIA, J. H.; SOUZA, L. S.; DE SOUSA, T. M.; CASTRO, V. G. Caracterização física e determinação do teor de extrativos da madeira de Embiratanha. **Advances in Forestry Science**, v. 6, n. 3, p. 755-759, 2019.

ELLIOTT, A. C.; HYNAN, L. S. A SAS® macro implementation of a multiple comparison post hoc test for a Kruskal–Wallis analysis. **Computer methods and programs in biomedicine**, v. 102, n. 1, p. 75-80, 2011.

ESQUIVEL-MUELBERT, A.; BAKER, T.R.; DEXTER, K.G.; LEWIS, S.L.; BRIENEN, R.J.W.; FELDPAUSCH, T.R.; LLOYD, J.; MONTEAGUDO-MENDOZA, A.; ARROYO, L.; ÁLVAREZ-DÁVILA, E.; *et al.* Compositional response of Amazon forests to climate change. **Global Change Biology**, v.25, p. 39–56, 2019.

FIRMINO, A. V.; VIDAURRE, G. B.; OLIVEIRA, J. T. D.; GUEDES, M.; ALMEIDA, M. N. F.; SILVA, J. G. M.; LATORRACA, J. V. F.; ZANUNCIO, J. C. Wood properties of

Carapa guianensis from floodplain and upland forests in Eastern Amazonia, Brazil. **Scientific Reports**, v. 9, p. 1-10, 2019.

FLORES, B. M.; HOLMGREN, M.; XU, C.; van NES, E. H.; JAKOVAC, C. C.; MESQUITA, R. C. G.; SCHEFFER, M. Floodplains as an Achilles' heel of Amazonian forest resilience. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 114, n. 17, p. 4442-4446, 2017.

FONTES, C. G.; FINE, P. V. A.; WITTMANN, F.; BITTENCOURT, P. R. L.; PIEDADE, M. T. F.; HIGUCHI, N.; CHAMBERS, J. Q.; DAWSON, T. E. Convergent evolution of tree hydraulic traits in Amazonian habitats: Implications for community assemblage and vulnerability to drought. **New Phytologist**, v. 228, p. 106–120, 2020.

GARCIA, R. A.; OLIVEIRA, N. S.; NASCIMENTO, A. M.; SOUZA, N. D. Colorimetria de madeiras dos gêneros *Eucalyptus* e *Corymbia* e sua correlação com a densidade. **Cerne**, v. 20, n. 4, p. 509-517, 2014.

GEGZNA, V. **ManyROC: tools for ROC analysis**. 2020. Disponível em: <<https://github.com/gegzn/manyROC>>. Acesso em: 05 mar de 2023.

GONÇALEZ, J. C.; MARQUES, M. H. B.; KARAS, M. C. S.; JANIN, G.; RIBEIRO, P. G. Effect of drying process on Marupá wood color. **Maderas. Ciencia y Tecnología**, v.16, n.3, p.337–342, 2014.

GONÇALVES, T. A.; NAVARRO, A. G.; NISGOSKI, S.; SONSIN-OLIVEIRA, J. The trees of the Water People: archeological waterlogged wood identification and near-infrared analysis in Eastern Amazonia. **Wood Science and Technology**, v. 55, n. 4, p. 991-1011, 2021.

HAWES, J. E.; PERES, C. A.; RILEY, L. B.; HESS, L. L. Landscape-scale variation in structure and biomass of Amazonian seasonally flooded and unflooded forests. **Forest Ecology and Management**, v. 281, p. 163-176, 2012.

HECHENBICHLER, K.; SCHLIEP, K. **Weighted k-nearest-neighbor techniques and ordinal classification** Sonderforschungsbereich. Disponível em <<https://epub.ub.uni-muenchen.de/>>. Acesso em 05 mar 2023.

HEIN, P.R.G.; LIMA, J.T.; CHAIX, G. Effects of sample preparation on NIR spectroscopic estimation of chemical properties of *Eucalyptus urophylla* S.T. Blake wood. **Holzforschung**, v. 64, p. 45–54, 2010.

HEIN, P. R.G.; PAKKANEN, H.; SANTOS, A. A. Dos. Challenges in the use of near infrared spectroscopy for improving wood quality: A review. **Forest Systems**, v. 26, n. 3, eR03, 2017.

HORIKAWA, Y.; TAZURU, S.M.; SUGIYAMA, J. Near-infrared spectroscopy as a potential method for identification of anatomically similar Japanese diploxylons. **Journal of Wood Science**, v. 61, p. 251–261, 2015.

HWANG, S.W.; HORIKAWA, W.H.; LEE, W.H.; SUGIYAMA, J. Identification of Pinus species related to historic architecture in Korea using NIR chemometric approaches. **Journal of Wood Science**, v.62, p. 156–167, 2016.

IPT - Instituto de Pesquisas Tecnológicas. Informações sobre madeiras. Disponível em: http://www.ipt.br/informacoes_madeiras/1.htm. Acesso em: 01 nov. 2023.

IBAMA-Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Renováveis. **Madeiras da Amazônia**: características e utilização. v.3, IBAMA: Brasília, 1997. 141p.

JANKOWSKY, I. P. **Madeiras brasileiras**. Caxias do Sul: Spectrum, 1990. 172 p.

JUNK, W. J.; PIEDADE, M. T. F.; LOURIVAL, R.; WITTMANN, F.; KANDUS, P.; LACERDA, L. D.; BOZELLI, R. L.; ESTEVES, F. A.; NUNES DA CUNHA, C.; MALTCHIK, L.; SCHÖNGART, J.; SCHAEFFER-NOVELLI, Y.; AGOSTINHO, A. A. Brazilian wetlands: their definition, delineation, and classification for research, sustainable management, and protection. **Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems**, v. 24, n. 1, p. 5-22, 2014.

KARATZOGLOU, A.; SMOLA, A.; HORNIK, K.; ZEILEIS, A. Kernlab—an S4 package for kernel methods in R. **Journal of Statistical Software**, v.11, n.9, p.1–20, 2004.

KASSAMBARA, A.; MUNDT, F. **Factoextra**: Extract and Visualize the Results of Multivariate Data Analyses. R package version 1.0.5. <https://CRAN.R-project.org/package=factoextra>. 2017.

KITA, Y.; TAZURU, S.; TAKESHITA, H.; SUGIYAMA, J. Classification of wood species frequently used for modern and ancient buildings utilizing near-infrared spectroscopy with multivariate analysis and enhancement of its generalization performance. **Mokuzai Gakkaishi**, v. 66, n. 3, p. 171-182, 2020.

KRŽIŠNIK, D.; LESAR, B.; THALER, N.; HUMAR, M. Influence of natural and artificial weathering on the colour change of different wood and wood-based materials. **Forests**, v. 9, n. 8, p. 488, 2018.

KUHN, M. Building predictive models in R using the caret package. **Journal of Statistical Software**, v.28, n.5, p.1–26, 2008.

KUHN, M.; JOHNSON, K. **Applied predictive modeling**. Springer, New York, 2013.

KUHN, M.; WING, J.; WESTON, S.; WILLIAMS, A.; KEEFER, C.; ENGELHARDT, A.; COOPER, T.; MAYER, Z.; KENKEL, B.; THE R CORE TEAM, BENESTY M, LESCARBEAU, R.; ZIEM, A.; SCRUCICA, L.; TANG, Y.; CANDAN, C.; HUNT, T. **Caret: classification and regression training**. R package version 6.0-73, 2016.

LAZARESCU, C.; HART, F.; PIROUZ, Z.; PANAGIOTIDIS, K.; MANSFIELD, S.D.; BARRETT, J.D.; AVRAMIDIS, S. Wood species identification by near infrared spectroscopy. **International Wood Products Journal**, v.8, n.1, p.32–35, 2017.

LÊ, S.; JOSSE, J.; HUSSON, F. FactoMineR R: An R Package for Multivariate Analysis. **Journal of Statistical Software**, v.25, n.1, p.1-18, 2008.

LI, C.; QIU, Z.; LIU, C. An improved weighted k-nearest neighbor algorithm for indoor positioning. **Wireless Personal Communication**, v.96, n.2, p.2239–2251, 2017.

LIMA, M. D. R., PATRÍCIO, E. P. S., JUNIOR, U. D. O. B., SILVA, R. D. C. C., BUFALINO, L., NUMAZAWA, S.; HEIN, P. R. G.; PROTÁSIO, T. P. Colorimetry as a criterion for segregation of logging wastes from sustainable forest management in the Brazilian Amazon for bioenergy. **Renewable Energy**, v. 163, p. 792-806, 2021.

LPF - Laboratório de Produtos Florestais. Madeiras Brasileiras. Disponível em: <http://sistemas.florestal.gov.br/madeirasdobrasil/caracteristicas.php?ID=80&caracteristica=271>. Acesso em: 01 mar. 2023.

MAB/UNESCO. Reserva da Biosfera da Amazônia Central. 2001. Disponível em: https://www.rbma.org.br/mab/unesco_01_oprograma.asp. Acesso em: 01 nov. 2023.

MARTINS, M. F.; BELTRAME, R.; DELUCIS, R. A.; GATTO, D. A.; DE CADEMARTORI, P. H. G.; DOS SANTOS, G. A. Colorimetria como ferramenta de agrupamento de madeira de clones de eucalipto. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 35, n. 84, p. 443-449, 2015.

MARTINS-DA-SILVA, R. C. V. **Coleta e Identificação de Espécimes Botânicos**. Belém, PA: Embrapa Amazônia Oriental, 2002. (Embrapa Amazônia Oriental. Documentos, 143). 40 p.

MCROBERTS, R. E.; NÆSSET, E.; GOBAKKEN, T. Optimizing the k-nearest neighbors' technique for estimating forest aboveground biomass using airborne laser scanning data. **Remote Sensing and Environment**, n.163, p.13– 22, 2015.

MEINTS, T.; TEISCHINGER, A.; STINGL, R.; HANSMANN, C. Wood colour of central European wood species: CIELAB characterisation and colour intensification. **European Journal of Wood and Wood Products**, v. 75, n. 4, p. 499-509, 2017.

MELO, J. E.; CORADIN, V. T. R.; MENDES, J. C. Classes de densidade de madeira para a Amazônia brasileira. **Anais do Congresso Florestal Brasileiro**, v. 6, p. 695-699. 1990.

MELO, R. R; STANGERLIN, D. M.; DEL MENEZZI, C. H. S.; CASTRO, V. G.; SOUZA, M. J. C.; MEDEIROS, D. T. Grouping of commercial tropical timber using wood color. **Revista de Ciências Agrárias**, v. 62, p. 1-6. 2019.

MEVIK, B. H.; WEHRENS, R.; LILAND, K. H. pls: **Partial Least Squares and Principal Component Regression**. R package version 2.7-3, 2020.

MONTERO, J. C., PIEDADE, M. T. F.; WITTMANN, F. Floristic variation across 600 km of inundation forests (Igapó) along the Negro River, Central Amazonia. **Hydrobiologia**, v. 729, n. 1, 229-246, 2014.

MORI, C. L. S. O.; LIMA, J. T.; MORI, F. A.; TRUGILHO, P. F.; GONCALEZ, J. C. Caracterização da cor da madeira de clones de híbridos de *Eucalyptus* spp. **Cerne**, v. 11, n. 2, p. 137-146, 2005.

MORI, C.L.S.O.; MORI, F.A.; LIMA, J.T.; TRUGILHO, P.F.; OLIVEIRA, A.C. Influência das características tecnológicas na cor da madeira de eucaliptos. **Ciência Florestal**, v. 14, n. 2, p. 123-132, 2004.

MOYA, R.; FALLAS, R. S.; BONILLA, P. J.; TENORIO, C. Relationship between wood color parameters measured by the CIELab system and extractive and phenol content in *Acacia mangium* and *Vochysia guatemalensis* from fast-growth plantations. **Molecules**, v. 17, n. 4, p. 3639-3652, 2012.

MUÑIZ, G. I. B.; CARNEIRO, M. E.; BATISTA, F. R. R.; SCHARDOSIN, F. Z.; NISGOSKI, S. Wood and charcoal identification of five species from the miscellaneous group known in Brazil as “angelim” by near-ir and wood anatomy. **Maderas. Ciencia y tecnología**, v. 18, n. 3, p. 505 – 522, 2016.

NAJI, H. R.; BAKAR, E. S.; SOLTANI, M.; EBADI, S. E.; ABDUL-HAMID, H.; JAVAD, S. K. S.; SAHRI, M. H. Effect of initial planting density and tree features on growth, wood density, and anatomical properties from a *Hevea brasiliensis* trial plantation. **Forest Products Journal**, v. 64, n. 1-2, p. 41-47, 2014.

NASCIMENTO, C. S. D.; NASCIMENTO, C. C. D.; ARAÚJO, R. D. D.; SOARES, J. C. R.; HIGUCHI, N. Characterization of technological properties of matá-matá wood (*Eschweilera coriacea* [DC.] SA Mori, *E. odora* Poepp.[Miers] and *E. truncata* AC Sm.) by Near Infrared Spectroscopy. **iForest-Biogeosciences and Forestry**, v. 14, n. 5, p. 400, 2021.

NIEMZ, P.; MANNES, D. Non-destructive testing of wood and wood-based materials. **Journal of Cultural Heritage**, v. 13, n. 3, p. S26-S34, 2012.

NISGOSKI, S.; DE MUNIZ, G. I. B.; GONÇALVES, T. A. P.; BALLARIN, A. W. Use of visible and near-infrared spectroscopy for discrimination of eucalypt species by examination of solid samples. **Journal of Tropical Forest Science**, v. 29, n. 3, p. 371–379, 2017.

NISGOSKI, S.; DOS SANTOS, J. X.; VIEIRA, H. C.; NAIDE, T. L.; STANGE, R.; SILVA, W. D. S.; SOUZA, D. V.; GAMA, N. C.; HAMADA, M. O. D. S. Provenance identification of leaves and nuts of *Bertholletia excelsa* Bonpl by near-infrared spectroscopy and color parameters for sustainable extraction. **Sustainability**, v. 15, n. 21, p. 15606. 2023.

NISGOSKI, S.; GONÇALVES, T. A. P.; DE OLIVEIRA, N. M.; BITTENCOURT, S. C.; LIMA, G. S.; DE MUÑIZ, G. I. B. Influence of toposequence position of *Stryphnodendron adstringens* trees on discrimination of samples based on spectroscopy. **Revista Ciência da Madeira**, v. 9, n. 2, p. 112-122, 2018.

NISGOSKI, S.; KLOCK, U.; BATISTA, F. R. R.; SCHARDOSIN, F. Z., CONSALTER, R.; MOTTA, A. C. V. Use of NIR for trees discrimination in different fertilizations based on wood and bark spectra. **Ciência da Madeira**, v. 7, n. 2, p. 100-110, 2016a.

NISGOSKI, S.; SCHARDOSIN, F. Z.; BATISTA, F. R. R.; DE MUÑIZ, G. I. B.; CARNEIRO, M. E. Potential use of NIR spectroscopy to identify *Cryptomeria japonica* varieties from southern Brazil. **Wood Science and Technology**, v. 50, n. 1, p. 71-80, 2016b.

NISGOSKI, S.; VIEIRA, H. C.; GONÇALVES, T. A. P.; AFONSO, C. M.; DE MUÑIZ, G. I. B. Charcoal anatomy and NIR spectra of *Spirostachys africana*, *Terminalia* sp. and *Colophospermum mopane* in different carbonization process. **SN Applied Sciences**, v. 2, p. 1-15, 2020.

NISHINO, Y.; JANIN, G.; YAINADA, Y.; KITANO, D. Relations between the colorimetric values and densities of sapwood. **Journal of Wood Science**, v.46, n.4, p.267-272, 2000.

OLIVEIRA, G. M. V.; DE MELLO, J. M.; DE MELLO, C. R.; SCOLFORO, J. R. S.; MIGUEL, E. P.; MONTEIRO, T. C. Behavior of wood basic density according to environmental variables. **Journal of Forestry Research**, p. 1-9, 2021.

PASQUINI, C. Near infrared spectroscopy: a mature analytical technique with new perspectives-a review. **Analytica Chimica Acta**, v.1026, p.8-36, 2018.

PASTORE, T. C. M.; BRAGA, J. W. B.; CORADIN, V. T. R.; MAGALHÃES, W. L. E.; OKINO, E. Y. A.; CAMARGOS, J. A. A.; DE MUÑIZ, G. I. B.; BRESSAN, O. A.; DAVRIEUX, F. Near infrared spectroscopy (NIRS) as a potential tool for monitoring trade of similar woods: discrimination of true mahogany, cedar, andiroba and curupixá. **Holzforschung**, v.65, n.1, p.73-80, 2011.

PASTORE, T. C.M.; SANTOS, K. O.; RUBIM, J. C. A spectrophotometric study on the effect of ultraviolet irradiation of four tropical hardwoods. **Bioresource technology**, v. 93, n. 1, p. 37-42, 2004.

PATIL, I. Visualizations with statistical details: The 'ggstatsplot' approach. **Journal of Open Source Software**, v. 6, n. 61, 3167, 2021.

PETERSON, R. A. Finding optimal normalizing transformations via bestNormalize. **The R Journal**, v. 13, n. 1, p. 310-329, 2021.

RAMALHO, E. E.; MACEDO, J.; VIEIRA, T. M.; VALSECCHI, J.; CALVIMONTES, J.; MARMONTEL, M.; QUEIROZ, H. L. Ciclo hidrológico nos ambientes de várzea da Reserva de Desenvolvimento Sustentável Mamirauá Médio Rio Solimões, período de 1990 a 2008. **UAKARI**, v. 5, n. 1, p. 61-87, 2009.

REIS, C. A.; SILVA, E. L.; MININI, D.; MUÑIZ, G. I. B.; MORRONE, S. R.; NISGOSKI, S. Preliminary study of colorimetry as an auxiliary tool for *Manilkara* spp. wood discrimination. **European Journal of Wood and Wood Products**, v. 81, p.1119-1133, 2023.

RIBEIRO, E. S.; GONÇALEZ, J. C.; LIMA, C. M.; RODRIGUES, E. C. C.; PAULA, M. H.; MESQUITA, R. R. S.; QUEIROZ, F. L. C.; LESSES, O. M. G. Colorimetry and anatomical characterization of commercial wood species from the Brazilian Amazon. **Australian Journal of Basic and Applied Sciences**, v. 12, n. 2, 15-23, 2018.

SANDOVAL-TORRES, S.; JOMAA, W.; MARC, F.; PUIGGALI, J.-R. Causes of color changes in wood during drying. **Forest Studies in China**, v. 12, n. 4, p. 167-175, 2010.

SANTANA, F.B.; SOUZA, A. A. M.; ALMEIDA, M. R.; BREITKREITZ, M. A. C.; FILGUEIRAS, P. R.; SENA, M. M.; POPPI, R. J. Experimento didático de quimiometria para classificação de óleos vegetais comestíveis por espectroscopia no infravermelho médio combinado com análise discriminante por mínimos quadrados parciais: Um tutorial, Parte V. **Química Nova**, v.43, n.3, p.371– 381, 2020.

SANTOS, J. X. D.; VIEIRA, H. C.; NAIDE, T. L.; SOUZA, D. V.; MUÑIZ, G. I. B. D.; SOFFIATTI, P.; NISGOSKI, S. Vis spectroscopy and CIELAB parameters of six wood species of the Fabaceae family marketed in the Brazilian Amazon. **International Wood Products Journal**, v.12, n.3, p.164-171, 2021a.

SANTOS, J. X. D.; VIEIRA, H. C.; SOUZA, D. V.; MUÑIZ, G. I. B. D.; SOFFIATTI, P.; NISGOSKI, S. Colorimetry as a tool for description of some wood species marketed as “tauari” in Brazilian Amazon. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 94, p. e20191479, 2022.

SANTOS, J. X.; VIEIRA, H. C.; SILVA, E. L.; MUÑIZ, G. I. B.; SOFFIATTI, P.; NISGOSKI, S. Near infrared spectroscopy for separation of tauari wood in Brazilian amazon native forest. **Journal of Tropical Forest Science**, v. 32, n. 3, p. 227-236, 2020.

SANTOS, J.X.; VIEIRA, H.C.; SOUZA, D.V.; COSTA, P.A.B.; DE MUNIZ, G.I.B., SOFFIATTI, P.; NISGOSKI, S. Characterization of wood popularly known as “Louros” in the Brazilian amazon by visible spectroscopy and CIELAB parameters. **Forest Systems**, v. 30, n. 2, e 007, 2021b.

SANTOS, J.X.; VIEIRA, H.C.; SOUZA, D.V.; DE MENEZES, M.C.; DE MUNIZ, G.I.B.; SOFFIATTI, P.; NISGOSKI, S. Discrimination of “Louros” wood from the Brazilian Amazon by near-infrared spectroscopy and machine learning techniques. **European Journal of Wood and Wood Products**, v. 79, p. 989–998, 2021c.

SCHLOERKE, B.; COOK, D.; LARMARANGE, J.; BRIATTE, F.; MARBACH, M.; THOEN, E.; ELBERG, A.; CROWLEY, J. **_GGally: Extension to 'ggplot2'_**. R package version 2.1.2, 2021. Disponível em <<https://CRAN.R-project.org/package=GGally>>. Acesso em 05 mar 2023

SCHWANNINGER, M.; RODRIGUES, J. C.; FACKLER, K. A review of band assignments in near infrared spectra of wood and wood components. **Journal of Near Infrared Spectroscopy**, v. 19, n. 5, p. 287-308, 2011.

SHIMIZU, G.; MARUBAYASHI, R.; GONÇALVES, L. **_AgroR: Experimental Statistics and Graphics for Agricultural Sciences_**. R package version 1.3.5. Disponível em <<https://CRAN.R-project.org/package=AgroR>>2. Acesso em 05 mar 2023.

SILVA, E. D. S.; JÚNIOR, E. A. B.; SILVA, G. A. D. O.; CURVO, K. R.; STANGERLIN, D. M., MELO, R. R. D.; SOUZA, A. P. D. Surface deterioration of five amazonian wood exposed to natural weathering. **Madera y Bosques**, v. 28, n. 2, 2022.

SILVA, J. C. A.; SIGNOR, D.; BRITO, A. M. S. S.; CERRI, C. E. P.; CAMARGO, P. B.; PEREIRA, C. F. Espectroscopia no infravermelho próximo e análise de componentes principais para investigação de solos submetidos a diferentes usos da terra na Amazônia Oriental brasileira. **Revista Virtual de Química**, v. 12, n. 1, p. 51-62, 2020.

SILVA, R.A.F.; SETTER, C.; MAZETTE, S.S.; DE MELO, R.R.; STANGERLIN, D.M. Colorimetria da madeira de trinta espécies tropicais. **Ciência da Madeira**, v.8, n.1, p.36-41, 2017.

SKOOG, D. A.; HOLLER, F. J.; CROUCH, S. R. **Principles of instrumental analysis**. Cengage learning, 2017. 961 p.

SNEL, F.A.; BRAGA, J.W.B.; DA SILVA, D; WIEDENHOEFT, A.C.; COSTA, A.; SOARES, R.; CORADIN, V.T.R.; PASTORE, T.C.M. Potential field-deployable NIRS identification of seven *Dalbergia* species listed by CITES. **Wood Science and Technology**, v.52, n.5, p.1411–1427, 2018.

SOARES, L.F.; DA SILVA, D.C.; BERGO, M.C.J.; CORADIN, V.T.R.; BRAGA, J.W.B.; PASTORE, T.C.M. Avaliação de espectrômetro NIR portátil e PLS-DA para a discriminação de seis espécies similares de madeiras amazônicas. **Química Nova**, v. 40, n. 4, p.418-426, 2017.

SONG, Y.; LIANG, J.; LU, J.; ZHAO, X. An efficient instance selection algorithm for k nearest neighbor regression. **Neurocomputing**, n.251, p.26–34, 2017.

SOTELO-MONTES, C.; WEBER, J.C.; GARCIA, R.A.; SILVA, D.A.; MUÑIZ, G.I.B. Variation in wood color among natural populations of five tree and shrub species in the Sahelian and Sudanian ecozones of Mali. **Canadian Journal of Forest Research**, v.43, n.6, p.552-562, 2013.

SOTO-MARTÍN, O. Colorimetric measurements as control elements in wood conservation status. **Conservar Património**, n. 20, p. 75-79, 2014.

SOUSA, W.C.S.; DE JESUS, B.L.; SOARES, A.A.V.; GOULART, S.L.; DE PAULA, P.T. Wood colorimetry for the characterization of Amazonian tree species: a subsidy for a more efficient classification. **Cerne**, v.25, n.4, p.451-462, 2020.

THULEAU, S.; HUSSON, F. **FactoInvestigate: Automatic Description of Factorial Analysis**. R package version 1.6. Disponível em: <<https://CRAN.R-project.org/package=FactoInvestigate>>. Acesso em 05 mar 2023.

TORRES, S.S.; JOMA, A.W.M.; PUIGGALI, J.R. Colour alteration and chemistry changes in oak wood (*Quercus pedunculata*) during plain vacuum drying. **Wood Science and Technology**, v.46, n.1, p.177-191, 2012.

TOSCANO, G.; RINNAN, Å.; PIZZI, A.; MANCINI, M. The use of near-infrared (NIR) spectroscopy and principal component analysis (PCA) to discriminate bark and wood of the most common species of the pellet sector. **Energy & Fuels**, v. 31, n. 3, p. 2814-2821, 2017.

TSUCHIKAWA, S.; KOBORI, H. A review of recent application of near infrared spectroscopy to wood science and technology. **Journal of Wood Science**, v.61, n.3, p.213–220, 2015.

TSUCHIKAWA, S.; YAMATO, K.; INOUE, K. Discriminant analysis of wood-based materials using near-infrared spectroscopy. **Journal of Wood Science**, v. 49, n. 3, p. 275-280, 2003.

VANCLAY, J.K.; HENSON, M.; PALMER, G. Color variation and correlations in *Eucalyptus dunnii* sawnwood. **Journal of Wood Science**, v. 54, n. 6, p. 431-435, 2008.

VIANA, L. C.; TRUGILHO, P. F.; HEIN, P. R. G.; LIMA, J. T.; DA SILVA, J. R. M. Predicting the morphological characteristics and basic density of *Eucalyptus* wood using the NIRS technique. **Cerne**, v. 15, n. 4, p. 421-429, 2009.

VIEIRA, H. C.; DOS SANTOS, J. X.; SILVA, E. L.; RIOS, P. D'A.; MUÑIZ, G. I. B.; MORRONE, S. R.; NISGOSKI, S. Potential of the near-infrared spectroscopy for the discrimination of wood and charcoal of four native Myrtaceae species in southern Brazil. **Wood Material Science & Engineering**, v. 16, n. 3, p. 188-195, 2021

VIEIRA, H. C.; DOS SANTOS, J. X.; SOUZA, D. V.; DE MUNIZ, G. I. B.; MORRONE, S. R.; NISGOSKI, S. Near-infrared spectroscopy for the distinction of wood and charcoal from Fabaceae species: comparison of ANN, KNN AND SVM models. **Forest systems**, v. 29, n. 3, p. 2, 2020.

WICKHAM, H. **ggplot2: Elegant Graphics for Data Analysis**. Springer-Verlag New York, 2016. 319p.

WITTMANN, F.; HOUSEHOLDER, J. E.; PIEDADE, M. T. F.; SCHÖNGART, J.; DEMARCHI, L. O.; QUARESMA, A. C.; JUNK, W. J. A Review of the ecological and biogeographic differences of amazonian floodplain forests. **Water**, v. 14, n. 21, p. 3360, 2022.

WITTMANN, F.; SCHÖNGART, J.; BRITO, J. M.; OLIVEIRA-WITTMANN, A.; PAROLIN, P.; PIEDADE, M. T. F.; JUNK, W. J.; GUILLAUMET, J. L. **Manual of tree species in central Amazonian white-water floodplains: Taxonomy, Ecology, and Use**. Instituto. Manaus: Editora INPA, 2010. 286p.

WITTMANN, F.; SCHÖNGART, J.; MONTERO, J. C.; MOTZER, T.; JUNK, W. J.; PIEDADE, M. T.; Queiroz, H. L.; WORBES, M. Tree species composition and diversity

gradients in white-water forests across the Amazon Basin. **Journal of Biogeography**, v. 33, n. 8, p. 1334-1347, 2006.

WOLD, S.; SJÖSTRÖM, M.; ERIKSSON, L. PLS-regression: a basic tool of chemometrics. **Chemometrics and intelligent laboratory System**, v.58, n.2, p.109–130, 2001.

WU, X.; KUMAR, V.; QUINLAN, J. R.; GHOSH, J.; YANG, Q; MOTODA, H.; MCLACHLAN, G.J.; NG, A.; LIU, B.; YU, P.S.; ZHOU, Z-H; STEINBACH, M.; HAND, D.J.; STEINBERG, D. Top 10 algorithms in data mining. **Knowledge and Information Systems**, v.14, n.1, 1-37, 2008.

ZANUNCIO, A. J. V.; FARIAS, E. de S.; SILVEIRA, T. A. da. Termorretificação e colorimetria da madeira de *Eucalyptus grandis*. **Floresta e Ambiente**, v. 21, n. 1, p. 85-90, 2014.