



**MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DA AMAZÔNIA - UFRA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS FLORESTAIS - PPGCF**

THIAGO VALENTE NOVAES

**ESPECTROSCOPIA NO INFRAVERMELHO PRÓXIMO (NIR) PARA
DISCRIMINAR ESPÉCIES FLORESTAIS PRODUTORAS DE MADEIRA DA
AMAZÔNIA**

**BELÉM/PA
2021**

THIAGO VALENTE NOVAES

**ESPECTROSCOPIA NO INFRAVERMELHO PRÓXIMO (NIR) PARA
DISCRIMINAR ESPÉCIES FLORESTAIS PRODUTORAS DE MADEIRA DA
AMAZÔNIA**

Documento apresentado à Universidade Federal Rural da Amazônia – UFRA como critério de avaliação final para defesa da dissertação do aluno Thiago Valente Novaes, sendo parte das exigências do Programa de Pós graduação em Ciências Florestais – PPGCF/UFRA, área de concentração: Ciências Florestais; linha de pesquisa: Tecnologia de Recursos Florestais, para obtenção do título de Mestre.

Orientadora: Dr.^a Marcela Gomes da Silva.

Coorientadora: Dr.^a Gracialda Costa Ferreira.

Coorientador: Dr. Paulo Ricardo Gherardi Hein

**BELÉM/PA
2021**

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Bibliotecas da Universidade Federal Rural da Amazônia
Gerada automaticamente mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- N935e Novaes, Thiago Valente
ESPECTROSCOPIA NO INFRAVERMELHO PRÓXIMO (NIR) PARA DISCRIMINAR ESPÉCIES
FLORESTAIS PRODUTORAS DE MADEIRA DA AMAZÔNIA / Thiago Valente Novaes. - 2021.
91 f. : il. color.
- Dissertação (Mestrado) - Programa de PÓS-GRADUAÇÃO em Ciências Florestais (PPGCF), Campus
Universitário de Belém, Universidade Federal Rural Da Amazônia, Belém, 2021.
Orientador: Profa. Dra. Marcela Gomes da Silva
Coorientador: Prof. Dr. Paulo Ricardo Gherardi Hein.
1. Identificação de madeira. 2. Infravermelho próximo (NIR) . I. Gomes da Silva, Marcela, *orient.* II.
Título
-

CDD 634.92

THIAGO VALENTE NOVAES

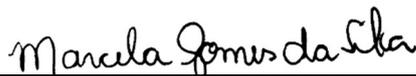
**ESPECTROSCOPIA NO INFRAVERMELHO PRÓXIMO (NIR) PARA
DISCRIMINAR ESPÉCIES FLORESTAIS PRODUTORAS DE MADEIRA DA
AMAZÔNIA**

Documento apresentado à Universidade Federal Rural da Amazônia – UFRA como critério de avaliação final para defesa da dissertação do aluno Thiago Valente Novaes, sendo parte das exigências do Programa de Pós graduação em Ciências Florestais – PPGCF/UFRA, área de concentração: Ciências Florestais; linha de pesquisa: Tecnologia de Recursos Florestais, para obtenção do título de Mestre.

Orientadora: Dr.^a Marcela Gomes da Silva.
Coorientadora: Dr.^a Gracialda Costa Ferreira.
Coorientador: Dr. Paulo Ricardo Gherardi Hein

Aprovado em Belém, 29 de junho de 2021

BANCA EXAMINADORA:



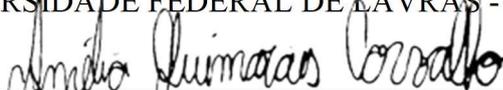
Dr.^a Marcela Gomes da Silva - Orientadora
UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DA AMAZÔNIA - UFRA



Dr. Antônio José Vinha Zanuncio – 1º Examinador
UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA – UFU



Dr.^a Fernanda Maria Guedes Ramalho – 2ª Examinadora
UNIVERSIDADE FEDERAL DE LAVRAS - UFLA



Dr.^a Amélia Guimarães Carvalho – 3ª Examinadora
UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA – UFU

Dedico a conclusão desse ciclo a Sr.^a Marli Valente Novaes, minha amada mãe, que, a exemplo de todas as etapas da minha vida, sempre incentivou a evolução dos meus estudos por acreditar em meu potencial (acreditando, inclusive, mais que eu), ela que nos momentos mais difíceis, representados pelos diversos dias ruins que passei, sempre ofereceu palavras de motivação e um olhar de esperança, ela que durante o silêncio das noites investia seu tempo em orações, pedindo a Deus que não me deixasse desistir e que acampasse seus anjos ao meu redor para servirem como guia, ela que sempre foi minha referência e a quem devo minha vida, meu caráter e todos os valores que carrego comigo e tento transferi-los aos meus filhos, uma mulher de fé inabalável que não mede esforço para ajudar o próximo em detrimento de si, ela que representa a conexão com minhas origens e que me ensinou que só Deus tem poder e que ele nunca abandona seus filhos, que a fé move montanhas e que a verdade sempre é bem-vinda independente das consequências que ela poderá gerar no presente, um futuro de sucesso só pode ser construído com pilares de verdade, ela que sempre me deu amor incondicional e nunca me negou um pedido de perdão nos inúmeros momentos em que falhei e a decepcionei, sempre foi generosa, firme, doce, forte, delicada e nunca desanimou. Esse trabalho é seu também, minha mãe, pois sem você eu jamais teria chagado a lugar algum. Te amo!

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus a quem devo toda honra e toda glória! Agradeço também, de forma incondicional a minha esposa, Sr.^a Dianna Neves da Cruz Valente, por toda paciência e compreensão durante esse período que, não raramente tive o tempo dedicado a família sequestrado e direcionado para atividades acadêmicas, agradeço a ela, também, por estender-me a mão nos momentos de crise em que o colapso estava posto e com muito amor e serenidade ela conseguia me reposicionar para o caminho correto, obrigado, meu amor. Agradeço aos meus filhos Arthur da Cruz Valente e Antonella da Cruz Valente, que não fazem a menor ideia do quanto me ajudaram representando a maior e melhor fonte de inspiração e motivação para seguir firme e com foco, meus filhos amados, sem dúvida alguma refletem a melhor coisa que já fiz nessa vida! Agradeço ao comitê de orientação representado pela Prof.^a Dr.^a Marcela Gomes da Silva, Prof.^a Dr.^a Gracialda Costa Ferreira e Prof.^o Dr. Paulo Ricardo Gherardi Hein que acreditaram que nós seríamos capazes de desenvolver juntos esse trabalho em que as restrições sanitárias e a distância impostas pelo momento foram variáveis que nos acompanharam durante quase todo o período, agradeço a vocês pela confiança e, sobretudo, por todo aprendizado inestimável que tive até aqui. Com igual proporção deixo registrado meu agradecimento a Prof.^a Dr.^a Fernanda Guedes Ramalho que sempre esteve, de forma incansável e com muita paciência, a disposição para oferecer informações e explicações em prol da conclusão do trabalho. Agradeço, na pessoa da Prof.^a Dr.^a Lina Bufalino, a toda equipe do PPGCF/UFRA que sempre foi muito atenciosa e diligente com todas as demandas e com a eficiente condução do Programa. Agradeço a Prefeitura do Campus UFRA por todas as vezes que colaborou com apoio logístico necessário a conclusão do trabalho, seja no transporte de amostras ou seja na disponibilização de estrutura para processamento de materiais. Agradeço a Xiloteca da Embrapa na pessoa do Sr. ^o Palmiro Alvão da Costa e a empresa ABC Norte na pessoa da Diretora Eng.^a Florestal Luciana Di Paula que foi colaboradora determinante, não apenas por fornecer material para análise como também por viabilizar o transporte até a capital (Belém/PA). Agradeço a Eng.^a Florestal Elesandra Araújo que colaborou ativamente no processo de coleta dos espectros, bem como a estagiária Catarina Miranda que trabalhou ativamente no processo de produção das amostras. Agradeço ao amigo Eng.^o Florestal Michael Douglas e por fim, mas não menos importante, agradeço a todos os colegas de turma que compartilharam das mesmas dificuldades e conquistas durante o período.

“Nenhum problema pode ser resolvido com o mesmo nível de consciência que o criou”

Albert Einstein

RESUMO

Na cadeia produtiva da madeira, problemas associados a determinação científica das espécies tem se tornado um dos principais entraves na valoração do produto. Erros de associação de nomes científicos a partir de nomes vulgares tem raiz nos inventários florestais – IF e seguem por todo o percurso da cadeia, resultando em prejuízos econômicos e ecológicos até então imensuráveis por falta de ferramentas que possam ajudar a encontra-los e corrigi-los. Nessa perspectiva é nítida a necessidade de aprimoramento do processo de determinação das espécies para que os IF sejam realizados de forma mais consistentes. Dentro desse contexto, o presente estudo teve como objetivo avaliar o potencial da espectroscopia no infravermelho próximo – NIR, para discriminar madeiras de espécies florestais de ocorrência na Amazônia, a partir de análise multivariada de dados. Foram utilizadas amostras de 6 espécies florestais, a saber: *Manilkara elata* (Ducke) Chevalier; *Dinizia excelsa* Ducke; *Goupia glabra* Aubl.; *Hymenaea* sp.; *Micropholis melinoniana* Pierre e *Copaifera* sp. As amostras foram coletadas no município de Portel/PA, dentro da área do Plano de Manejo Florestal Sustentável - PMFS da empresa ABC Norte-Fazenda Pacajá, e cada espécie foi representada no estudo por 3 árvores, sendo coletado 1 disco na base de cada árvore para produção das amostras. Das 18 árvores utilizadas, foram produzidas 350 amostras cúbicas e 18 baquetas radiais, estas últimas para avaliar o efeito da posição de coleta no plano transversal sentido medula-casca. Também foram considerados para efeito de análise, o tipo de acabamento das peças (motosserra e serra circular), a via de aquisição espectral (fibra óptica e esfera de integração), o tipo de validação dos modelos (cruzada e independente) e a aplicação de pre-tratamento matemático à assinatura espectral. Com os corpos de prova fez-se a aquisição de 1.400 espectros nas amostras cúbicas e 528 espectros nas baquetas radiais. Os resultados indicaram que as amostras de madeira processadas com serra circular resultaram em superfície com melhor interação com a radiação no NIR e os modelos apresentaram maiores valores percentuais de classificação. A esfera de integração foi a via de aquisição espectral que gerou espectros que resultaram em modelos com maiores valores percentuais de classificação correta das amostras de madeira. A espectroscopia no NIR associada à estatística multivariada foi capaz de diferenciar amostras produzidas através de motosserra e serra circular com 98,4% de assertividade. Para árvores da mesma espécie, a média de classificação correta dos modelos baseados em NIR foi acima de 90% e para discriminar espécies diferentes a classificação correta chegou a 99,2%. Os melhores resultados para classificação correta das espécies foram obtidos com espectros adquiridos próximo a medula, chegando a 100% de acerto. Os menores percentuais de classificação das espécies foram obtidos com a abordagem baseada na calibração com espectros coletados via esfera de integração e validação independente com espectros coletados via fibra óptica.

Palavras-chave: NIRS. Identificação de madeira. Tecnologia de madeira

ABSTRACT

In the wood production chain, problems associated with the scientific determination of species have become one of the main obstacles in the product's valuation. Errors in the association of scientific names based on common names are rooted in forest inventories - IF and continue along the entire chain, resulting in economic and ecological losses hitherto immeasurable due to the lack of tools that can help to find and correct them. From this perspective, there is a clear need to improve the species determination process so that IFs are carried out in a more consistent manner. Within this context, the present study aimed to evaluate the potential of spectroscopy in the near infrared - NIR, to discriminate wood from forest species occurring in the Amazon, based on multivariate data analysis. Samples from 6 forest species were used, namely: *Manilkara elata* (Ducke) Chevalier; *Dinizia excelsa* Ducke; *Goupia glabra* Aubl. ; *Hymenaea* sp. ; *Micropholis melinoniana* Pierre and *Copaifera* sp. The samples were collected in the municipality of Portel / PA, within the area of the Sustainable Forest Management Plan - PMFS of the company ABC Norte-Fazenda Pacajá, and each species was represented in the study by 3 trees, with 1 disc being collected at the base of each tree. for the production of the samples. Of the 18 trees used, 350 cubic samples and 18 radial drumsticks were produced, the latter to assess the effect of the collection position in the transverse plane towards the marrow-bark. For the purposes of analysis, the type of finishing of the parts (chainsaw and circular saw), the spectral acquisition path (optical fiber and integration sphere), the type of validation of the models (cross and independent) and the application of mathematical pre-treatment to the spectral signature. With the specimens, 1,400 spectra were acquired in the cubic samples and 528 spectra in the radial drumsticks. The results indicated that the wood samples processed with a circular saw resulted in a surface with better interaction with radiation in the NIR and the models presented higher percentage values of classification. The integration sphere was the path of spectral acquisition that generated spectra that resulted in models with higher percentage values of correct classification of wood samples. Spectroscopy in the NIR associated with multivariate statistics was able to differentiate samples produced by chainsaw and circular saw with 98.4% assertiveness. For trees of the same species, the average of correct classification of the models based on NIR was above 90% and for discriminating different species the correct classification reached 99.2%. The best results for correct species classification were obtained with spectra acquired near the spinal cord, reaching 100% accuracy. The lowest percentages of species classification were obtained with the approach based on calibration with spectra collected via the integration sphere and independent validation with spectra collected via optical fiber.

Keywords: NIRS. Wood identification. Wood technology

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Desenho esquemático mostrando a divisão do espectro de luz com destaque ao infravermelho	23
Figura 2 - Resumo das etapas da pesquisa	35
Figura 3 - Localização geográfica da área do estudo	36
Figura 4 - Localização geográfica das árvores que deram origem as amostras (discos) na UPA 16, Fazenda Pacajá, Portel, Pará.	37
Figura 5 – Desenho esquemático mostrando o procedimento de retirada do disco da seção transversal da base do fuste de cada árvore das espécies selecionadas.	38
Figura 6 - Acondicionamento dos discos/amostras no LTPF/UFRA	40
Figura 7 - Fotos dos 18 discos coletados em campo	41
Figura 8 - Marcação dos discos para confecção dos corpos de prova	42
Figura 9 – Confecção dos corpos de prova, cubos (L:30mm x C:30mm x A:70mm) e baquetas (L:50mm x A:50mm e C: de acordo com o comprimento de cada disco no sentido medula casca).	43
Figura 10 - Baqueta retirada do disco para ser submetida a análise no NIR no plano transversal, sentido medula casca.	43
Figura 11 - Esquema demonstrativo da produção dos corpos de prova (cubos e baquetas).	44
Figura 12 - Espectrômetro Bruker conectado ao computador.	44
Figura 13 – Valores médios por espécie obtidos das assinaturas espectrais coletadas na face produzida com motosserra via esfera de integração nas amostras de madeira em forma de cubo	51
Figura 14 – Valores médios por espécie obtidos das assinaturas espectrais coletadas na face produzida com serra circular via esfera de integração nas amostras de madeira em forma de cubo	52
Figura 15 – Valores médios por espécie obtidos das assinaturas espectrais coletadas via fibra óptica nas amostras de madeira em forma de baqueta cortadas com motosserra	52
Figura 16 – Valores médios por espécie obtidos das assinaturas espectrais coletadas via esfera de integração nas amostras de madeira em forma de baqueta cortadas com motosserra	53
Figura 17 – Resultado da PCA em 1ª derivada dos espectros coletados nos cubos de madeira das seis espécies estudadas considerando o tipo de acabamento da superfície.	54
Figura 18 - Resultado da PCA em 2ª derivada das amostras de madeira em forma de cubo considerando as faces produzidas com motosserra (A) e serra circular (B) para análise exploratória das similaridades espectrais das seis espécies estudadas	56

- Figura 19 – Espectros coletados nas três baquetas de *Copaifera* sp. em diferentes posições no sentido medula-casca. (medula: próximo de 1) 73
- Figura 20 - Espectros coletados nas três baquetas de *Dinizia excelsa* Ducke em diferentes posições no sentido medula-casca. (medula: próximo de 1) 74
- Figura 21 - Espectros coletados nas três baquetas de *Manilkara elata* (Ducke) Chevalier em diferentes posições no sentido medula-casca. (medula: próximo de 1) 74
- Figura 22 - Espectros coletados nas 3 baquetas de *Hymenaea* sp. em diferentes posições no sentido medula-casca. (medula: próximo de 1) 75

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Regiões espectrais do infravermelho	23
Tabela 2 – Identificação/codificação das amostras coletadas em campo	39
Tabela 3 – Espécies, quantidade de corpos de prova (cubos e baquetas) e número de espectros coletados em cada amostra.	45
Tabela 4 - Resultado da PLS-DA dos espectros coletados nos cubos de madeira, com valores percentuais de acertos na validação cruzada, em diferentes tratamentos matemáticos	54
Tabela 5 - Matriz de confusão com quantitativo de acertos e erros de classificação do modelo resultante da PLS-DA em 1ª derivada dos espectros coletados nos cubos	55
Tabela 6 - Resultado da PLS-DA com percentuais de acertos da validação cruzada, em diferentes tratamentos matemáticos para os espectros coletados nas amostras de madeira em forma de cubo.	58
Tabela 7 - Matriz de confusão com quantitativo de acertos e erros de classificação do modelo resultante da PLS-DA em 2ª derivada dos espectros coletados nos cubos, adquiridos via esfera de integração, considerando a face produzida com motosserra e validação cruzada	59
Tabela 8 - Matriz de confusão com quantitativo de acertos e erros de classificação do modelo resultante da PLS-DA em 2ª derivada dos espectros coletados nos cubos, adquiridos via esfera de integração, considerando a face produzida com serra circular e validação cruzada.	59
Tabela 9 - Resultado da PLS-DA com percentuais de acertos da validação independente, em diferentes tratamentos matemáticos para os espectros coletados nas amostras de madeira em forma de cubo.	61
Tabela 10 - Matriz de confusão com quantitativo de acertos e erros de classificação do modelo resultante da PLS-DA em 2ª derivada dos espectros coletados nos cubos na face produzida com motosserra e validação independente	62
Tabela 11 - Matriz de confusão com quantitativo de acertos e erros de classificação do modelo resultante da PLS-DA em 2ª derivada dos espectros coletados nos cubos de madeira na face produzida com serra circular e validação independente	63
Tabela 12 - Resultado da PLS-DA dos espectros coletados nos cubos de madeira, com percentuais de acertos da validação independente, considerando diferentes tratamentos matemáticos para modelos calibrados com espectros coletados nas superfícies produzidas com motosserra e validados com espectros coletados nas superfícies produzidas com serra circulara, para classificação das 6 (seis) espécies.	64

- Tabela 13 - Matriz de confusão com quantitativo de acertos e erros de classificação do modelo resultante da PLS-DA em 1ª derivada dos espectros coletados nos cubos, de madeira adquiridos via esfera de integração e considerando a calibração com espectros adquiridos na superfície produzida com motosserra e validação independente com espectros adquiridos na superfície produzida com serra circular. 65
- Tabela 14 - Resultado da PLS-DA dos espectros coletados nos cubos de madeira, com percentuais de acertos da validação cruzada considerando diferentes tratamentos matemáticos, espectros coletados nas superfícies produzidas com motosserra e serra circular e avaliando a capacidade do modelo em diferenciar árvores pertencentes a mesma espécie. 66
- Tabela 15 - Resultado PLS-DA dos espectros coletados nas baquetas, via fibra óptica, com percentuais de acertos da validação cruzada considerando diferentes tratamentos matemáticos, espectros coletados nas superfícies produzidas com motosserra e avaliando a capacidade do modelo em diferenciar as assinaturas espectrais adquiridas em diferentes posições no sentido medula-casca no plano transversal. 68
- Tabela 16 - Matriz de confusão com quantitativo de acertos e erros de classificação do modelo resultante da PLS-DA em Transmittance to Absorbance dos espectros coletados nas baquetas, adquiridos via fibra óptica, com validação cruzada e considerando os espectros adquiridos na superfície produzida com motosserra próximo a medula. 68
- Tabela 17 - Matriz de confusão com quantitativo de acertos e erros de classificação do modelo resultante da PLS-DA dos espectros coletados nas baquetas, com pré-tratamento matemático em 1ª derivada (15x2x1), adquiridos via fibra óptica, com validação cruzada e considerando os espectros adquiridos na superfície produzida com motosserra próximo a casca. 69
- Tabela 18 - Resultado PLS-DA dos espectros coletados nas baquetas, via esfera de integração, com percentuais de acertos da validação cruzada considerando diferentes tratamentos matemáticos, espectros coletados nas superfícies produzidas com motosserra e avaliando a capacidade do modelo em diferenciar as assinaturas espectrais adquiridas em diferentes posições no sentido medula-casca no plano transversal. 71
- Tabela 19 - Matriz de confusão com quantitativo de acertos e erros de classificação do modelo resultante da PLS-DA em 2ª derivada dos espectros coletados nas baquetas, adquiridos via esfera de integração, com validação cruzada e considerando os espectros adquiridos na superfície produzida com motosserra próximo a casca. 71

Tabela 20 – Resultado PLS-DA da validação independente utilizando espectros coletados nas baquetas, via esfera de integração, com aplicação de pré-tratamento em 2ª derivada e considerando a capacidade do modelo em classificar espectros coletados em diferentes posições da baqueta no sentido medula-casca. 72

Tabela 21 – Resultado da PLS-DA para modelos calibrados com espectros coletados via esfera de integração e validados com espectros coletados via fibra óptica. Todos adquiridos nas amostras em forma de baquetas em superfície produzida com motosserra, considerando a capacidade para classificação de espécies. 76

Tabela 22 - Matriz de confusão com quantitativo de acertos e erros de classificação do modelo resultante da PLS-DA em Absorbance to Transmittance dos espectros coletados nas baquetas, calibrado com espectros coletados via esfera de integração e validado com espectros coletados via fibra óptica, considerando os espectros adquiridos na superfície produzida com motosserra. 77

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A	Altura da amostra
AUTEF	Autorização de exploração florestal
C	Comprimento da amostra
CAP	Circunferência a altura do peito
DAP	Diâmetro a altura do peito
EMBRAPA	Empresa brasileira de pesquisa agropecuária
IAN	Instituto agrônomo do Norte
IBGE	Instituto brasileiro de geografia e estatística
IDHM	Índice de desenvolvimento humano municipal
IF	Inventário florestal
IM	Região intermediária
L	Largura da amostra
LMB	Laboratório multiusuário de biomateriais
LTPF	Laboratório de tecnologia de produtos florestais
MG	Estado de Minas Gerais
MMA	Ministério do meio ambiente
NIR	Infravermelho próximo
PA	Estado do Pará
PC	Região próxima a casca
PCA	Análise de componentes principais
PIB	Produto interno bruto
PLS-DA	Análise discriminante por mínimos quadrados parciais
PLS-R	Regressão dos mínimos quadrados parciais
PM	Região próxima a medula
PMFS	Plano de manejo florestal sustentável
POA	Plano de operação anual
RNA	Rede neural artificial
SISGEN	Sistema nacional de gestão do patrimônio genético e conhecimento tradicional associado
UFLA	Universidade federal de lavras
UFRA	Universidade federal rural da Amazônia
UPA	Unidade de produção anual
UT	Unidade de trabalho
VL	Variável latente

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	16
1.1 Questões científicas, hipóteses e objetivos	18
1.1.1 Questões científicas e hipóteses	18
1.1.2 Objetivos	19
1.1.2.1 Objetivo geral	19
1.1.2.2 Objetivos específicos	19
2 REVISÃO DE LITERATURA	20
2.1 Determinação Botânica	20
2.2 Espectroscopia no infravermelho próximo - NIR	22
2.2.1 Princípio da técnica	22
2.2.2 Aplicações da espectroscopia no NIR em madeira e seus subprodutos	23
2.3 Espécies estudadas	29
2.3.1 <i>Manilkara elata</i> (Ducke) Chevalier	29
2.3.2 <i>Hymenaea</i> sp.	30
2.3.3 <i>Copaifera</i> sp.	31
2.3.4 <i>Dinizia excelsa</i> Ducke	32
2.3.5 <i>Goupia glabra</i> Aubl.	33
2.3.6 <i>Micropholis melinoniana</i> Pierre	34
3 MATERIAL E MÉTODOS	35
3.1 Coleta de campo	35
3.1.1 Área de coleta	35
3.1.2 Coleta das amostras	36
3.2 Preparo das amostras	38
3.2.1 Codificação das amostras/discos	38
3.2.2 Dimensão, posição e marcação das amostras	40
3.2.3 Preparo dos corpos de prova (cubos e baquetas)	42
3.3 Coleta dos espectros no NIR para todos os corpos de prova (cubos e baquetas)	44
3.4 Análise dos dados	46
3.4.1 Análises estatísticas multivariadas	46
3.4.1.1 Análise de componentes principais (PCA)	46
3.4.1.2 Análise discriminante por mínimos quadrados parciais (PLS-DA)	47
3.5 Tipos de abordagens utilizadas no experimento	48
3.5.1 Efeito qualidade da superfície das amostras na capacidade de classificação do NIR	48
3.5.2 Discriminação de espécies comerciais produtoras de madeira	48

3.5.2.1 PLS-DA dos espectros coletados via esfera de integração nas amostras em forma de cubo com validação cruzada para faces produzidas com motosserra e serra circular, considerando as 6 espécies estudadas	49
3.5.2.2 PLS-DA dos espectros coletados via esfera de integração nas amostras em forma de cubo com validação independente para faces produzida com motosserra e serra circular, considerando as 6 espécies estudadas	49
3.5.2.3 PLS-DA com validação independente para modelos calibrados com espectros adquiridos via esfera de integração nas faces dos cubos produzidas com motosserra e validados de forma independente com espectros coletados na face dos cubos produzidas com serra circular, para classificação das 6 espécies estudadas	49
3.5.3 Discriminação de árvores da mesma espécie	49
3.5.4 Capacidade de classificação do NIR considerando as diferenças nas assinaturas espectrais obtidas em diferentes posições no sentido medula-casca do plano transversal do disco e o agrupamento dos espectros das árvores da mesma espécie	50
3.5.5 Capacidade de classificação do NIR considerando as diferenças nas assinaturas espectrais obtidas em diferentes posições no sentido medula-casca do plano transversal do disco e a análise individual das baquetas	50
3.5.6 Capacidade de classificação do NIR em modelos calibrados com espectros coletados via esfera de integração e validados com espectros coletados via fibra óptica, considerando as faces produzidas com motosserra	51
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	51
4.1 Efeito da qualidade da superfície das amostras na capacidade de classificação do NIR	53
4.2 Discriminação de espécies comerciais produtoras de madeira	55
4.2.1 Resultado da PLS-DA nos espectros coletados via esfera de integração nas amostras em forma de cubo com validação cruzada para faces produzidas com motosserra e serra circular, considerando as seis espécies estudadas	57
4.2.2 Resultado da PLS-DA dos espectros coletados via esfera de integração nas amostras em forma de cubo com validação independente para faces produzida com motosserra e serra circular, considerando as seis espécies estudadas	60
4.2.3 Resultado da PLS-DA com validação independente para modelos calibrados com espectros adquiridos via esfera de integração nas faces dos cubos produzidas com motosserra e validados com espectros coletados na face dos cubos produzidas com serra circular, para classificação das seis espécies estudadas	63
4.3 Discriminação de árvores da mesma espécie	66

4.4 Análise da capacidade de classificação do NIR considerando as diferenças nas assinaturas espectrais obtidas em diferentes posições no sentido medula-casca do plano transversal do disco e o agrupamento dos espectros das árvores da mesma espécie	67
4.5 Análise da capacidade de classificação do NIR considerando as diferenças nas assinaturas espectrais obtidas em diferentes posições no sentido medula-casca do plano transversal do disco e a análise individual das baquetas	72
4.6 Análise da capacidade de classificação do NIR em modelos calibrados com espectros coletados via esfera de integração e validados com espectros coletados via fibra óptica, considerando as faces produzidas com motosserra	75
5 CONCLUSÃO	78
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	79
ANEXOS	85
Anexo A - Autorização de Exploração Florestal AUTEF	85
Anexo B - Laudo de Determinação de madeiras	90

1 INTRODUÇÃO

A atividade econômica gerada pelo setor florestal é extremamente representativa para a composição do produto interno bruto – PIB do país. Dentro desse cenário, embora a cadeia produtiva florestal seja bastante diversificada e esteja vivendo momentos de intensificação em seus processos de regulação, a produção madeireira, em florestas nativas, desponta como sendo uma das possibilidades de investimento mais rentáveis e atrativas para o setor. A gigantesca diversidade existente no Bioma Amazônico por vezes apresenta-se como um grande desafio quando tratamos da determinação científica das espécies produtoras de madeira, gerando inúmeros erros e conseqüentes limitações para o desenvolvimento de pesquisas, bem como para as relações comerciais entre compradores e vendedores de produtos e subprodutos florestais. Culturalmente são atribuídos diversos nomes populares para uma mesma planta, podendo haver variações de acordo com a região de ocorrência daquele vegetal, portanto, a diversidade de nomes vernaculares na Amazônia dificulta sobremaneira a determinação correta das plantas regionais.

Quando se trata de Plano de Manejo Florestal Sustentável - PMFS, que em última análise é um documento robusto que representa a culminância de todas as ações pré-exploratórias, exploratórias e pós-exploratórias, bem como o conjunto de estratégias para mitigação de impactos e ações de monitoramento da flora e da fauna, remete-se imediatamente a necessidade de conhecimento da floresta que será objeto de exploração. Para o levantamento dessas informações os Engenheiros Florestais utilizam o Inventário Florestal - IF, respeitando a finalidade específica do processo de exploração que será conduzido.

Uma das maiores dificuldades e conseqüente desafio dos IF para exploração de madeira está na forma como se procede a determinação das espécies, pois não raramente são encontrados PMFS com erros aviltantes e as conseqüências disso se dão, não somente no erro estratégico de intervenção na floresta, mas geram significativos desconfortos dentro do mercado nacional e internacional, sem citar as penalidades legais impostas aos responsáveis em virtude do descumprimento de normas. Nessa perspectiva surge a imperativa necessidade de desenvolver ou adaptar ferramentas que permitam determinar as espécies para que os projetos se apresentem de forma mais consistentes quanto aos dados qualitativos da floresta a que se refere. Como exemplo emblemático das desastrosas conseqüências resultantes de erros de determinação, podemos citar os ocorridos com a *Manilkara elata* (Ducke) Chevalier, *Dinizia excelsa* Ducke, *Goupia glabra* Aubl., *Hymenaea* sp., *Micropholis melinoniana* Pierre e *Copaifera* sp., todas de ocorrência no bioma Amazônico, com significativo valor comercial e representam um grande

volume de madeira extraída das florestas, mas que por terem a sua determinação em campo realizada a partir da associação de nomes vulgares, podem reunir madeiras de diferentes espécies e, dessa forma, colocar no mercado produtos heterogêneos que certamente trarão prejuízos econômicos e ecológicos ao setor.

Outra situação recorrente na determinação de espécies, se dá em função da ausência de elementos que compõe o sistema reprodutivo do vegetal – material estéril / ausência de flores e frutos – tais ocorrências são frequentes nas apreensões de madeira, fruto das ações de fiscalização ambiental, pois em via de regra são encontradas cargas contendo madeira em tora já destopadas sem nenhum elemento florístico presente como folhas, flores e frutos. Nesses casos, o repertório disponível para determinação da espécie se restringe aos componentes encontrados na madeira. Apesar do estudo da anatomia da madeira ser secular, ainda não foram desenvolvidas tecnologias capazes de apresentar resultados seguros para determinação em campo de forma rápida, padronizada e precisa.

Estudos utilizando a espectroscopia no infravermelho próximo - NIR têm sido promissores para determinação de espécies florestais com amostras de madeira. Segundo Costa et al. (2018), a espectroscopia no NIR é uma técnica que fornece resultados rápidos exigindo pouco preparo dos materiais amostrados. Embora o uso da espectroscopia no NIR em produtos florestais venha crescendo nos últimos anos, ainda existem lacunas de conhecimento sobre essa técnica quando aplicada a madeira (PIGOZZO, 2011). A base da determinação de madeiras está principalmente na variação de suas características anatômicas e apesar do uso atual da espectroscopia no NIR na discriminação da espécie ser pouco conhecido, principalmente a relação do espectro com tais características, resultados de estudos indicam potencial promissor para esse uso (PIGOZZO, 2011). Um dos aspectos favoráveis ao investimento de pesquisas utilizando o NIR e seu aprimoramento para a discriminação de espécies está nas vantagens por ele oferecida, podendo ser citados como exemplo: a) Rapidez no resultado, pois em menos de 1 min a leitura pode ser processada em equipamento já calibrado; b) É caracterizado como método não destrutivo, significa que as amostras analisadas permanecem viáveis para uso; c) Apresenta precisão no resultado; d) O processo de preparo das amostras que serão submetidas a leitura é simples e rápido; e) O espectrômetro de NIR pode ser portátil e está facilmente disponível no mercado; f) O resultado em campo pode ser obtido em tempo real e g) O resultado final do processo de determinação não gera nenhum resíduo químico capaz de provocar impacto relevante ao ambiente.

É válido ressaltar que a interação do espectro no NIR com os materiais não expressa como resultado a simples identidade fisionômica do objeto, mas sim o tipo, a proporção, a

forma, a movimentação e o comportamento das moléculas que o compõe, tornando o resultado do processamento dessa interação mais complexo e rico em detalhes, permitindo que diferenças não visíveis em objetos de aparências semelhantes sejam reveladas.

A utilização de epítetos específicos atrelados a um processo de determinação corretamente validado e que considere, além das características dendrológicas, elementos físico-químicos presentes na estrutura anatômica da madeira, certamente trarão mais lisura ao método de determinação, colaborando para a redução expressiva na ocorrência de erros durante os levantamentos realizados para elaboração de IF.

A proposta do projeto de pesquisa justifica-se pela evidente necessidade de evolução em relação aos processos e métodos de determinação de espécies, utilizando tecnologia que seja capaz de reduzir os erros produzidos nos atuais métodos utilizados e buscando definir características discriminantes de espécies formando perfis padronizados.

Dentro desse contexto e considerando a singular necessidade de aprimoramento do processo de determinação de espécies florestais produtoras de madeira, a proposta do projeto de pesquisa objetivou avaliar o potencial da espectroscopia no NIR para discriminar madeiras de espécies florestais de ocorrência na Amazônia a partir de modelos multivariados. Para o desenvolvimento do trabalho, foram utilizadas amostras de 06 (seis) espécies florestais de ocorrência na Amazônia, a saber: *Manilkara elata* (Ducke) Chevalier; *Dinizia excelsa* Ducke; *Goupia glabra* Aubl.; *Hymenaea* sp.; *Micropholis melinoniana* Pierre e *Copaifera* sp.

1.1 Questões científicas, hipóteses e objetivos

1.1.1 Questões científicas e hipóteses

Questão (1): É possível discriminar espécies comerciais produtoras de madeira a partir da aquisição de espectros no NIR?

Hipótese (1): É possível discriminar espécies a partir de seus espectros porque as diferenças na composição química da madeira podem ser captadas pelo sensor ótico apesar de possíveis semelhanças macroscópicas.

Questão (2): As possíveis diferenças na assinatura espectral obtida no sentido medula-casca da secção transversal do disco de madeira, podem afetar a capacidade da técnica em discriminar espécies?

Hipótese (2): As assinaturas espectrais são sensíveis à variação radial das propriedades físicas, químicas e anatômicas da madeira, mas não são suficientes para afetar a capacidade da técnica em discriminar espécies.

Questão (3): Qual é o efeito da qualidade da superfície dos discos de madeira na capacidade de classificação de modelos baseados em NIR?

Hipótese (3): Existe diferença nos espectros obtidos em madeiras cuja superfície foi processada por motosserra e serra circular, e quanto mais regular for a superfície da madeira mais assertivo será o modelo de classificação de espécies.

1.1.2 Objetivos

1.1.2.1 Objetivo geral

Avaliar o potencial da espectroscopia no NIR para discriminar madeiras de espécies florestais de ocorrência na Amazônia a partir de modelos multivariados.

1.1.2.2 Objetivos específicos

- a. Avaliar o potencial da espectroscopia no NIR para discriminação de madeiras da mesma espécie e madeiras de espécies diferentes.
- b. Avaliar a influência das variações espectrais no sentido medula – casca na capacidade preditiva do modelo.
- c. Avaliar o efeito da qualidade da superfície da madeira produzida por motosserra e serra circular no desempenho de classificação dos modelos.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Determinação Botânica

Na última década muito se falou em sustentabilidade dos recursos naturais, termo que naturalmente nos remete, entre outros, a inclusão da correta e racional utilização das florestas nativas. Ocorre que um dos elementos fundamentais para que a tão dita sustentabilidade seja, de fato, um dos precursores do desenvolvimento civilizatório, é o real conhecimento do que existe disponível no ambiente natural.

O manejo de florestas nativas pressupõe, como condição *sine qua non*, um IF bem elaborado que consiste, principalmente, na determinação ou no próprio reconhecimento preciso das espécies existentes na floresta analisada. Infelizmente o preâmbulo aborda uma questão que, fatalmente, ainda não se apresenta superada dentro da ciência florestal, pois quando tratamos da determinação ou reconhecimento de espécies ainda não existe uma padronização entre as nomenclaturas vernacular e científica. Uma espécie pode receber diversos nomes vernaculares, bem como várias espécies podem ser designadas por um único nome vernacular (MARTINS-DA-SILVA et al., 2003).

A utilização da nomenclatura vernacular durante as transações comerciais de madeira, implica em consequências financeiras graves e em alguns casos, irreparáveis. Pode-se exemplificar o caso do “tauari”, que designa popularmente algumas espécies de Lecythidaceae, até mesmo de diferentes gêneros. Por se tratarem de diferentes gêneros, as propriedades físicas e mecânicas, os dados tecnológicos, secagem, trabalhabilidade, durabilidade, rendimento na serraria e o uso da madeira podem ser diferentes, pois são peculiares à espécie; podendo não fornecer a qualidade esperada do produto como um todo e causar a diminuição do preço ou a perda do mercado durante a comercialização (MARTINS-DA-SILVA et al., 2003).

Procópio et al. (2008), mostraram a importância da determinação botânica nos inventários florestais através do estudo do *Couratari* spp. e *Cariniana* spp., onde concluíram que a adoção de um único nome científico pelas empresas madeireiras para designar o grupo “tauari”, mascara as informações sobre a diversidade e densidade das espécies, impossibilita o conhecimento da estrutura da população e comprometendo a relação de confiabilidade entre comprador e vendedor no uso final da madeira.

Segundo Zenid et al. (2007), a classificação de uma árvore, matéria-prima para a produção de madeira serrada, é realizada considerando principalmente os seus órgãos

reprodutores (flores e frutos), como também outras características morfológicas da árvore (casca, folhas etc.).

No tocante as afirmações acima, observa-se que além da falta de padronização para a correta determinação botânica das espécies florestais é pertinente lembrar que em muitos casos o repertório de material vegetal disponível para a discriminação das espécies é limitado ou restrito apenas a madeira, senão vejamos, os inúmeros casos de apreensões de cargas de madeira, seja em tora ou serrada, durante operações de fiscalização. Nesses casos, o agente fiscalizador não pode dispor de material florístico para auxiliar na individualização ou discriminação das espécies e conferir se aquela carga, objeto de investigação, está ou não em consonância com a documentação que autorizou o seu corte e transporte. É nesse contexto que a anatomia da madeira tem demonstrado ser uma excelente ferramenta alternativa para se obter uma determinação científica de uma madeira ou árvore, com bom grau de confiabilidade (ZENID et al., 2007).

Conceitualmente a anatomia da madeira pode ser definida como o ramo da ciência que analisa e descreve o arranjo dos elementos celulares do lenho das árvores, constituindo-se em valiosa ferramenta para a determinação das espécies tropicais (RAMALHO, 1975).

Apesar da existência de muitos estudos relacionados a caracterização e determinação de espécies florestais por meio de amostras de madeiras, na Amazônia é comum espécies diferentes serem tratadas com o mesmo nome popular devido a semelhança externa das propriedades organolépticas, principalmente a cor, o cheiro, textura e durabilidade. Essas características, aliadas ao difícil reconhecimento empírico das estruturas a olho nu, tem ocasionado trocas involuntárias no comércio madeireiro amazônico (REIS, 2015), fato que deixa evidente a difundida prática de determinação de madeira considerando, primordialmente, as características organolépticas apresentadas pela amostra. Segundo Zenid et al. (2007), a determinação de madeiras por práticas populares é realizada levando em conta somente as características organolépticas. Por serem variáveis e também devido à semelhança das mesmas em diferentes espécies, estas características, em muitos casos, não levam à determinação correta da madeira, não devendo ser utilizada separada das anatômicas. Para Alves et al. (2013), o estudo anatômico é realizado por descrições macroscópicas e microscópicas, sendo a última mais detalhada e precisa.

Quando a determinação de madeira lança mão do estudo anatômico, certamente, o nível de precisão tende a melhorar, ainda sendo possível observar falhas conforme a experiência, a percepção subjetiva de quem está identificado e o nível de complexidade das espécies analisadas. Para Guimarães et al. (2017), o grupo de árvores conhecido popularmente por

“canela” representa hoje um grande desafio para os anatomistas quando se trata de tentar separar as espécies pelas características da madeira.

Não menos importante é considerar o tempo relativamente grande e estrutura necessária para dispor da análise anatômica, pois além das observações qualitativas é necessária uma série de medições macro e microscópicas para caracterização e descrição da madeira.

Outro aspecto relevante a ser ponderado ao fazer uso da anatomia para distinção de espécies está relacionado a variabilidade da composição do lenho dentro das populações. Burley (1982) observou que variações morfológicas e anatômicas entre árvores da mesma espécie podem ocorrer dentro de uma determinada população. Em alguns casos, as variações ocorrem dentro do mesmo espécime quando analisadas diferentes regiões do xilema, segundo Dickison, (2000), o lenho pode apresentar diversidade estrutural, resultante de adaptações funcionais e associadas ao hábito das plantas e das condições edafo-climáticas. Klitzke (2008), em experimento realizado com *Hymenaea* sp. em diferentes regiões do lenho, concluiu pela não possibilidade do agrupamento dos lenhos em virtude das diferentes características físicas e químicas.

Tendo em vista a grande complexidade do processo de determinação de espécies, comumente observa-se o uso inadequado da madeira causado por erros de determinação, e uma consequência pode ser observada na construção civil com o comprometimento da vida útil e da segurança das estruturas e edificações (CURY et al, 2011), fato que direciona o desenvolvimento de pesquisas para a busca de soluções eficientes em relação a determinação de madeiras, atendendo a critérios de precisão, padronização, celeridade e custo acessível.

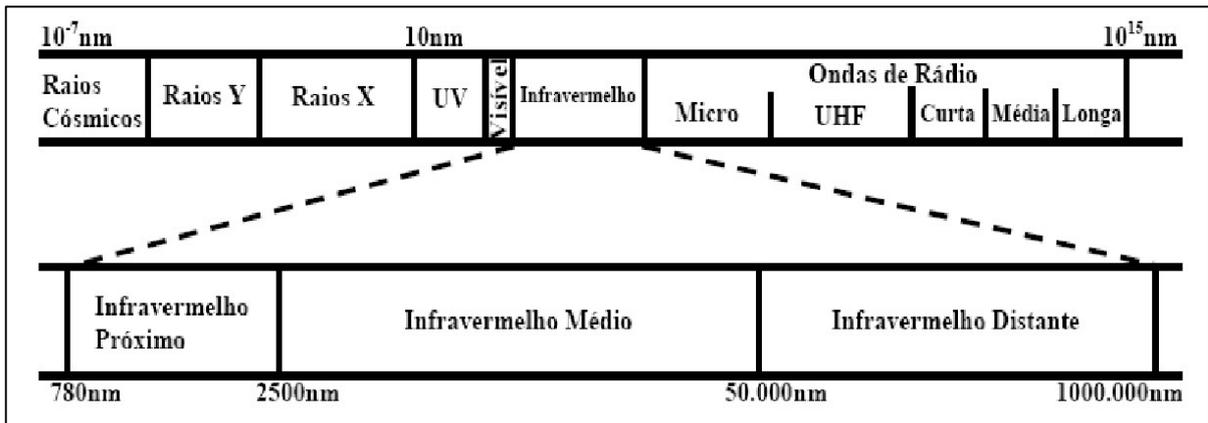
2.2 Espetroscopia no infravermelho próximo - NIR

2.2.1 Princípio da técnica

Em 1800 o astrônomo alemão Sir Frederick William Herschel publicou artigo que descreveu o comportamento do espectro da radiação solar em relação aos efeitos da temperatura (Herschel, 1800). Seus estudos basearam-se na decomposição da luz através de um prisma e a posterior aferição das temperaturas nas diferentes cores resultantes do processo de decomposição, observando-se uma gradativa elevação da temperatura quanto mais próximo da cor vermelho o medidor era posto. Herschel observou, ainda, que após o feixe de luz de cor vermelho, mesmo não sendo capaz de visualizar nenhuma coloração, temperaturas ainda maiores puderam ser registradas, demonstrando a existência latente de componentes da luz que

não eram visíveis ao olho humano, o qual ele chamou de raios invisíveis e que posteriormente foi denominado infravermelho (Figura 01), sendo dividido em três sub-regiões, a saber: i. Infravermelho próximo - NIR; ii. Infravermelho médio - MIR e iii. Infravermelho distante – FIR (Tabela 01).

Figura 1 – Desenho esquemático mostrando a divisão do espectro de luz com destaque ao infravermelho



Fonte: Araújo, 2007

Tabela 1- Regiões espectrais do infravermelho

Região	Intervalo de número de onda (cm^{-1})	Região em comprimento de onda (nm)	Região de frequência (hz)
<i>Próximo (NIR)</i>	<i>12.800 a 4.000</i>	<i>780 a 2.500</i>	<i>$3,8 \times 10^{14}$ a $1,2 \times 10^{14}$</i>
<i>Médio (MIR)</i>	<i>4.000 a 200</i>	<i>2.500 a 5.000</i>	<i>$1,2 \times 10^{14}$ a $6,0 \times 10^{12}$</i>
<i>Distante (FIR)</i>	<i>200 a 10</i>	<i>5.000 a 100.000</i>	<i>$6,0 \times 10^{12}$ a $3,0 \times 10^{11}$</i>

Fonte: Valderrama (2005)

O princípio da espectroscopia baseia-se na interação das ondas eletromagnéticas com os constituintes da matéria, gerando um resultado gráfico que chamamos de assinatura espectral. Para o espectro de luz, na região do NIR, essa interação ocorre entre o intervalo de comprimento de ondas que vai de 780 nm à 2.500 nm e as ligações moleculares do material amostrado (PASQUINI, 2003).

2.2.2 Aplicações da espectroscopia no NIR em madeira e seus subprodutos

Muñiz et al. (2012), publicaram trabalho com o objetivo de fornecer uma revisão sobre a técnica da espectroscopia no NIR e sua aplicação no setor florestal, concluindo que ele tem

se mostrado uma ferramenta rápida e eficiente para substituição dos diversos ensaios que determinam a qualidade da madeira.

Viana et al. (2016), utilizaram o NIR com objetivo de estabelecer modelos multivariados para estimar os índices de cristalinidade e a resistência à tração e à ruptura de filmes celulósicos e nanocelulósicos, ao final do experimento concluíram que a espectroscopia no NIR tem potencial de estimar o índice de cristalinidade e as propriedades de resistência de filmes de celulose e nanocelulose.

Baldin et al. (2018), compararam métodos alternativos de preparação de amostras para o desenvolvimento de modelos com utilização de espectros no NIR para avaliação de propriedades químicas da madeira. A análise incluiu a variação no teor de umidade e tamanho de partícula na precisão dos modelos para prever quantitativos de lignina total e holocelulose na madeira. A influência do método de preparação de amostras na precisão dos modelos foi comparada por análise estatística e no geral, a moagem para um tamanho de partícula maior e a secagem à temperatura ambiente (LPRT) não diminuíram a precisão dos modelos de previsão quando comparados ao método de preparação da amostra (TRAD).

Zanuncio et al. (2018), utilizaram a espectroscopia no NIR para estimar o conteúdo de umidade de equilíbrio (CEM), estabilidade dimensional, rigidez e resistência de amostras de madeiras de *Eucalyptus urophylla* e *Pinus oocarpa*, tratadas termicamente. Os espectros no NIR foram registrados e correlacionados com as propriedades da madeira determinada em laboratório usando estatística multivariada. Foi possível desenvolver modelos satisfatórios para e o modelo de edema volumétrico apresentou melhores estatísticas quando foram consideradas apenas amostras de eucalipto.

O NIR também pode ser utilizado para testar a eficiência e classificar produtos derivados de madeira para fins energéticos. Recentemente estudos com NIR foram desenvolvidos para estabelecer modelos multivariados para estimar o rendimento gravimétrico da carbonização (GCY), a densidade relativa aparente (ARD) e a temperatura final de carbonização (FCT) de carvão de eucalipto. O resultado do estudo obteve 100% de assertividade, exceto à temperatura de 500 °C (97,5%) com classificação das amostras realizadas em grupos de temperatura de carbonização por meio de PLS-DA (COSTA et al., 2018).

Costa et al. (2019), aplicaram o NIR juntamente com estatísticas multivariadas para classificar carvão vegetal comercial para uso doméstico em categorias e estimar sua qualidade. Os resultados da análise de componentes principais - PCA dos espectros não foram capazes de distinguir grupos indicando alta heterogeneidade entre os tratamentos. No entanto, os modelos com análise discriminante por mínimos quadrados parciais - PLS-DA classificaram

corretamente até 95% das amostras de carvão, tanto em função dos produtores quanto pelas classes de qualidade. A espectroscopia no NIR, associada a análises multivariadas, apresentou potencial para ser uma técnica eficiente e rápida para classificar o carvão, demonstrando que os modelos PLS-DA podem ser aplicados em amostras de carvão desconhecidas para uma classificação confiável.

Ramalho et al. (2019), avaliaram, com base nos dados obtidos através da espectroscopia no NIR, a influência do tamanho de partícula de amostras de carvão nas estatísticas preditivas do modelo de composição química do carvão de acácia e eucalipto. Foram submetidos a PCA e regressão dos mínimos quadrados parciais - PLS-R para estimar os valores de material volátil, cinza e teor de carbono fixo. As estimativas em *Eucalyptus* com base no NIR foi mais precisa usando espectros de pó de menor tamanho de partícula.

Ramalho et al. (2017), analisaram o potencial da espectroscopia no NIR para distinguir amostras de carvão produzido com madeira de florestas plantadas e nativas. Para montar o experimento foram utilizadas espécies florestais madeireiras do Cerrado - *Cedrela* sp., *Aspidosperma* sp., *Jacaranda* sp. e *Apuleia* sp. - e clones de eucalipto. Foram pirolisadas em condições de escala laboratorial bem controladas com temperaturas finais de 300°C, 500°C e 700°C, respectivamente. Para os registros observados, foram realizadas PCA e PLS-R, concluindo-se que a espectroscopia NIR associada à PCA não foi capaz de diferenciar os carvões produzidos a partir de madeiras nativas e plantadas quando as 270 amostras foram consideradas na mesma análise. No entanto, a separação do carvão vegetal nativo e plantado foi alcançada quando as amostras foram analisadas separadamente pela temperatura final de pirólise.

Já Rosado et al. (2019), desenvolveram modelos multivariados para estimar a quantidade de carboidratos não estruturais (amido, sacarose, açúcares redutores, açúcares totais e carboidratos não estruturais totais) com base em espectros no NIR adquiridos em madeira sólida e madeira reduzida a pó. Os melhores modelos preditivos foram obtidos a partir da madeira reduzida a pó.

Atualmente a utilização de espectros no NIR como ferramenta para análise dos constituintes de materiais protagoniza diversas áreas do conhecimento. Para as ciências florestais, a discriminação de espécies vem despontando como um dos principais potenciais dessa ferramenta, principalmente em virtude da clara necessidade de aprimorar o processo de determinação de espécies. Tecnologias emergentes para este fim, como o NIR, podem ajudar a resolver problemas relacionados com a determinação de espécies com eficácia (DURGANTE et al., 2013).

Pastore et al. (2011), testaram a eficácia de uma varredura NIR de fibra óptica com amostras de madeira maciça para separar *Swietenia macrophylla* King, *Carapa guianensis* Aubl., *Cedrela odorata* L. e *Micropholis melinoniana* Pierre, com leituras nos planos transversal, radial e tangencial para determinar se a superfície da qual os dados foram coletados influenciou os espectros registrados. Utilizou-se para calibração do equipamento 67 amostras e foram testadas 45. Os modelos discriminantes mostraram pequenos erros para cada espécie, indicando que determinações confiáveis podem ser feitas com NIR em superfícies de madeira maciça para essas espécies. Resultados semelhantes foram encontrados por Yang et al. (2015) que testaram a viabilidade do NIR para determinação de madeira de 3 espécies. A precisão do conjunto de testes chegou a 90%, concluindo-se que apesar de ser necessário mais investigações para afirmações seguras, pode-se inferir que a ferramenta tem grande potencial para determinação de madeira.

A determinação de peças de madeira também pode ser realizada dentro da indústria, nos casos em que os dados fornecidos pelo vendedor ou mesmo o próprio levantamento de campo não transmitirem segurança necessária ao interessado. Testes com a aplicação da espectroscopia no NIR e análise exploratória de dados foram utilizados na indústria de móveis para caracterização de 44 amostras de 19 diferentes tipos de madeiras com PCA. Ao final, a metodologia proposta mostrou-se eficiente na separação de algumas amostras, mas estudos complementares precisam ser realizados para a difusão desta metodologia no cotidiano da indústria moveleira, além da necessidade de construir um banco de dados de espectros no NIR com os diferentes tipos de madeiras utilizadas e identificadas, também, quanto a sua origem e fornecedores (BASTOS et al., 2012).

Identificar plântulas nos primeiros estágios de vida também apresenta-se como uma questão recorrente nas ciências florestais. Para os casos onde estão disponíveis componentes vegetais como folhas, a espectroscopia no NIR demonstrou ser eficaz na discriminação de espécies de plantas em estágio adulto, logo, se indivíduos jovens e adultos possuírem uma assinatura espectral semelhante, funções discriminantes baseadas em leituras espectrais de indivíduos adultos poderiam ser usadas para identificar plântulas. Testes com 429 espécimes de 16 espécies dentre os gêneros *Protium* e *Crepidospermum* (Bursaceae) foram analisadas e como resultado obteve-se uma média, sobre todas as espécies, de 75% de acertos nas identificações dos jovens. Acerto de 99% quando jovens e adultos foram incluídos na função discriminante e apenas três espécies tiveram baixas predições (27-60%), concluindo que o NIR tem um elevado potencial na determinação de espécies, mesmo em diferentes estágios (LANG, 2014).

Testes mais ousados com a utilização de Redes Neurais Artificiais – RNA associado a espectroscopia no NIR, foram realizados para a classificação de quatro espécies. Foram realizados três testes para comprovar a eficiência da capacidade de reconhecimento, obtendo-se resultados promissores visto que a RNA utilizada revelou-se flexível aos ruídos e distorções existentes, não exigindo que os espectros passassem por prévio tratamento estatístico ou fossem separados por grupos relativos ao tipo de corte anatômico da madeira (OLIVEIRA et al., 2015). Ainda associado a RNA, Costa et al. (2019), desenvolveram modelos para estimar a secura da polpa de celulose em compressas com base na associação dos espectros NIR e RNA. Os resultados indicaram que o NIR combinado com análise multivariada e análise das RNA constituem uma ferramenta promissora para monitorar a variação de peso devido à desidratação das polpas de celulose em tempo real.

Pastore et al (2011) investigaram a viabilidade do uso da espectroscopia no NIR para discriminação de madeira, o mogno (*Swietenia macrophylla* King.), andiroba (*Carapa guianensis* Aubl.), Cedro (*Cedrela odorata* L.), e madeiras de curupixa' (*Micropholis melinoniana* Pierre) com a elaboração de 4 modelos de discriminação com base em PLS-DA com base em um conjunto de calibração composto por 88 amostras e um conjunto de teste com 44 amostras. Cada modelo correspondeu à discriminação de uma espécie de madeira. Os erros quadráticos médios observados nas previsões foram 0,14, 0,09, 0,12 e 0,06 para as discriminações de mogno, cedro, andiroba e curupixá, respectivamente. As separações das espécies obtidas com base na diferença dos valores previstos foi de pelo menos 0,38. Isso torna possível realizar discriminações seguras com uma probabilidade muito baixa de classificação incorreta de uma amostra. Este método pode ser considerado preciso e rápido

Dentre as inúmeras vantagens do uso da espectroscopia no NIR para a pesquisa florestal podemos citar a celeridade no alcance dos resultados e sua precisão, a não geração de resíduos após o processo e a não destruição das amostras analisadas. Testes de maneira não destrutiva foram realizados com NIR para fenotipagem das características da madeira em programas de melhoramento de *Eucalyptus benthamii*. Foi avaliado o desempenho do NIR na estimativa da densidade básica da madeira, lignina, extratividade, glicose, conteúdo de xilano e carboidratos totais. Modelos para caracteres de madeira foram realizados a partir de 481 árvores no teste de progênie de *E. benthamii* (4 anos). Os modelos preditivos com base no NIR mostraram capacidade satisfatória para estimar as propriedades químicas da madeira. (ESTOPA et al., 2017).

Costa et al. (2018), utilizaram o NIR para avaliar como a técnica de aquisição espectral na superfície da madeira e a qualidade da superfície influenciam a capacidade de modelos

parciais baseados em PLS-R para estimar a densidade do material. Os espectros no NIR foram registrados usando uma esfera integradora e uma sonda de fibra óptica nas superfícies tangencial, radial e transversal obtidas por serras circulares e de fita em 278 amostras de madeira de híbridos de eucalipto de seis anos. Os modelos mais promissores para prever a densidade da madeira foram gerados a partir de espectros obtidos da superfície transversal gerada pela serra de fita, através de uma esfera integradora. A qualidade da superfície afetou as informações espectrais e a robustez dos modelos preditivos com uma superfície mais áspera.

Trabalho recente utilizou o NIR para medir o quanto a ferramenta seria capaz de diferenciar carvão produzido com madeira de origem em florestas plantadas e florestas nativas. A PCA da informação espectral revelou que é possível distinguir madeira de florestas plantadas e nativas. A dispersão das pontuações no gráfico formado pelo primeiro e segundo componentes principais formaram dois grupos que permitiram diferenciar muito claramente os clones de eucalipto das matas nativas, concluindo que a técnica utilizando NIR associada a estatísticas multivariadas é promissora para discriminar espécimes de madeira de florestas plantadas e assim, identificar e prevenir fraudes (RAMALHO et al., 2018).

Pace et al. (2019) utilizaram a espectroscopia no NIR para discriminar 12 espécies produtoras de madeira com colorações distintas. O experimento considerou 699 espectros e utilizou análise estatística multivariada (PCA e PLS-DA) para avaliação e elaboração dos modelos classificatórios, sem aplicação de pré-tratamentos matemáticos, alcançando percentual de classificação para validação cruzada igual a 93,2% e validação independente 91%, demonstrando o potencial da técnica para discriminar e classificar espécies produtoras de madeira.

Santos et al (2020) aplicaram a espectroscopia no NIR para discriminar 4 espécies conhecidas como tauari. O experimento foi elaborado com 35 amostras de madeira maciça provenientes de 21 origens, os espectros foram coletados nos três planos de corte, foi utilizado o método de análise discriminante linear combinada com a análise de componentes principais e o melhor resultado para discriminação foi alcançado com aplicação de pré-tratamento matemático em 2ª derivada com percentuais de acerto variando entre 55,6 a 61,1 %, demonstrando que a técnica pode ser utilizada para efeitos de confirmação de identificação da espécie.

Soares et al (2017) utilizaram espectrômetro portátil para avaliar sua capacidade na discriminação de seis espécies de madeira tropical visualmente semelhantes usando PLS-DA (*Swietenia macrophylla*, *Cedrela odorata*, *Carapa guianensis*, *Erismia uncinatum*, *Micropholis melinoniana*, *Hymenea coubaril*). Os dados para o desenvolvimento e validação do modelo

levaram em consideração medições de laboratório e de campo. A exclusão de outlier foi realizada com base em Hotelling T2, resíduos Q e erros nos valores estimados das classes. As taxas de eficiência foram superiores a 90% para todas as espécies, mostrando que o NIR portátil combinado com PLS-DA conseguiu diferenciar essas espécies. O resultado estimula a aplicação de espectrômetros NIR de mão na fiscalização da exploração madeireira, o que pode contribuir com a preservação das espécies.

Rocha et al (2021) utilizaram a técnica de espectroscopia no NIR associada à quimiometria para a discriminação de folheado de madeira de madeiras com características gerais semelhantes (*Swietenia macrophylla* King; *Carapa guianensis* Aubl.; *Cedrela odorata* L.; *Micropholis venulosa* Pierre e *Hymenaea coubaril* L.) em espectrômetro portátil. O desenvolvimento dos modelos de discriminação foi realizado usando o algoritmo PLS-DA. A detecção e subsequente a exclusão de outliers foi realizada com base nos resíduos de Hotelling T2, Q e erros na estimativa dos valores das classes. Os modelos PLS-DA mostraram uma eficiência entre 96,5% e 100% na discriminação das amostras. Em conclusão, a tecnologia NIRS portátil e os modelos PLS-DA foram adequados para a identificação rápida e discriminação dos folheados de madeira.

2.3 Espécies estudadas

Para o desenvolvimento desta pesquisa, foram selecionadas 6 espécies de ocorrência na Amazônia, com destaque ao Estado do Pará, a saber: *Manilkara elata*, *Dinizia excelsa*, *Goupia glabra*, *Hymenaea* sp., *Micropholis melinoniana* e *Copaifera* sp.

2.3.1 *Manilkara elata* (Ducke) Chevalier

Segundo Castro & Carvalho (2014), *Manilkara elata* (Ducke) Chevalier, é uma das espécies que tem a sua madeira mais colhida na Amazônia e comercializada no mercado nacional e internacional. A espécie é uma Sapotaceae que pode atingir cerca de 40 a 50 m de altura, com ocorrência generalizada na Amazônia, em áreas de terra firme, planalto e flanco (SOUZA et al., 2002), possui madeira pesada, dura e resistente, com densidade básica de aproximadamente $0,878 \text{ g.cm}^{-3}$ (SILVEIRA, 2013). Seu tronco é cilíndrico, apresenta ritidoma com fissuras profundas e de coloração marrom-acinzentada a escura, possui grã direita, textura fina a média, suas folhas são oblongas e discolores, com coloração verde na face adaxial e amarela na face abaxial. A floração ocorre principalmente nos meses de maio a julho, podendo

variar de acordo com as condições climáticas (EMBRAPA, 2004). Pode ser encontrada em várzea ou terra firme (HIRAI et al., 2008), (PENNINGTON, 1990). Suas sementes não apresentam dormência e possuem um comportamento recalcitrante ou intermediário (LEÃO; CARVALHO; OHASHI, 2001), além de fazerem parte do grupo ecológico de espécies tolerantes a sombra (CARVALHO, 2000).

Considerando as propriedades da madeira, a *Manilkara elata* é amplamente utilizada na construção civil e naval, para fabricação de cais para embarcações, torneados, chapas, instrumentos musicais, assoalhos e carroceria para caminhões (SOUZA et al, 2002). Pode ainda ser utilizada em cercas, implementos agrícolas, tacos para assoalhos, calçamento de ruas, dormentes, vigamentos, esteios, mourties, cavacos para cobrir casas e postes (LOUREIRO et al, 1968).

Anatomicamente possui poros visíveis apenas com auxílio de lente de 10x, diâmetro pequeno (menores que 100µm) com distribuição difusa, frequência média (de 6 a 30 vasos por 2mm²), predominantemente em múltiplos radiais (mais que 2/3), parênquima axial observado a olho nu, em faixas, em faixas estreitas ou em linhas. Raios observados apenas com auxílio de lente de 10x na superfície transversal ou invisível mesmo sob lente de 10x na superfície tangencial, não contrastados na superfície radial, são finos (menor que 100µm de largura), baixos (menor do que 1mm de altura), pouco frequentes (de 5 a 10 raios por mm) (CORADIN et al., 2010).

2.3.2 *Hymenaea* sp.

De acordo com Lorenzi (1992), *Hymenaea* sp. pode ser conhecida popularmente como jatobá, jataí, jataí-amarelo, jataí-peba, jataí vermelho, jitaí, farinheira, jataíba, burandã, imbiúva, jatobá-miúdo e jatobá da caatinga.

Segundo Rizzini (1971) e Heringer & Ferreira (1975), *Hymenaea* sp. é uma Leguminosae-Caesalpinioideae ocorre amplamente no Brasil e na América tropical. Algumas de suas espécies são ou foram importantes fontes de madeira para múltiplas finalidades, como *Hymenaea courbaril* L. na Amazônia e trópicos úmidos americanos.

O jatobá (*Hymenaea* sp.) é uma árvore de grande porte, podendo alcançar 30 a 40 metros de altura, possui predominantemente tronco reto, com cerca de 2 metros de diâmetro ou mais de 5 metros de rodo e casca espessa de até 3 centímetros. A árvore de jatobá tem ampla distribuição na América do Sul e América Central, do México até o Paraguai. Ocorre de forma dispersa nas matas de terra firme e de certas várzeas altas, mais frequentemente em solos

argilosos e pobres (SHANLEY, 2005). Segundo a mesma autora, no Pará, o jatobazeiro floresce durante a estação seca (março, abril e maio) e frutifica entre os meses de agosto, setembro e outubro, sua madeira é dura (densidade básica de aproximadamente $0,8 \text{ g.cm}^{-3}$) pesada e com excelente aceitação no mercado externo.

Ainda em relação a sua madeira, observa-se cerne e alborno distintos pela cor, cerne amarronzado sem alteração de cor por foto-oxidação, limites dos anéis de crescimento distintos, individualizados por parênquima marginal. Madeira com brilho nas superfícies longitudinais, cheiro imperceptível, dura ao corte transversal manual, Grã entrecruzada ou revessa, textura média (CORADIN et al., 2010).

É utilizada na construção civil nas cidades e, no interior, para fazer canoas. É muito valorizada por causa da durabilidade – comparável a maçaranduba, acapu, jarana, e outras madeiras resistentes. Ela é excelente porque não racha (SHANLEY, 2005).

Anatomicamente, apresenta poros presentes e visíveis a olho nu com diâmetro médio (de 100 a 200 μm) e distribuição difusa, possui frequência média (de 6 a 30 vasos por 2mm²), predominantemente solitários (mais que 2/3), dispostos em padrão não definido, de formato circular a oval. Parênquima axial observado a olho nu, em faixas, paratraqueal vasicêntrico ou aliforme losangular. Raios observados a olho nu na superfície transversal ou a olho nu na superfície tangencial, pouco contrastados na superfície radial, finos (menor que 100 μm de largura), baixos (menor do que 1mm de altura) e pouco frequentes (de 5 a 10 raios por mm) (CORADIN et al., 2010).

2.3.3 *Copaifera* sp.

Segundo Cascon, (2004) as espécies de *Copaifera* são conhecidas como copaíba, copaibeira, pau-de-óleo, copaúva e copai. São árvores comuns à América Latina e África Ocidental, sendo encontradas, no Brasil, nas regiões Sudeste, Centro-Oeste e Amazônica (FRANCISCO, 2005). Se apresenta na classificação botânica posicionado em Fabaceae e inclui 72 espécies descritas, sendo 16 delas encontradas exclusivamente no Brasil (Veiga Junior & Pinto, 2002; SHANLEY, 2005) (CASCON, 2004).

A copaíba é conhecida como antibiótico da mata, pois se apresenta como uma das plantas medicinais mais usadas na Amazônia, principalmente para tratar inflamações, através do seu óleo que pode ser extraído do tronco das árvores que podem atingir até 36 metros de altura e 140 centímetros de diâmetro. No Estado do Pará, seu período de floração ocorre na

estação chuvosa (entre janeiro e abril) e a frutificação se dá de maio até setembro (SHANLEY, 2005).

Há também grande interesse na madeira de algumas espécies de copaíba, pela sua superfície lisa, lustrosa, durável, de alta resistência ao ataque de xilófagos e baixa permeabilidade, que são características desejáveis para o uso na fabricação de peças torneadas e para a marcenaria em geral (CARVALHO, 1942). Por ter efeito repelente contra insetos sua madeira também é atrativa para a construção civil e fabricação de tábuas (SHANLEY, 2005). Possui densidade básica de aproximadamente $0,575 \text{ g.cm}^{-3}$.

Árvores de *Copaifera* apresentam cerne e alburno distintos pela cor, com cerne avermelhado e sem alteração de cor por foto-oxidação. Os limites dos anéis de crescimento são distintos, individualizados por parênquima marginal. A madeira não possui brilho nas superfícies longitudinais, apresenta cheiro perceptível e característico. É moderadamente dura ao corte transversal manual, possui grã direita, textura média. Anatomicamente observa-se poros presentes e visíveis a olho nu, com diâmetro médio de $100\mu\text{m}$ a $200\mu\text{m}$, distribuição difusa, frequência média de 6 a 30 vasos por 2mm^2 , predominantemente solitários (mais que $2/3$), dispostos em padrão não definido, de formato circular a oval. Suas placas de perfuração são observadas com auxílio de lente de 10x. Apresenta parte dos vasos obstruídos por substância de cor amarelada. Parênquima axial observado a olho nu, paratraqueal ou em faixas. Raios observados apenas com auxílio de lente de 10x nas duas superfícies, contrastados na superfície radial, finos (menor que $100\mu\text{m}$ de largura), baixos (menor do que 1mm de altura), muito pouco frequentes (menos de 5 raios por mm) ou pouco frequentes (de 5 a 10 raios por mm) (CORADIN et al., 2010).

2.3.4 *Dinizia excelsa* Ducke

Pertencente à família Fabaceae, *Dinizia excelsa* ocorre naturalmente na região Amazônica, principalmente nos estados do Amazonas, Pará, Acre, Rondônia, Roraima e Amapá. Considerada uma das maiores árvores da floresta amazônica, pode alcançar até 60 metros de altura. Na Amazônia, o nome angelim é atribuído a várias espécies de Leguminosae, principalmente dos gêneros *Dinizia*, *Hymenolobium*, *Vatairea* e *Vataireopsis*. *Dinizia excelsa* é conhecida no Pará como angelim vermelho (EMBRAPA, 2004), mas pode ser reconhecida também pelos nomes: angelim, angelim-falso, angelim-ferro, angelim-pedra, angelim-pedra-verdadeiro, dinizia-parda, faveira, faveira-carvão, faveira-dura, faveira-ferro, faveira-grande, gurupá (CORADIN et al., 2010). Ainda segundo Coradin et al (2010), a madeira da *Dinizia*

excelsa apresenta cerne e alburno distintos pela cor, com cerne amarronzado ou avermelhado, sem alteração de cor por foto-oxidação. Os limites dos anéis de crescimento são pouco distintos, sua madeira não apresenta brilho nas superfícies longitudinais, possui cheiro perceptível e desagradável. É dura ao corte transversal manual, sua grã é entrecruzada ou revessa e textura média.

Segundo o IBDF (1983), a madeira de angelim é utilizada na construção civil, construção de barcos, na confecção de móveis e implementos agrícolas. Possui uma densidade básica de $0,83 \text{ g.cm}^{-3}$. Anatomicamente a madeira de *Dinizia excelsa* possui parênquima axial visível a olho nu, predominantemente aliforme e formando arranjos oblíquos ou eventualmente em faixas marginais. Os raios são pouco visíveis a olho nu na face transversal e pouco distintos, mesmo sob lente, na face tangencial, não estratificados. Os poros são visíveis a olho nu, com frequência que vai de poucos a numerosos (até $24/\text{mm}^2$), solitários e múltiplos radiais obstruídos por uma substância avermelhada (FERREIRA et al., 2004).

2.3.5 *Goupia glabra* Aubl.

Goupia glabra pertence à Goupiaceae e possui duas espécies de ocorrência no Brasil concentradas na região Amazônica (WALTER, 2010). Popularmente pode ser reconhecida como: Bragantina, cachaceiro, copiúba, copiúva, cupiúba (PA), cupiúba-rosa, cupuba, cutiúba (MA), peniqueiro, peroba - bosta, peroba - fedida, peroba - fedorenta, peroba - do - norte (MT), perobinha e tento (Amazônia) (CAMARGOS, 2001).

São árvores de grande porte podendo alcançar 40 metros de altura, seu tronco é cilíndrico e compacto, com casca externa (ritidoma) áspera apresentando algumas “rachaduras”. A casca interna é dura e alaranjada. Possui pelos (tricomas) no caule, pecíolos, limbo foliar e inflorescências, principalmente no vegetal jovem. Suas folhas são pecioladas, limbo foliar ovalado e lanceolado ou elíptico. Ao tato, a folha apresenta textura de papel (cartáceo) ou de couro (subcoriáceo) (GURGEL, 2015). Sua densidade básica é de aproximadamente $0,710 \text{ g.cm}^{-3}$ (CORADIN et al., 2010).

Segundo Defilipps et al. (2004), a madeira da cupiúba pode ser empregada na produção de corantes e cosméticos, sendo indicada, também, para construção naval e civil, fabricação de vigas, caibros, ripas, batentes de porta e janelas, tábuas, móveis, carrocerias para obras externas, dormentes, postes, moirões, cruzetas, pontes e estacas. Pode, ainda, ser utilizada na área medicinal e ornamental.

Sua madeira apresenta cerne e alburno pouco distintos pela cor, seu cerne possui coloração amarronzado ou avermelhado, sem alteração de cor por foto-oxidação. Os limites de seus anéis de crescimento são pouco distintos, a madeira se apresenta sem brilho nas superfícies longitudinais, com cheiro perceptível e desagradável. É dura ao corte transversal manual, sua grã é entrecruzada ou reversa, possui textura média (CORADIN et al., 2010).

Segundo Coradin et al. (2010), anatomicamente a madeira da cupiúba apresenta poros presentes e visíveis apenas com o auxílio de lente de 10x, diâmetro pequeno (menores que 100 μ m) ou diâmetro médio (de 100 μ m a 200 μ m) com distribuição difusa, frequência baixa (até 5 vasos por 2mm²), predominantemente solitários (mais que 2/3), dispostos em padrão não definido, com formato circular a oval. Placas de perfuração não observadas mesmo com lente de 10x vasos desobstruídos, parênquima axial presente e observado somente com auxílio de lente de 10x, apotraqueal e apotraqueal difuso. Raios observados somente com lente de 10x nas duas superfícies, pouco contrastados na superfície radial, finos (menor que 100 μ m de largura), baixos (menor do que 1mm de altura) e pouco frequentes (de 5 a 10 raios por mm).

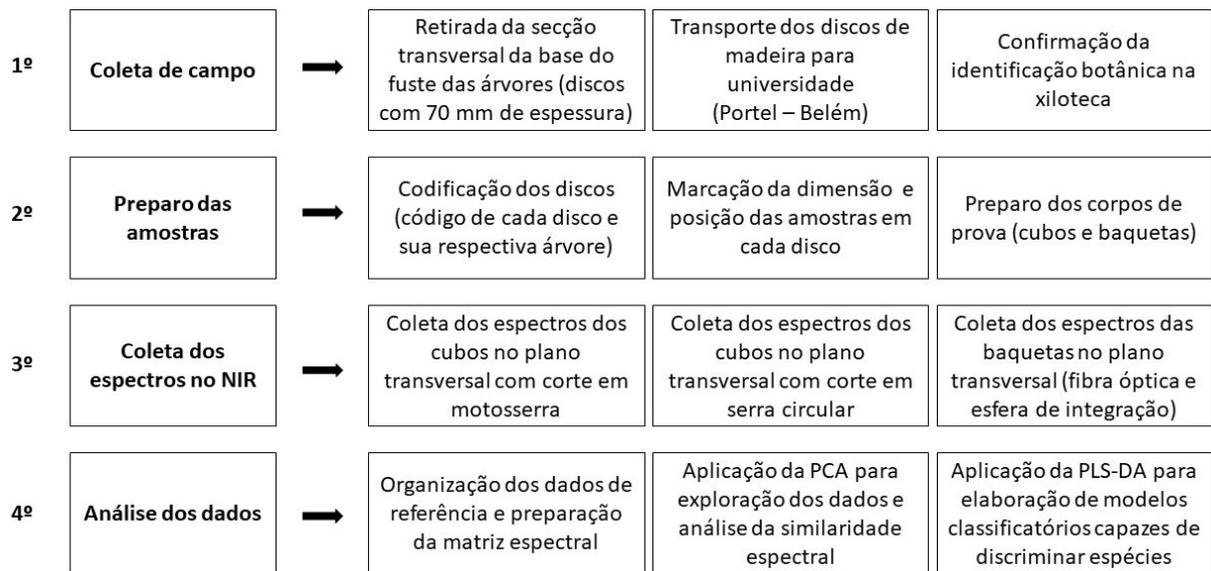
2.3.6 *Micropholis melinoniana* Pierre

Pertencente à Sapotaceae, *Micropholis melinoniana* Pierre também é conhecida popularmente como: Curupixá, currupixá e pau-de-sapo. Sua madeira apresenta cerne e alburno indistintos pela cor. Cerne com coloração rosado e sem alteração de cor por foto-oxidação. Os limites dos anéis de crescimento são pouco distintos e sem brilho nas superfícies longitudinais da madeira. Seu cheiro é imperceptível. Moderadamente dura ao corte transversal manual, possui grã direita e textura média. Anatomicamente apresenta poros presentes, visíveis apenas com auxílio de lente de 10x, diâmetro médio (de 100 μ m a 200 μ m), distribuição difusa, frequência média (de 6 a 30 vasos por 2mm²), proporções semelhantes de vasos solitários e em múltiplos radiais, com menos de 4 vasos e dispostos em cadeias radiais, de formato circular a oval. Placas de perfuração não observadas mesmo com auxílio de lente de 10x. Vasos desobstruídos. Parênquima axial observado apenas com auxílio de lente de 10x, sendo ele apotraqueal e difuso em agregados. Raios observados apenas com auxílio de lente de 10x nas duas superfícies ou invisível mesmo sob lente de 10x na superfície tangencial, pouco contrastados na superfície radial, finos (menor que 100 μ m de largura), baixos (menor do que 1mm de altura) e pouco frequentes (de 5 a 10 raios por mm). Madeira com densidade básica média de 0,50 g.cm⁻³ a 0,72 g.cm⁻³ (CORADIN et al., 2010).

3 MATERIAL E MÉTODOS

O trabalho foi realizado em quatro etapas e suas respectivas sub etapas, a saber: 1º. Coleta de campo; 2º. Preparo das amostras; 3º. Coleta dos espectros no NIR e 4º. Análise dos dados (Figura 2).

Figura 2 - Resumo das etapas da pesquisa



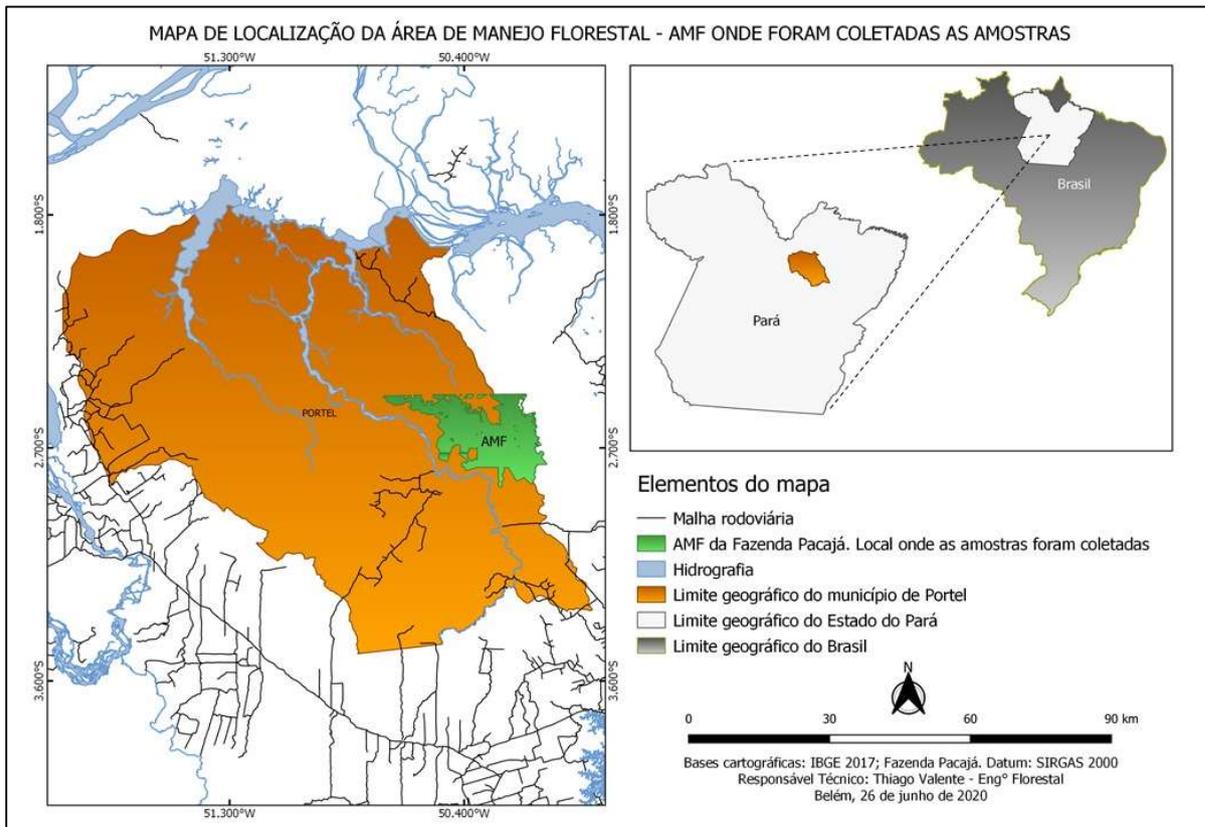
Fonte: Autor

3.1 Coleta de campo

3.1.1 Área de coleta

A área de estudo está situada no município de Portel, Estado do Pará (Figura 3). Portel possui extensão territorial de 25.384,960 km² e uma população estimada de 62.043 habitantes, o que resulta em uma densidade demográfica aproximada de 2,44 hab/km². Apenas 10,2% de sua população tem acesso a esgotamento sanitário adequado, 27,5% das vias públicas apresentam arborização, 7,1% de suas vias são urbanizadas e 89,7% da população entre 6 e 14 anos possui algum tipo de escolarização sendo o índice de desenvolvimento humano municipal – IDHM de 0,483 (um dos menores do Brasil). Seu PIB per capita é de R\$ 10.742,76 ocupando a 71ª posição para este índice dentro do Pará. O salário médio dos trabalhadores formais é 2,1 salários mínimos, sendo que a maior parcela de sua população (51%) ganha até 0,5 salário mínimo (IBGE, 2009/2017/2019).

Figura 3 - Localização geográfica da área do estudo



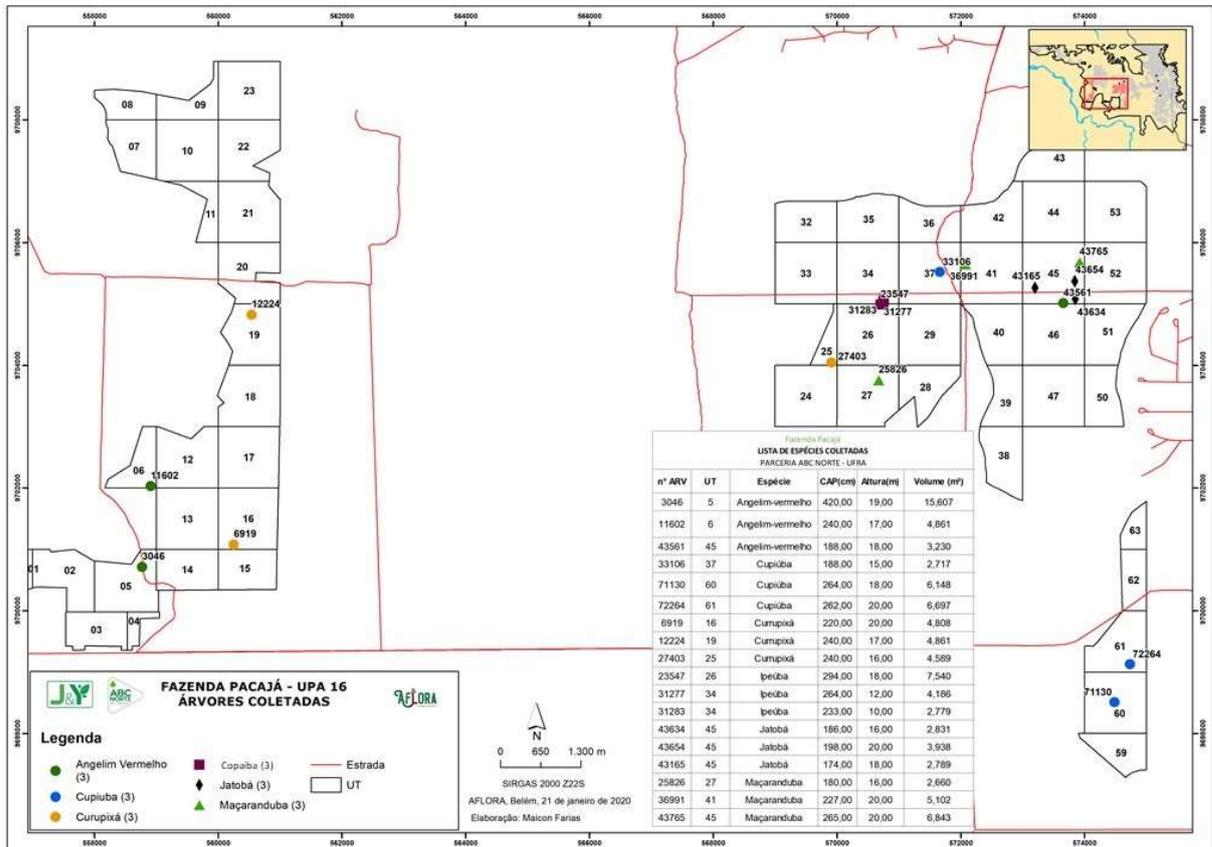
Fonte: Autor

3.1.2 Coleta das amostras

As amostras utilizadas para realizar o experimento foram coletadas de árvores localizadas na área do PMFS da empresa MADEIREIRA J. & Y/ABC Norte. A área está inserida no planalto rebaixado da Amazônia e é caracterizada por importante malha hídrica, apresentando elevados índices pluviométricos, possui clima predominantemente quente e úmido com temperatura anual média entre 26°C e 27°C e umidade relativa do ar superior a 85%, predominância do solo tipo Latossolo Amarelo e tipologia florestal definida como Floresta Ombrófila Densa (PMFS ABC Norte).

Foram selecionadas 6 espécies comercialmente exploradas na região, a saber: *Manilkara elata*, *Dinizia excelsa*, *Goupia glabra*, *Hymenaea* sp., *Micropholis melinoniana* e *Copaifera* sp. Para cada espécie foram selecionadas 3 árvores com qualidade de fuste para uso comercial e diâmetro a altura do peito (DAP) entre 55 cm e 135 cm, localizadas na UPA 16 (Figura 4).

Figura 4 - Localização geográfica das árvores que deram origem as amostras (discos) na UPA 16, Fazenda Pacajá, Portel, Pará.



Fonte: ABC Norte

O projeto encontrava-se devidamente licenciado pelo órgão ambiental estadual e todas as árvores utilizadas no trabalho de pesquisa estavam inseridas na Autorização de Exploração Florestal – AUTEF N°. 273389/2019, válida até 09/10/2021, com previsão de corte de acordo com o PMFS e seu respectivo Plano de Operação Anual – POA/2020 (Anexo A).

Para cada árvore selecionada foi extraído, com uso de motosserra, um “disco” da secção transversal localizado na base do fuste com aproximadamente 70 mm de espessura (Figura 5). Os discos não apresentavam defeitos, tais como: ataque de agentes xilófagos, manchas ou rachaduras em proporções significativas, medida adotada para reduzir as possíveis interferências nos resultados da interação do material com o NIR.

Figura 5 – Desenho esquemático mostrando o procedimento de retirada do disco da seção transversal da base do fuste de cada árvore das espécies selecionadas.



Fonte: Autor

Para fins de validação/confirmação da determinação das espécies, todas as amostras/discos coletados foram enviadas para a Xiloteca do Laboratório de Botânica João Murça Pires da Embrapa Amazônia Oriental, onde foram analisadas e emitido laudo com a determinação científica de cada amostra (Anexo B).

No processo de validação/confirmação foi detectado um erro de determinação para as amostras de madeira nomeadas em campo como *Macrolobium latifolium* Vogel, e após exame da madeira foi determinada como *Copaifera* sp. As amostras nomeadas em campo como *Hymenaea courbaril* L., tiveram a sua determinação taxonômica somente em nível de gênero, sendo as 3 amostras determinadas como *Hymenaea* sp. (Tabela 2).

3.2 Preparo das amostras

3.2.1 Codificação das amostras/discos

Após a confirmação da determinação das espécies, via laudo, emitido pela Embrapa, todas as amostras foram devidamente codificadas e seus códigos fixados a sua árvore de origem, bem como as variáveis de cada árvore mensuradas durante o inventário florestal (CAP, DAP, altura, volume, UPA, UT, Código da árvore, nome vernacular e nome científico), para fins de estabelecer possíveis correlações em trabalhos futuros (Tabela 2).

Tabela 2 – Identificação/codificação das amostras coletadas em campo

UPA	UT	Determinação em campo		Número da árvore (Código)	Determinação - Laboratório de Botânica EMBRAPA Amazônia Oriental		CAP (cm)	DAP (cm)	Altura (m)	Volume (m³)	Foto (figura 7)
		Vernacular	Científico		Vernacular	Científico					
16	5	Angelim-vermelho	<i>Dinizia excelsa</i>	3046	Angelim-vermelho	<i>Dinizia excelsa</i>	420,00	133,76	19,00	15,607	FOTO 01
16	6	Angelim-vermelho	<i>Dinizia excelsa</i>	11602	Angelim-vermelho	<i>Dinizia excelsa</i>	240,00	76,43	17,00	4,861	FOTO 02
16	45	Angelim-vermelho	<i>Dinizia excelsa</i>	43561	Angelim-vermelho	<i>Dinizia excelsa</i>	188,00	59,87	18,00	3,230	FOTO 03
16	37	Cupiúba	<i>Goupia glabra</i> Aubl.	33106	Cupiúba	<i>Goupia glabra</i> Aubl.	188,00	59,87	15,00	2,717	FOTO 04
16	60	Cupiúba	<i>Goupia glabra</i> Aubl.	71130	Cupiúba	<i>Goupia glabra</i> Aubl.	264,00	84,08	18,00	6,148	FOTO 05
16	61	Cupiúba	<i>Goupia glabra</i> Aubl.	72264	Cupiúba	<i>Goupia glabra</i> Aubl.	262,00	83,44	20,00	6,697	FOTO 06
16	16	Curupixá	<i>Micropholis melinoniana</i> Pierre	6919	Curupixá	<i>Micropholis melinoniana</i> Pierre	220,00	70,06	20,00	4,808	FOTO 07
16	19	Curupixá	<i>Micropholis melinoniana</i> Pierre	12224	Curupixá	<i>Micropholis melinoniana</i> Pierre	240,00	76,43	17,00	4,861	FOTO 08
16	25	Curupixá	<i>Micropholis melinoniana</i> Pierre	27403	Curupixá	<i>Micropholis melinoniana</i> Pierre	240,00	76,43	16,00	4,589	FOTO 09
16	26	Ipeúba	<i>Macrobium latifolium</i> Vogel	23547	Copaíba	<i>Copaifera</i> sp.	294,00	93,63	18,00	7,540	FOTO 10
16	34	Ipeúba	<i>Macrobium latifolium</i> Vogel	31277	Copaíba	<i>Copaifera</i> sp.	264,00	84,08	12,00	4,186	FOTO 11
16	34	Ipeúba	<i>Macrobium latifolium</i> Vogel	31283	Copaíba	<i>Copaifera</i> sp.	233,00	74,20	10,00	2,779	FOTO 12
16	45	Jatobá	<i>Hymenaea courbaril</i> L.	43634	Jatobá	<i>Hymenaea</i> sp.	186,00	59,24	16,00	2,831	FOTO 13
16	45	Jatobá	<i>Hymenaea courbaril</i> L.	43654	Jatobá	<i>Hymenaea</i> sp.	198,00	63,06	20,00	3,938	FOTO 14
16	45	Jatobá	<i>Hymenaea courbaril</i> L.	43165	Jatobá	<i>Hymenaea</i> sp.	174,00	55,41	18,00	2,789	FOTO 15
16	27	Maçaranduba	<i>Manilkara elata</i>	25826	Maçaranduba	<i>Manilkara elata</i>	180,00	57,32	16,00	2,660	FOTO 16
16	41	Maçaranduba	<i>Manilkara elata</i>	36991	Maçaranduba	<i>Manilkara elata</i>	227,00	72,29	20,00	5,102	FOTO 17
16	45	Maçaranduba	<i>Manilkara elata</i>	43765	Maçaranduba	<i>Manilkara elata</i>	265,00	84,39	20,00	6,843	FOTO 18

Fonte: Autor

Antes de iniciar o processo de preparo das amostras para coleta dos espectros no NIR, por questões de segurança e cumprimento da legislação, todos os discos de madeira foram devidamente cadastrados no Sistema Nacional de Gestão do Patrimônio Genético e do Conhecimento Tradicional Associado – SisGen, vinculado ao Ministério do Meio Ambiente – MMA recebendo código de cadastro: A6B4F02. O cadastro foi realizado dia 18 de fevereiro de 2020 às 17h57min.

3.2.2 Dimensão, posição e marcação das amostras

Os discos/amostras ficaram acondicionados no Laboratório de Tecnologia de Produtos Florestais – LTPF/UFRA, sem nenhum tipo de tratamento químico ou procedimento de secagem (Figura 6).

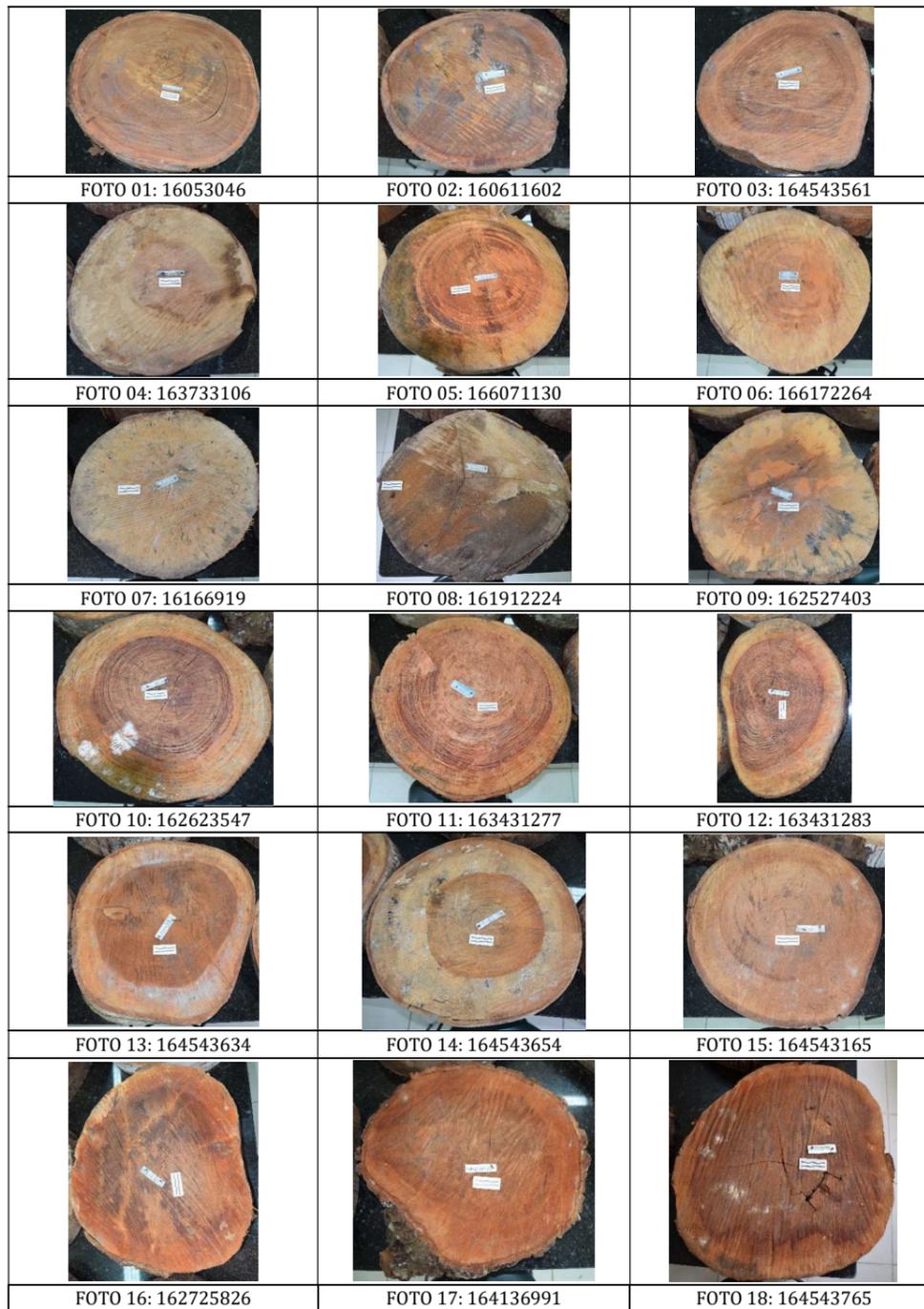
Figura 6 - Acondicionamento dos discos/amostras no LTPF/UFRA



Fonte: Autor

Os 18 discos foram fotografados individualmente antes da marcação e preparo das amostras, sendo devidamente associados as árvores que deram origem ao material (Figura 7).

Figura 7 - Fotos dos 18 discos coletados em campo



Fonte: Autor

Cada disco foi subdividido em três regiões distintas, a saber: a) Próximo a medula (PM); b) Intermediária (IM) e c) Próximo a casca (PC). Para cada região foram demarcadas amostras com dimensões de aproximadamente: L:30mm x C:30mm x A:70mm (L – largura; C – Comprimento e A – Altura). Para cada disco, também foi retirada uma amostra em forma de baqueta, para auxiliar na análise do efeito da posição de coleta dos espectros, considerando as possíveis variações espectrais no plano transversal, sentido radial – medula casca (Figura 8).

Figura 8 - Marcação dos discos para confecção dos corpos de prova



Fonte: Autor

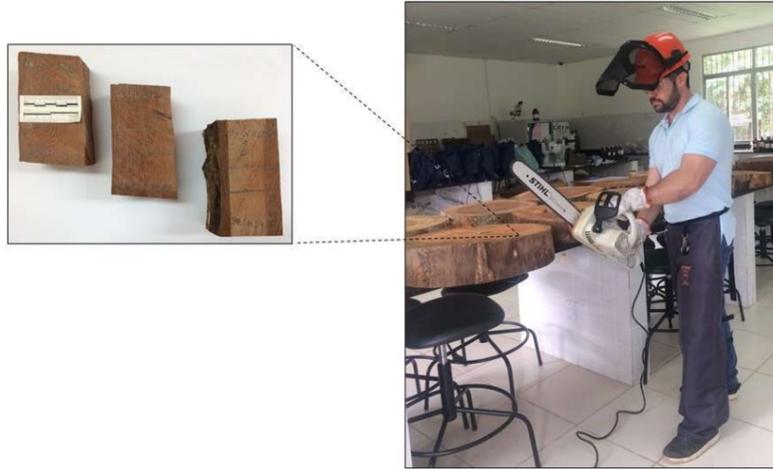
3.2.3 Preparo dos corpos de prova (cubos e baquetas)

A separação das amostras dos discos foi realizada em duas etapas, a primeira deu-se dentro do LTPF/UFRA e correspondeu a confecção dos corpos de prova com dimensões aproximadas: L:30mm x C:30mm x A:70mm e a confecção das baquetas correspondente a cada disco de dimensões aproximadas: L:50mm x A:50mm e C: de acordo com o comprimento de cada disco no sentido medula casca. Para essa etapa a

separação foi realizada de forma manual, com auxílio de motosserra elétrica (Figuras 9 e 10).

Em um segundo momento, cada corpo de prova produzido com as dimensões: L:30mm x C:30mm x A:70mm foi submetido a redução da dimensão A, que foi seccionada com uso de serra circular produzindo corpo de prova final em forma de cubo nas dimensões aproximadas: L:30mm x C:30mm x A:30mm. Essa etapa ocorreu na marcenaria do campus UFRA/Belém e o seu objetivo foi gerar acabamento de corte diferente do produzido por motosserra. Isso proporcionou a análise dos efeitos da rugosidade da superfície com diferentes acabamentos na capacidade técnica do modelo de classificação realizar estimativas corretas (Figura 11).

Figura 9 – Confeção dos corpos de prova, cubos (L:30mm x C:30mm x A:70mm) e baquetas (L:50mm x A:50mm e C: de acordo com o comprimento de cada disco no sentido medula casca).



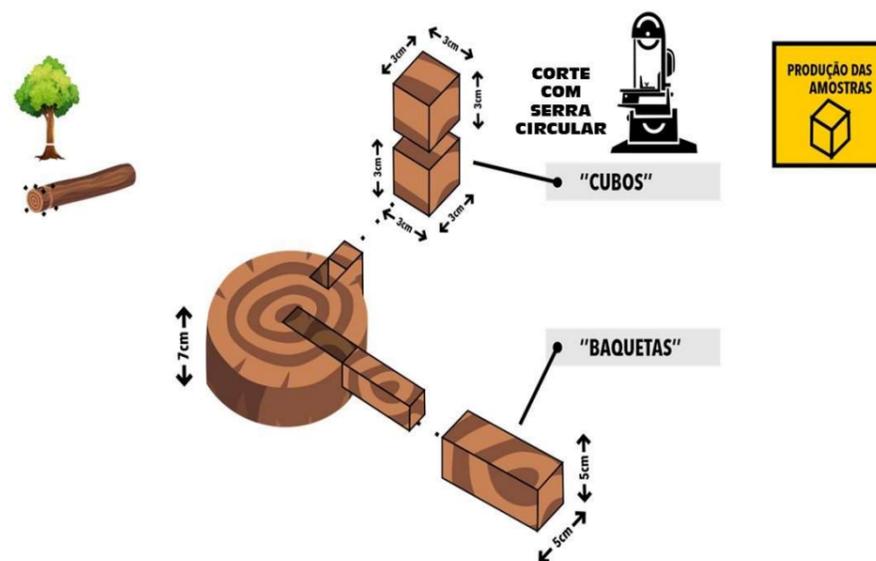
Fonte: Autor

Figura 10 - Baqueta retirada do disco para ser submetida a análise no NIR no plano transversal, sentido medula casca.



Fonte: Autor

Figura 11 - Esquema demonstrativo da produção dos corpos de prova (cubos e baquetas).



Fonte: Autor

A produção das amostras resultou no total de 350 cubos representativos dos 18 discos das 6 espécies estudadas e 1 baqueta representativa do plano transversal sentido medula-casca para cada disco, totalizando 18 baquetas (Tabela 3).

3.3 Coleta dos espectros no NIR para todos os corpos de prova (cubos e baquetas)

Para todos os corpos de prova (cubos e baquetas), os espectros no NIR foram coletados no Laboratório Multiusuário de Biomaterias - LMB da Universidade Federal de Lavras – UFLA em Minas Gerais/MG, com a utilização do espectrômetro da marca Bruker modelo MPA associado ao software Opus versão 7.5. (Figura 12).

Figura 12 - Espectrômetro Bruker conectado ao computador.



Fonte: LMB/UFLA/MG

Tabela 3 – Espécies, quantidade de corpos de prova (cubos e baquetas) e número de espectros coletados em cada amostra.

Determinação - Laboratório de Botânica da EMBRAPA Amazônia Oriental	Cód árv	Nº Cb	Corte	Nº de espec esfera	Espec por espécie (Cb)	Nº Bqt	Via de coleta	Nº de espec	Espec por espécie (Bqt)
<i>Dinizia excelsa</i> Ducke	3046	23	MS	46	244	1	Fibra	17	92
			SC	46			Esfera	17	
	11602	19	MS	38		1	Fibra	16	
			SC	38			Esfera	16	
	43561	19	MS	38		1	Fibra	13	
			SC	38			Esfera	13	
<i>Goupia glabra</i> Aubl.	33106	18	MS	36	240	1	Fibra	11	88
			SC	36			Esfera	11	
	71130	20	MS	40		1	Fibra	14	
			SC	40			Esfera	14	
	72264	22	MS	44		1	Fibra	19	
			SC	44			Esfera	19	
<i>Micropholis melinoniana</i> Pierre	6919	20	MS	40	232	1	Fibra	14	80
			SC	40			Esfera	14	
	12224	18	MS	36		1	Fibra	11	
			SC	36			Esfera	11	
	27403	20	MS	40		1	Fibra	15	
			SC	40			Esfera	15	
<i>Copaifera</i> sp.	23547	22	MS	44	256	1	Fibra	16	96
			SC	44			Esfera	16	
	31277	22	MS	44		1	Fibra	16	
			SC	44			Esfera	16	
	31283	20	MS	40		1	Fibra	16	
			SC	40			Esfera	16	
<i>Hymenaea</i> sp.	43634	18	MS	36	212	1	Fibra	15	100
			SC	36			Esfera	15	
	43654	14	MS	28		1	Fibra	13	
			SC	28			Esfera	13	
	43165	21	MS	42		1	Fibra	22	
			SC	42			Esfera	22	
<i>Manilkara elata</i> (Ducke) Chevalier	25826	20	MS	40	216	1	Fibra	17	72
			SC	40			Esfera	17	
	36991	18	MS	36		1	Fibra	11	
			SC	36			Esfera	11	
	43765	16	MS	32		1	Fibra	8	
			SC	32			Esfera	8	
Total		350		1400	1400	18		528	528

MS: Corte realizado com motosserra; SC: Corte realizado com serra circular; Fibra: Espectros adquiridos via fibra óptica;
Esfera: Espectros adquiridos via esfera de integração; Cód. árv: Código da árvore; Cb: Amostras em forma de cubo; Bqt:
Amostras em forma de baqueta; Espec: Espectro coletado no NIR

Fonte: Autor

Nas baquetas, produzidas com acabamento apenas em motosserra, os espectros foram coletados no sentido medula casca tendo como vias de aquisição a esfera de integração e a fibra óptica, sendo realizada uma aquisição a cada 15 mm no plano transversal durante todo o comprimento da baqueta e, portanto, variando o total de aquisições para cada baqueta conforme seu comprimento. Para as baquetas, foram coletados um total de 264 espectros via esfera de integração e 264 espectros via fibra óptica, totalizando 528 espectros distribuídos nas 18 baquetas das 6 espécies (Tabela 3).

Para cada cubo foram realizadas 4 coletas de espectros no NIR tendo como via de aquisição a esfera de integração, sendo 2 coletas no plano transversal da face produzida com motosserra e 2 coletas no plano transversal da face produzida com serra circular, totalizando 1.400 espectros coletados nos cubos, sendo 700 na face produzida com motosserra e 700 na face produzida com serra circular (Tabela 3).

Todas as aquisições espectrais foram realizadas na gama de 9010,223 a 3999,829 cm^{-1} com resolução espectral de 8 cm^{-1} .

As aquisições espectrais foram realizadas nas superfícies dos corpos de prova livres de defeitos, evitando as regiões com rachaduras e outras inconformidades da madeira.

3.4 Análise dos dados

3.4.1 Análises estatísticas multivariadas

Foi utilizado o software Chemoface v.1.63 (Nunes et al., 2012) para análise de componentes principais (PCA, do inglês Principal Component Analysis) e análise discriminante por mínimos quadrados parciais (PLS-DA, do inglês Partial Least Squares - Discriminant Analysis).

3.4.1.1 Análise de componentes principais (PCA)

A PCA foi utilizada para explorar a variação existente na assinatura espectral das amostras e analisar a similaridade entre os espectros das diferentes espécies e acabamentos. Ao aplicar um algoritmo de PCA num conjunto de variáveis espectrais, o conjunto original destas variáveis é substituído por um novo conjunto de variáveis denominado de componentes principais (Thomas, 1994). A principal característica deste novo conjunto é a ortogonalidade, ou seja, são completamente não correlacionadas. Como

vantagem, o novo conjunto de variáveis geralmente concentra a maior parte da informação (variância) em poucas variáveis, diminuindo assim a dimensionalidade dos dados, sem perda significativa da informação. As novas coordenadas das amostras são denominadas de scores e são construídas pela combinação linear das variáveis originais (Brereton, 2000). Os coeficientes da combinação linear são denominados de loadings, dessa forma, os loadings são capazes de mostrar quais variáveis originais tem maior importância na combinação linear de cada componente principal (Centner & Massart, 1996). Segundo Hawkins (1974) a análise de componentes principais permite detectar erros de forma tão eficiente quanto com a utilização dos dados originais, pois os vetores estarão expressando o comportamento conjunto das variáveis.

3.4.1.2 Análise discriminante por mínimos quadrados parciais (PLS-DA)

A PLS-DA foi utilizada para classificar as categorias das amostras de madeira por meio da validação cruzada leave-one-out e validação independente. As espécies foram consideradas como variáveis categóricas, sem valores quantitativos. As amostras foram agrupadas em diferentes classes de acordo com as espécies. Por conseguinte, um valor contínuo foi estimado para cada amostra a partir de modelos gerados, o modelo que apresentou maior valor de estimativa foi considerado como indicador da categoria em que a amostra analisada estava.

Os modelos foram ajustados considerando os dados espectrais originais e a utilização de sete pré-tratamentos matemáticos para tentar melhorar os resultados das classificações, a saber: i. Normalize; ii. 1ª derivada (15x2x1); iii. 2ª derivada (15x2x2); iv. Multiplicative Scatter Correction – MSC; v. Absorbance to Transmittance; vi. Transmittance to Absorbance e vii. Standard Normal Variate.

Na validação cruzada foi utilizado o mesmo conjunto de amostras para o processo de calibração e validação dos modelos, enquanto que na validação independente o processo de validação ocorreu com dados espectrais que não participaram do processo de calibração dos modelos.

Todos os modelos e abordagens foram ajustados considerando-se 10 (dez) variáveis latentes (VL) e em nenhum modelo houve a exclusão de outlier.

Os modelos foram avaliados por meio do número e porcentagem de acertos para a validação cruzada e validação independente. Os resultados foram apresentados através de gráficos, tabelas e matrizes de confusão onde as classificações reais e as previstas pelo modelo baseado em espectro foram sistematizadas.

3.5 Tipos de abordagens utilizadas no experimento

Para atender os objetivos do trabalho foram aplicadas 06 (seis) abordagens diferentes utilizando os espectros coletados (Tabela 3). Foram considerados os tipos de amostras quanto sua forma (cubo e baqueta), quanto a superfície (motosserra e serra circular), quanto a via de aquisição (fibra óptica e esfera e integração), quanto ao tipo de validação (cruzada e independente) e aplicação de pré-tratamentos matemáticos para a combinação das diferentes abordagens e sub abordagens que serão descritas nos itens a seguir.

3.5.1 Efeito qualidade da superfície das amostras na capacidade de classificação do NIR

Para testar o efeito da qualidade da superfície na capacidade de classificação do NIR, foram ajustados modelos com a utilização de 1.400 espectros coletados via esfera de integração nas 350 amostras em forma de cubo, sendo 700 espectros adquiridos nas faces onde os cortes foram realizados com motosserra e 700 espectros adquiridos nas faces onde os cortes foram realizados com serra circular.

Primeiramente foi realizada a PCA com o objetivo de explorar os dados e verificar a similaridade entre os espectros coletados nas faces produzidas com motosserra e os espectros coletados nas faces produzidas com serra circular, em ato contínuo realizou-se a PLS-DA com o mesmo conjunto de amostras para verificar o efeito da rugosidade da superfície na capacidade de classificação do modelo por meio de validação cruzada.

3.5.2 Discriminação de espécies comerciais produtoras de madeira

Para analisar o potencial do NIR em discriminar espécies produtoras de madeira foram realizadas análises com diferentes sub abordagens considerando o conjunto de espectros coletados nos cubos (1.400 espectros), o tipo de acabamento da superfície onde os espectros foram coletados (motosserra ou serra circular) e aquisição via esfera de integração. Sendo assim, com o resultado final da análise foi possível verificar não apenas a capacidade dos modelos em discriminar espécies como também a face de acabamento que apresentou as melhores classificações.

Dessa forma, primeiramente foi realizada a exploração dos dados através da PCA para verificar a similaridade entre os espectros obtidos nas amostras das 6 espécies estudadas, considerando também a qualidade da superfície de coleta dos espectros, seja a superfície produzida com motosserra, seja produzida com serra circular, em ato contínuo

análises PLS-DA foram realizadas para verificar a capacidade do NIR em classificar as espécies.

3.5.2.1 PLS-DA dos espectros coletados via esfera de integração nas amostras em forma de cubo com validação cruzada para faces produzidas com motosserra e serra circular, considerando as 6 espécies estudadas

Para essa abordagem considerou-se de forma isolada os espectros coletados nas faces produzidas com motosserra (700 espectros) e os espectros coletados na face produzida com serra circular (700 espectros), todos adquiridos via esfera de interação.

3.5.2.2 PLS-DA dos espectros coletados via esfera de integração nas amostras em forma de cubo com validação independente para faces produzida com motosserra e serra circular, considerando as 6 espécies estudadas

Para validação independente o conjunto de amostras foi fracionado de modo que, para cada espécie foram retirados do lote de calibração os espectros referentes a uma das árvores, ou seja, a calibração dos modelos ocorreu com a utilização dos espectros adquiridos de duas árvores de cada espécie (462 espectros – 66%) e a validação independente foi realizada utilizando os espectros da árvore de cada espécie que não participou do processo de calibração (238 espectros – 34%).

3.5.2.3 PLS-DA com validação independente para modelos calibrados com espectros adquiridos via esfera de integração nas faces dos cubos produzidas com motosserra e validados de forma independente com espectros coletados na face dos cubos produzidas com serra circular, para classificação das 6 espécies estudadas

Para essa abordagem foram utilizados 1.400 espectros, sendo 700 espectros coletados nas superfícies produzidas com motosserra para calibração dos modelos e 700 espectros coletados nas superfícies produzidas com serra circular para validação independente dos modelos.

3.5.3 Discriminação de árvores da mesma espécie

Cada espécie utilizada no estudo foi representada por 3 árvores, para essa abordagem utilizou-se 1.400 espectros coletados nas amostras em forma de cubo e foram

testados modelos para verificar a capacidade do NIR em discriminar árvores pertencentes a mesma espécie, considerando o tipo de superfície que o espectro foi coletado e validação cruzada. Para essa abordagem foram realizadas apenas PLS-DA.

3.5.4 Capacidade de classificação do NIR considerando as diferenças nas assinaturas espectrais obtidas em diferentes posições no sentido medula-casca do plano transversal do disco e o agrupamento dos espectros das árvores da mesma espécie

Para essa abordagem foram utilizados 524 espectros coletados nas baquetas produzidas com motosserra, sendo 262 espectros coletados via fibra óptica e 262 espectros coletados via esfera de integração. Para efeito dessa análise, os espectros foram separados por via de aquisição e as árvores pertencentes a mesma espécie foram agrupadas e os espectros coletados nas baquetas de cada espécie foram divididos ao meio, sendo considerada a primeira metade como espectros próximos a medula a segunda metade como espectros próximos a casca. O resultado dessa abordagem permitiu verificar, de forma geral, o efeito da região de coleta do espectro em relação a capacidade de classificação. Para essa abordagem foram aplicadas apenas PLS-DA com validação cruzada.

3.5.5 Capacidade de classificação do NIR considerando as diferenças nas assinaturas espectrais obtidas em diferentes posições no sentido medula-casca do plano transversal do disco e a análise individual das baquetas

Para essa abordagem foram utilizados 964 espectros sendo 700 espectros coletados nos cubos via esfera de integração na face produzida com motosserra e 264 espectros adquiridos nas baquetas via esfera de integração na face produzida com motosserra. A calibração foi realizada com os espectros das amostras em forma de cubos e a validação independente realizada com os espectros coletados nas baquetas. O resultado dessa abordagem permitiu analisar a precisão da classificação de cada posição de coleta de espectro ao longo das baquetas. O modelo foi ajustado utilizando PLS-DA com aplicação de pré-tratamento matemático em 2ª derivada (15x2x2), utilização de 10 (dez) variáveis latentes e não houve a exclusão de nenhum outlier.

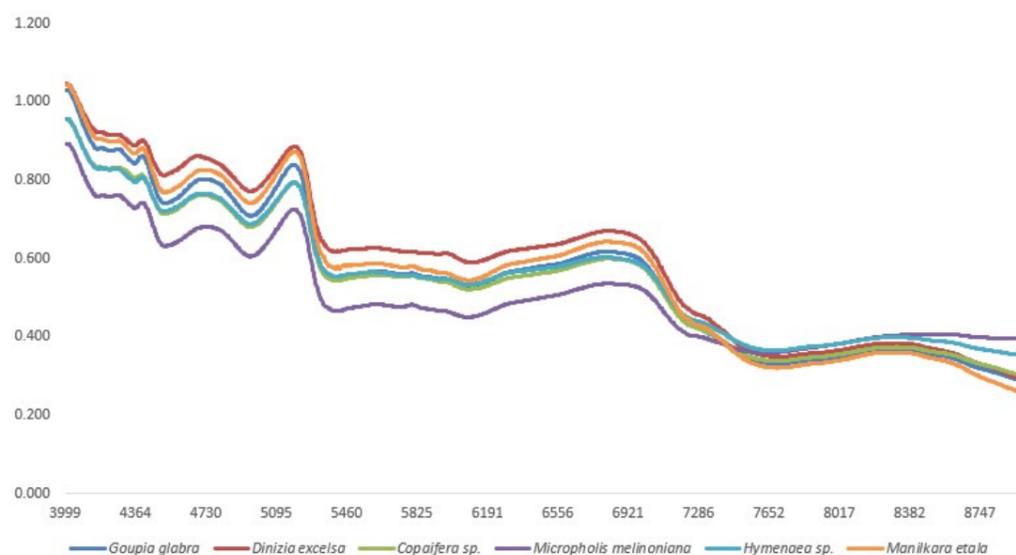
3.5.6 Capacidade de classificação do NIR em modelos calibrados com espectros coletados via esfera de integração e validados com espectros coletados via fibra óptica, considerando as faces produzidas com motosserra

Para essa abordagem foram utilizados 528 espectros coletados nas baquetas, via esfera de integração e fibra óptica, em superfícies produzidas com motosserra, sendo 264 espectros adquiridos via esfera de integração utilizados para calibração dos modelos e 264 espectros adquiridos via fibra óptica utilizados para validação independente. O resultado dessa abordagem permitiu avaliar o percentual de acertos nas classificações quando os espectros são calibrados e validados com diferentes vias de aquisição. Para essa abordagem foram aplicadas apenas PLS-DA.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

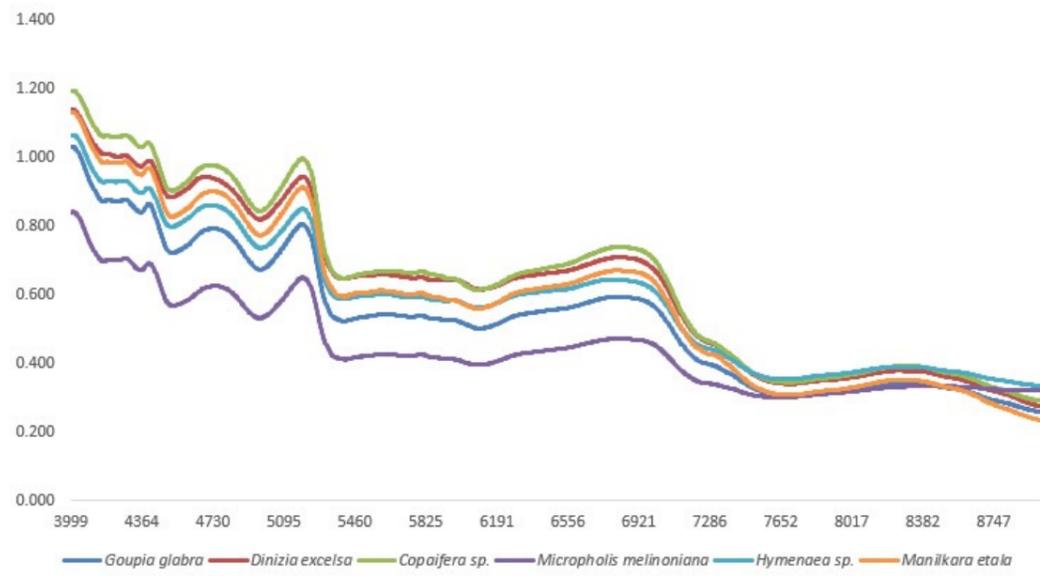
O valor médio dos espectros por espécie coletados nos planos transversais produzidos com motosserra e serra circular estão representados nas Figuras 13, 14, 15 e 16. Visualmente, os espectros das superfícies produzidas com serra circular apresentaram maior potencial para discriminação das espécies, se comparada as superfícies cortadas com motosserra. No entanto, a análise visual dos gráficos não é suficiente para a discriminação das espécies ou inferências de suas propriedades físicas e químicas da madeira, sendo necessário o uso de estatística multivariada, como a PCA e PLS-DA.

Figura 13 – Valores médios por espécie obtidos das assinaturas espectrais coletadas na face produzida com motosserra via esfera de integração nas amostras de madeira em forma de cubo



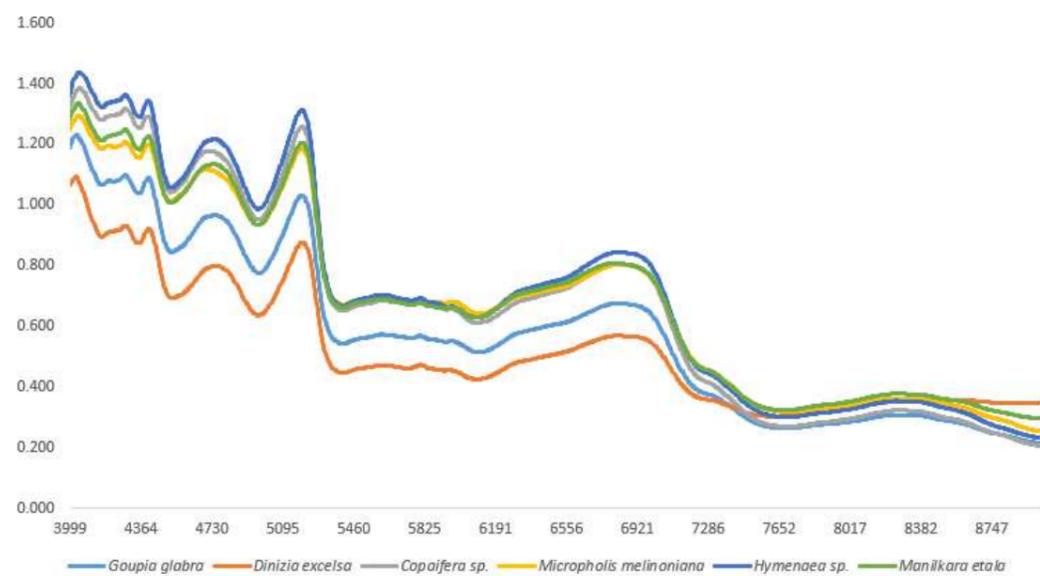
Fonte: Autor

Figura 14 – Valores médios por espécie obtidos das assinaturas espectrais coletadas na face produzida com serra circular via esfera de integração nas amostras de madeira em forma de cubo



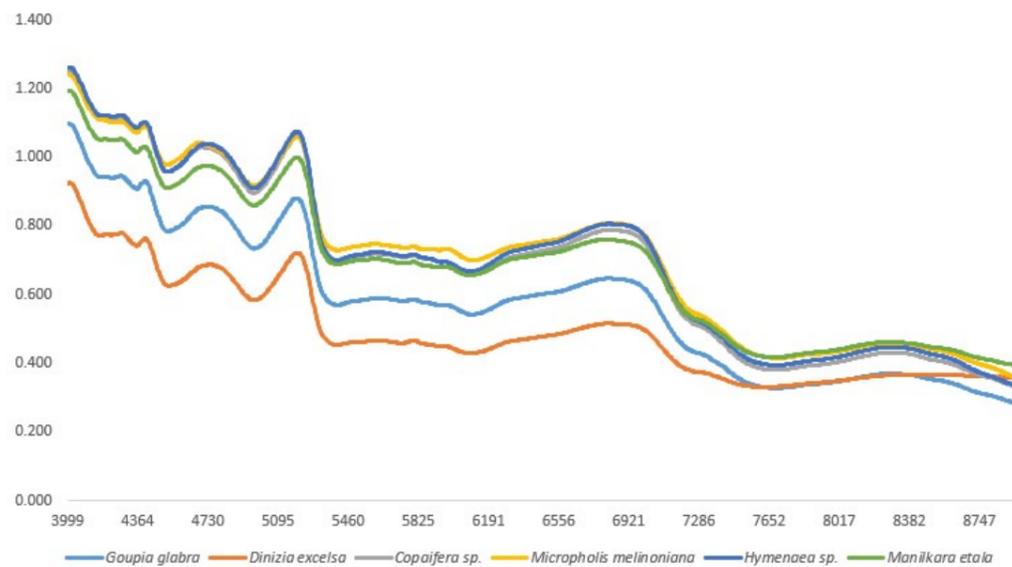
Fonte: Autor

Figura 15 – Valores médios por espécie obtidos das assinaturas espectrais coletadas via fibra óptica nas amostras de madeira em forma de baqueta cortadas com motosserra



Fonte: Autor

Figura 16 – Valores médios por espécie obtidos das assinaturas espectrais coletadas via esfera de integração nas amostras de madeira em forma de baqueta cortadas com motosserra



Fonte: Autor

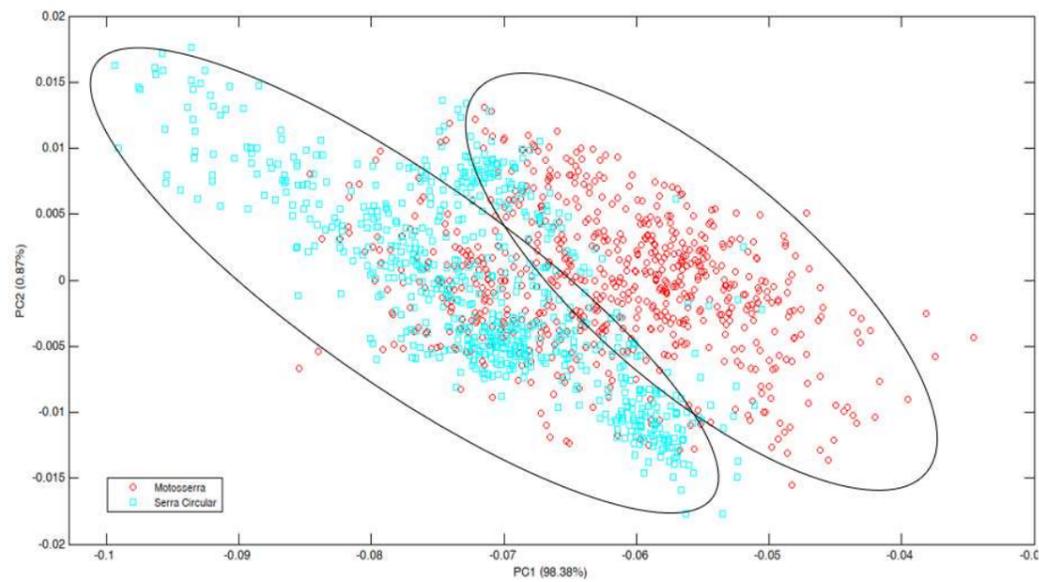
4.1 Efeito da qualidade da superfície das amostras na capacidade de classificação do NIR

Em relação a PCA, o melhor resultado para discriminação visual dos espectros foi alcançado com o modelo que recebeu aplicação de pré-tratamento matemático em 1ª derivada. Observou-se que os dois conjuntos de espectros obtidos nas diferentes faces de acabamento apresentaram suaves tendências de agrupamento em regiões diferentes, demonstrando que o NIR foi sensível as diferenças de rugosidade das superfícies produzidas com motosserra e serra circular, sendo capaz de discriminar as amostras (Figura 17).

Para todos os modelos submetidos a PLS-DA os resultados indicaram entre 96,9% e 98,4% em relação aos acertos na classificação dos espectros, sendo os maiores valores percentuais obtidos nos espectros coletados na face produzida com serra circular, exceto quando aplicou-se o pré-tratamento matemático “Normalize”. Foi observado, também, valores percentuais de classificação idênticos quando aplicado os pré-tratamentos matemáticos Standart Normal Variate e 1ª derivada. Os modelos com maiores valores percentuais médios de acertos na classificação dos espectros foram os elaborados com dados originais (sem pré-tratamento matemático) e com aplicação do pré-tratamento matemático em 1ª derivada, enquanto o modelo com aplicação de pré-tratamento

matemático Absorbance to Transmittance apresentou os menores valores percentuais médios de acerto na classificação (Tabela 4).

Figura 17 – Resultado da PCA em 1ª derivada dos espectros coletados nos cubos de madeira das seis espécies estudadas considerando o tipo de acabamento da superfície.



Fonte: Autor

Tabela 4 - Resultado da PLS-DA dos espectros coletados nos cubos de madeira, com valores percentuais de acertos na validação cruzada, em diferentes tratamentos matemáticos

Pré tratamento (10 VL)	NIR - Classificação Tipo de corte		Média Acertos
	Motosserra %	Serra Circular %	
Sem tratamento	98.3	98.6	98.4
Normalize	98.1	98.0	98.1
Derivative 1ª 15x2x1	98.4	98.4	98.4
Derivative 2ª 15x2x2	97.4	97.7	97.6
Multiplicative scatter correction	97.7	98.0	97.9
Absorbance to transmittance	96.1	97.6	96.9
Transmittance to absorbance	97.6	98.7	98.1
Standart normal variate	97.9	97.9	97.9

VL Face com maior percentual de acerto
Variável Latente

Fonte: Autor

Com base nos resultados observados na PLS-DA e para avaliação final em relação ao efeito da qualidade da superfície na capacidade de classificação do modelo, foi elaborada matriz de confusão tendo por base o modelo ajustado com aplicação de pré-tratamento em 1ª derivada para identificar o número de amostras que não conseguiram ser corretamente classificadas pelo NIR (Tabela 5).

Tabela 5 - Matriz de confusão com quantitativo de acertos e erros de classificação do modelo resultante da PLS-DA em 1ª derivada dos espectros coletados nos cubos

Tipo de corte	NIR - Classificação		n total	n acerto	% acertos
	Motosserra	Serra Circular			
Motosserra	689	11	700	689	98.4
Serra Circular	11	689	700	689	98.4
Total			1400	1378	98.4

Fonte: Autor

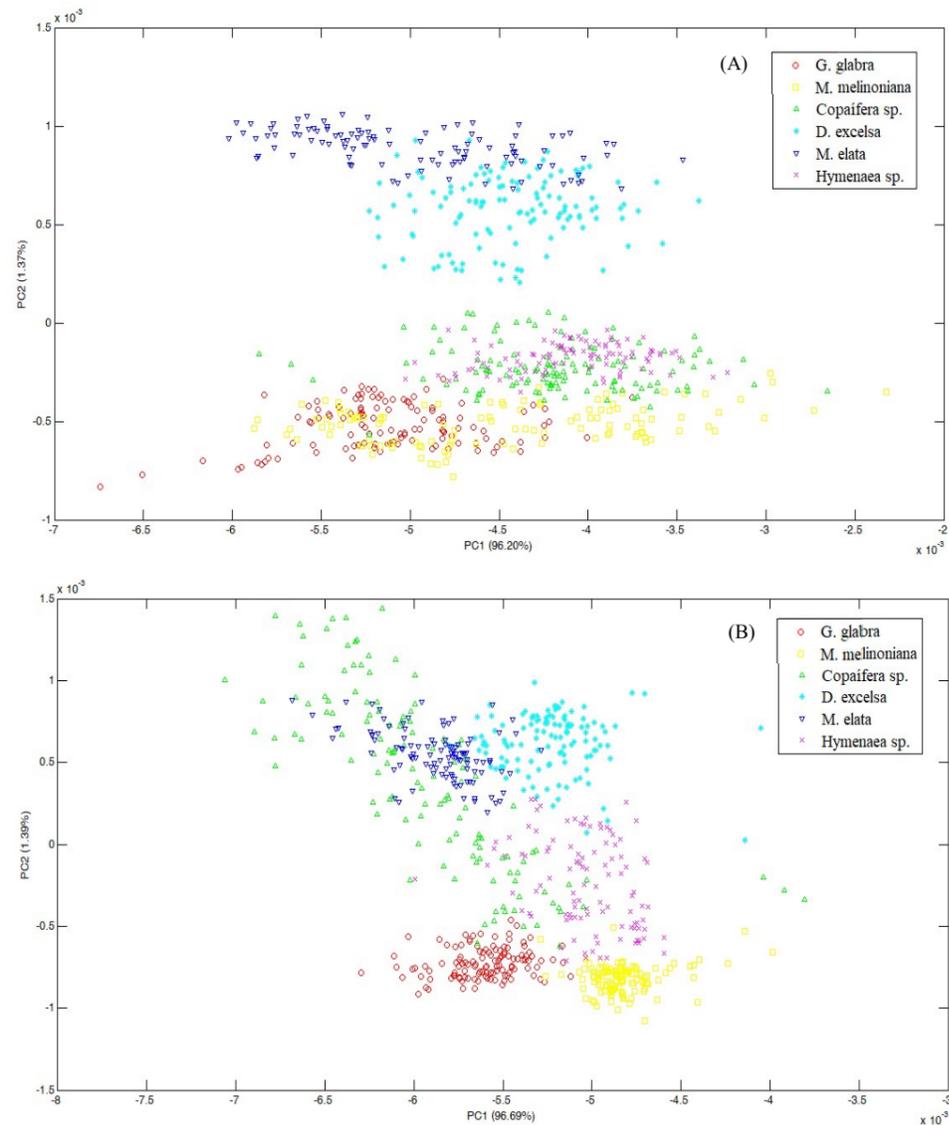
Com o resultado apresentado pela matriz de confusão, observou-se que do total de 1.400 espectros submetidos a classificação, 1.378 foram classificados corretamente e 22 confundiram o NIR sendo classificados de forma errada. Para face produzida com motosserra foram observados 689 classificações corretas e 11 classificações erradas e para face produzida com serra circular, observou-se 689 classificações corretas e 11 classificações erradas, demonstrando a sensibilidade do NIR em relação a diferença na qualidade da superfície e a semelhança no percentual de classificação do modelo quando considerada a ferramenta que produziu o acabamento das amostras.

Em última análise, os resultados alcançados indicam que a diferença do acabamento produzido pela ferramenta utilizada no corte da madeira (motosserra e serra circular) são captadas pelo sensor óptico no NIR e podem identificar o tipo de instrumento utilizado no corte de uma peça de madeira, sendo o acabamento produzido pela serra circular o que apresentou os melhores resultados em relação aos pré tratamentos matemáticos aplicados, indicando que os melhores valores percentuais de assertividade são obtidos em superfícies menos rugosas (Tabela 4).

4.2 Discriminação de espécies comerciais produtoras de madeira

Em relação a PCA, tanto para os espectros coletados na superfície produzida com motosserra quanto os coletados na superfície produzida com serra circular, o modelo ajustado com aplicação de pré-tratamento matemático em 2ª derivada foi o que apresentou melhor resultado para a distinção visual, embora a dispersão dos espectros tenha sido acentuada e as tendências de agrupamento não tenham apresentado clareza, dificultando, para essa análise, um diagnóstico preciso (Figura 18).

Figura 18 - Resultado da PCA em 2ª derivada das amostras de madeira em forma de cubo considerando as faces produzidas com motosserra (A) e serra circular (B) para análise exploratória das similaridades espectrais das seis espécies estudadas



Fonte: Autor

Para a PCA dos dados coletados na face produzida com serra circular observou-se discriminação mais evidente dos espectros da *Manilkara elata* e *Dinizia excelsa*. Os espectros da *Goupia glabra*, *Hymenaea* sp., *Micropholis melinoniana* e *Copaifera* sp., apresentaram dispersão acentuada e ausência de tendência ao agrupamento, não sendo possível distinguir os espectros correspondentes a cada espécie. Em relação a PCA dos dados coletados na face produzida com motosserra os espectros de *Manilkara elata* e *Dinizia excelsa* permaneceram próximos, porém os espectros da *Copaifera* sp. e *Hymenaea* sp. ficaram mais dispersos por todo conjunto de amostras, enquanto a *Micropholis melinoniana* e *Goupia glabra* observou-se as melhores tendências de agrupamento e distinção dos demais espectros analisados.

Para essa abordagem a PCA não apresentou resultado satisfatório em relação a discriminação das espécies, pois não foi possível observar nenhuma tendência efetiva de agrupamento dos espectros das mesmas espécies, inviabilizando afirmações precisas em relação a identificação de espécies.

Seguindo a ordem de análises, o mesmo conjunto de amostras foi submetido a PLS-DA para verificar a capacidade de classificação dos mesmos modelos ajustados na PCA.

4.2.1 Resultado da PLS-DA nos espectros coletados via esfera de integração nas amostras em forma de cubo com validação cruzada para faces produzidas com motosserra e serra circular, considerando as seis espécies estudadas

Para todos os modelos ajustados, considerando a face produzida com motosserra e serra circular, observou-se para *Goupia glabra*, *Copaifera* sp. e *Manilkara elata* valores percentuais de acertos na classificação acima de 90%. Para as amostras de *Hymenaea* sp os modelos indicaram algumas classificações abaixo de 70% (face produzida com motosserra sem pré-tratamento matemático e com a aplicação do pré-tratamento Standart normal variate). Tanto para os espectros adquiridos na face produzida com motosserra, quanto na face produzida com serra circular, o modelo ajustado com a aplicação do pré-tratamento matemático em 2ª derivada apresentou melhor resultado para classificação correta das espécies, resultando no valor médio de 97,6% de acerto na classificação das amostras produzidas com motosserra e 98,4% de acerto na classificação das amostras produzidas com serra circular. Para superfície produzida com motosserra o modelo com aplicação do pré-tratamento Multiplicative Scatter Correction apresentou o menor valor percentual médio de acerto na classificação (90,0%) e para superfície produzida com serra

circular, o modelo com menor valor percentual médio de acerto foi elaborado com pré-tratamento Tramitance to Absorbance (95,6%) (Tabela 6).

Tabela 6 - Resultado da PLS-DA com percentuais de acertos da validação cruzada, em diferentes tratamentos matemáticos para os espectros coletados nas amostras de madeira em forma de cubo.

Pré tratamento (10 VL)	NIR - Classificação Espécies e tipo de corte												Média Acertos	
	<i>Goupia glabra</i>		<i>Micropholis melinoniana</i>		<i>Copaifera sp.</i>		<i>Dinizia excelsa</i>		<i>Manilkara elata</i>		<i>Hymenaea sp.</i>			
	MS %	SC %	MS %	SC %	MS %	SC %	MS %	SC %	MS %	SC %	MS %	SC %	MS %	SC %
Sem tratamento	98.3	100	93.1	100	93.8	94.5	88.5	89.3	96.3	99.1	68.9	93.4	90.1	96.0
Normalize	99.2	99.2	89.7	99.1	96.1	96.1	89.3	88.5	98.1	99.1	70.8	95.3	90.9	96.1
Derivative 1 ^a 15x2x1	99.2	100	90.5	100	98.4	96.9	90.2	94.3	100	100	97.2	96.2	95.9	97.9
Derivative 2 ^a 15x2x2	100	100	100	100	98.4	97.7	91.0	92.6	100	100	96.2	100	97.6	98.4
Multiplicative scatter correction	98.3	98.3	85.3	99.1	95.3	95.3	89.3	88.5	99.1	100	70.8	97.2	90.0	96.3
Absorbance to tramitance	97.5	100	93.1	100	95.3	96.1	90.2	86.1	98.1	99.1	75.5	94.3	91.9	95.9
Tramitance to absorbance	98.3	100	94.8	100	94.5	95.3	90.2	85.2	98.1	99.1	74.5	94.3	92.0	95.6
Standart normal variate	99.2	98.3	90.5	98.3	93.0	96.1	89.3	88.5	100	100	67.9	95.3	90.3	96.0

MS - Amostras com corte em motosserra
SC - Amostras com corte em serra circular

Clas. ≥ 90% Clas. ≥ 70% Clas. < 70%

Fonte: Autor

Os resultados observados indicam que as superfícies produzidas com a utilização de serra circular apresentaram melhores resultados para classificação das espécies quando comparado com os resultados dos modelos ajustados com espectros adquiridos na face produzida com motosserra.

Tomando por referência os resultados observados na PLS-DA foi elaborada matriz de confusão com o objetivo de verificar onde foram localizados os erros de classificação do NIR para os modelos que apresentaram melhores resultados considerando cada tipo de superfície.

Para as faces produzidas com motosserra, dos 700 espectros submetidos a classificação 683 foram classificados corretamente. Os erros de classificação foram observados para as amostras de *Copaifera sp.* (onde o NIR classificou duas amostras de forma errada confundido uma com *Goupia glabra*, e uma com *Manilkara elata*), nas amostras de *Dinizia excelsa* (onde o NIR classificou onze amostras de forma errada, sendo todas confundidas com *Manilkara elata*) e *Hymenaea sp.* (onde o NIR classificou

quatro amostras de forma errada, sendo todas confundidas com *Micropholis melinoniana*). As demais espécies apresentaram 100% de acerto durante a classificação (Tabela 7).

Tabela 7 - Matriz de confusão com quantitativo de acertos e erros de classificação do modelo resultante da PLS-DA em 2ª derivada dos espectros coletados nos cubos, adquiridos via esfera de integração, considerando a face produzida com motosserra e validação cruzada

Espécies	NIR - Classificação das madeiras						n total	n acerto	% acerto
	GG	MM	CP	DE	ME	HM			
GG	120						120	120	100
MM		116					116	116	100
CP	1		126		1		128	126	98.4
DE				111	11		122	111	91.0
ME					108		108	108	100
HM		4				102	106	102	96.2
Total							700	683	97.6

GG - *Goupia glabra* Aubl.; MM - *Micropholis melinoniana* Pierre; CP - *Copaifera* sp.;
DE - *Dinizia excelsa* Ducke; ME - *Manilkara elata* (Ducke) Chevalier; HM - *Hymenaea* sp.

Fonte: Autor

Tabela 8 - Matriz de confusão com quantitativo de acertos e erros de classificação do modelo resultante da PLS-DA em 2ª derivada dos espectros coletados nos cubos, adquiridos via esfera de integração, considerando a face produzida com serra circular e validação cruzada.

Espécies	NIR - Classificação das madeiras						n total	n acerto	% acerto
	GG	MM	CP	DE	ME	HM			
GG	120						120	120	100
MM		116					116	116	100
CP			125	2		1	128	125	98
DE				113	9		122	113	93
ME					108		108	108	100
HM						106	106	106	100
Total							700	688	98.4

GG - *Goupia glabra* Aubl.; MM - *Micropholis melinoniana* Pierre; CP - *Copaifera* sp.;
DE - *Dinizia excelsa* Ducke; ME - *Manilkara elata* (Ducke) Chevalier; HM - *Hymenaea* sp.

Fonte: Autor

Para as faces produzidas com serra circular, dos 700 espectros submetidos a classificação, 688 foram classificados corretamente. Os erros de classificação ocorreram em amostras de *Copaifera* sp. (onde o NIR classificou três amostras de forma errada confundido duas com *Dinizia excelsa*, e uma com *Hymenaea* sp.) e amostras de *Dinizia excelsa* (onde o NIR classificou nove amostras de forma errada, sendo todas confundidas com *Manilkara elata*). As demais amostras apresentaram 100% de acerto durante a classificação (Tabela 8).

Resultados com percentuais médios de acerto de 93,2% foram alcançados por Pace et al (2019) quando utilizado NIR com aplicação de validação cruzada e estatística multivariada para discriminar 12 espécies através de amostras de madeira.

Considerando que a abordagem aplicou validação cruzada onde o mesmo conjunto de amostras é utilizado para calibração e validação dos modelos, observa-se que o resultado indicou excelente capacidade da técnica em diferenciar as espécies estudadas, sendo observado resultados melhores nas superfícies menos rugosas (serra circular), embora a diferença de valores percentuais de acerto entre acabamentos com motosserra e serra circular tenha sido muito pequena, não inviabilizando a aplicação da técnica e favorecendo seu uso em atividades de campo onde a utilização de motosserras é frequente. Soares et al (2017) alcançou 90% de assertividade para discriminar *Hymenaea* sp. e *Micropholis melinoniana* utilizando equipamento NIR portátil em campo.

4.2.2 Resultado da PLS-DA dos espectros coletados via esfera de integração nas amostras em forma de cubo com validação independente para faces produzida com motosserra e serra circular, considerando as seis espécies estudadas

Para todos os modelos ajustados, considerando a face produzida com motosserra e serra circular, somente amostras de *Copaifera* sp. apresentaram valores percentuais de acertos na classificação acima de 90%. Amostras de *Hymenaea* sp. apresentaram modelos com classificações abaixo de 70% (sempre na face produzida com motosserra para todos os pré-tratamentos matemáticos, exceto em 1ª derivada e 2ª derivada). Tanto para os espectros adquiridos na face produzida com motosserra, quanto na face produzida com serra circular, o modelo ajustado com a aplicação do pré-tratamento matemático em 2ª derivada teve melhor resultado para classificação correta das espécies, resultando na média de 97,1% de acerto na classificação das amostras produzidas com motosserra e

99,2% de acerto na classificação das amostras produzidas com serra circular. Para superfície produzida com motosserra, o modelo ajustado com aplicação de pré-tratamento Multiplicative Scatter Correction apresentou o menor valor percentual médio de classificação (83,2%) e para superfície produzida com serra circular o menor percentual médio de classificação ocorreu com a aplicação do pré-tratamento Normalize (92,9%) (Tabela 9).

A semelhança do que foi observado na validação cruzada, os resultados observados indicaram que as superfícies produzidas com uso de serra circular apresentaram melhores resultados para classificação das espécies quando comparado com os resultados dos modelos ajustados com espectros adquiridos na face produzida com motosserra, sendo que o resultado da classificação observado na validação independente para a superfície produzida com serra circular (99,2%) foi melhor, quando comparado com o observado na validação cruzada (98,4%).

Tabela 9 - Resultado da PLS-DA com percentuais de acertos da validação independente, em diferentes tratamentos matemáticos para os espectros coletados nas amostras de madeira em forma de cubo.

Pré tratamento (10 VL)	NIR - Classificação												Média Acertos		
	Espécies e tipo de corte														
	<i>Goupia glabra</i>		<i>Micropholis melinoniana</i>		<i>Copaifera sp.</i>		<i>Dinizia excelsa</i>		<i>Mamilkara elata</i>		<i>Hymenaea sp.</i>		MS	SC	
MS	SC	MS	SC	MS	SC	MS	SC	MS	SC	MS	SC	MS	SC	MS	SC
%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
Sem tratamento	97.2	97.2	80.6	100	94.4	94.4	100	100	82.5	97.5	57.1	100	85.3	98.3	
Normalize	94.4	88.9	97.2	97.2	94.4	91.7	100	100	90.0	97.5	47.6	81.0	87.0	92.9	
Derivative 1* 15x2x1	97.2	100	77.8	97.2	97.2	94.4	97.9	100	100	100	90.5	97.6	93.7	98.3	
Derivative 2* 15x2x2	97.2	100	88.9	97.2	97.2	97.2	100	100	100	100	97.6	100	97.1	99.2	
Multiplicative scatter correction	91.7	88.9	72.2	94.4	100	91.7	95.8	97.9	90.0	100	50.0	95.2	83.2	95.0	
Absorbance to transmittance	80.6	94.4	94.4	100	94.4	97.2	87.5	95.8	90.0	97.5	66.7	97.6	85.3	97.1	
Transmittance to absorbance	94.4	97.2	91.7	97.2	94.4	91.7	95.8	95.8	90.0	95.0	64.3	97.6	88.2	95.8	
Standart normal variate	94.4	88.9	86.1	94.4	91.7	94.4	95.8	100	95.0	100	45.2	92.9	84.5	95.4	

MS - Amostras com corte em motosserra
SC - Amostras com corte em serra circular

Clas. ≥ 90% Clas. ≥ 70% Clas. < 70%

Fonte: Autor

Tomando como referência o resultado observado na PLS-DA foi elaborada matriz de confusão com o objetivo de verificar a localização dos erros de classificação do NIR

para o modelo que apresentou melhor resultado considerando cada tipo de superfície (Tabela 10).

Para as faces produzidas com motosserra, dos 238 espectros submetidos a classificação, 231 foram classificados corretamente. Os erros de classificação ocorreram em amostras de *Goupia glabra* (onde o NIR classificou uma amostra de forma errada, confundido com *Hymenaea* sp.), *Micropholis melinoniana* (onde o NIR classificou quatro amostras de forma errada, confundido com *Hymenaea* sp.), *Copaifera* sp. (onde o NIR classificou uma amostra de forma errada, confundido com *Manilkara elata*) e *Hymenaea* sp. (onde o NIR classificou uma amostra de forma errada, confundindo com *Dinizia excelsa*). As demais amostras apresentaram 100% de acerto na classificação das espécies (Tabela 10).

Tabela 10 - Matriz de confusão com quantitativo de acertos e erros de classificação do modelo resultante da PLS-DA em 2ª derivada dos espectros coletados nos cubos na face produzida com motosserra e validação independente

Espécies	NIR - Classificação das madeiras						n total	n acerto	% acerto	
	GG	MM	CP	DE	ME	HM				
GG	35					1	36	35	97.2	
MM		32				4	36	32	88.9	
CP			35		1		36	35	97.2	
DE				48			48	48	100	
ME					40		40	40	100	
HM				1		41	42	41	97.6	
	Total							238	231	97.1

GG - *Goupia glabra* Aubl.; MM - *Micropholis melinoniana* Pierre; CP - *Copaifera* sp.; DE - *Dinizia excelsa* Ducke; ME - *Manilkara elata* (Ducke) Chevalier; HM - *Hymenaea* sp.

Fonte: Autor

Para as faces produzidas com serra circular, dos 238 espectros submetidos a classificação, 237 foram classificados corretamente. O único erro de classificação observado ocorreu em uma amostra de *Copaifera* sp. (onde o NIR classificou a amostra de forma errada, confundido com *Hymenaea* sp.). As demais amostras apresentaram 100% de acerto durante a classificação das espécies (Tabela 11).

Tabela 11 - Matriz de confusão com quantitativo de acertos e erros de classificação do modelo resultante da PLS-DA em 2ª derivada dos espectros coletados nos cubos de madeira na face produzida com serra circular e validação independente

Espécies	NIR - Classificação das madeiras						n total	n acerto	% acerto
	GG	MM	CP	DE	ME	HM			
GG	36						36	36	100
MM		36					36	36	100
CP			35			1	36	35	97
DE				48			48	48	100
ME					40		40	40	100
HM						42	42	42	100
	Total						238	237	99.2

GG - *Goupia glabra* Aubl.; MM - *Micropholis melinoniana* Pierre; CP - *Copaifera* sp.; DE - *Dinizia excelsa* Ducke; ME - *Mamilkara elata* (Ducke) Chevalier; HM - *Hymenaea* sp.

Fonte: Autor

Considerando a aplicação de validação independente onde utiliza-se um conjunto de amostras externas que não participaram da calibração dos modelos, o resultado indicou excelente capacidade para discriminar as espécies estudadas. Embora os resultados observados nas superfícies menos rugosas (serra circular) tenham apresentado valores percentuais de acerto ligeiramente maiores, o uso da técnica em superfícies produzidas com motosserra mostrou-se viável, favorecendo a utilização da técnica em campo. Pace et al (2019) aplicando validação independente, alcançou 91% de assertividade para discriminar 12 espécies com amostras de madeira enquanto Santos et al (2020) observou de 55,6% à 61,1% de classificações corretas na tentativa de discriminar 3 espécies conhecidas vulgarmente como Tauari. Já Rocha et al (2021) utilizando equipamento NIR portátil para discriminar madeira folheada de *Micropholis melinoniana* e *Hymenaea* sp. alcançou percentuais de classificação correta entre 95,5% e 100%.

4.2.3 Resultado da PLS-DA com validação independente para modelos calibrados com espectros adquiridos via esfera de integração nas faces dos cubos produzidas com motosserra e validados com espectros coletados na face dos cubos produzidas com serra circular, para classificação das seis espécies estudadas

Para amostras de *Goupia glabra*, *Micropholis melinoniana* e *Dinizia excelsa* observou-se os melhores resultados de classificação para todos os modelos ajustados. *Copaifera* sp., *Manilkara elata* e *Hymenaea* sp., apresentaram modelos com classificações abaixo de 70%, sendo *Hymenaea* sp. sem nenhum modelo com classificação acima de 90% e 6 modelos com classificações inferiores a 70%.

O modelo ajustado com a aplicação de pré-tratamento matemático em 1ª derivada apresentou melhor média percentual de classificação com 95,2% de acertos enquanto que o modelo ajustado com dados originais apresentou o menor percentual de classificação com 76,9% de acertos. De modo geral, essa abordagem demonstrou sensibilidade do NIR para classificar amostras produzidas com serra circular em modelos calibrados com amostras produzidas com motosserra (Tabela 12).

Tabela 12 - Resultado da PLS-DA dos espectros coletados nos cubos de madeira, com percentuais de acertos da validação independente, considerando diferentes tratamentos matemáticos para modelos calibrados com espectros coletados nas superfícies produzidas com motosserra e validados com espectros coletados nas superfícies produzidas com serra circular, para classificação das 6 (seis) espécies.

Pré tratamento (10 VL)	NIR - Classificação Espécies e tipo de corte						Média Acertos
	<i>Goupia glabra</i>	<i>Micropholis melinoniana</i>	<i>Copaifera</i> sp.	<i>Dinizia excelsa</i>	<i>Manilkara elata</i>	<i>Hymenaea</i> sp.	
	Calibração: MS Validação: SC	Calibração: MS Validação: SC	Calibração: MS Validação: SC	Calibração: MS Validação: SC	Calibração: MS Validação: SC	Calibração: MS Validação: SC	
Sem tratamento	100	100	63.3	91.0	62.0	40.6	76.9
Normalize	100	89.7	91.4	87.7	88.0	39.6	83.6
Derivative 1ª 15x2x1	100	100	95.3	90.2	100	85.8	95.2
Derivative 2ª 15x2x2	100	100	96.1	91.0	100	82.1	95
Multiplicative scatter correction	99.2	91.4	98.4	90.2	63.0	60.4	84.7
Absorbance to transmittance	86.7	93.1	94.5	88.5	96.3	53.8	86.0
Transmittance to absorbance	99.2	99.1	95.3	88.5	99.1	43.4	88.1
Standart normal variate	99.2	92.2	99.2	95.9	57.4	57.5	84.7

MS - Amostras com corte em motosserra
SC - Amostras com corte em serra circular

Clas. ≥ 90% Clas. ≥ 70% Clas. < 70%

Fonte: Autor

Tomando como referência o resultado observado na PLS-DA foi elaborada matriz de confusão com o objetivo de verificar onde foram localizados os erros de classificação do NIR para o modelo que apresentou melhor resultado, considerando a calibração com

espectros adquiridos na superfície produzida com motosserra e validação independente com espectros adquiridos na superfície produzida com serra circular (Tabela 13).

Dos 700 espectros submetidos a validação independente, 677 foram classificados de forma correta e 33 foram classificados errada, sendo os erros identificados em amostras de *Copaifera* sp. (onde o NIR classificou seis amostras de forma errada, confundido três com *Micropholis melinoniana*, duas com *Dinizia excelsa* e uma com *Manilkara elata*), *Dinizia excelsa* (onde o NIR classificou doze amostras de forma errada, confundido uma com *Goupia glabra*, dez com *Manilkara elata* e uma com *Hymenaea* sp.) e *Hymenaea* sp. (onde o NIR classificou quinze amostras de forma errada, confundido todas com *Micropholis melinoniana*). As demais amostras apresentaram 100% de acerto na classificação das espécies.

Tabela 13 - Matriz de confusão com quantitativo de acertos e erros de classificação do modelo resultante da PLS-DA em 1ª derivada dos espectros coletados nos cubos, de madeira adquiridos via esfera de integração e considerando a calibração com espectros adquiridos na superfície produzida com motosserra e validação independente com espectros adquiridos na superfície produzida com serra circular.

Espécies	NIR - Classificação das madeiras						n total	n acerto	% acerto
	GG	MM	CP	DE	ME	HM			
GG	120						120	120	100.0
MM		116					116	116	100.0
CP		3	122	2	1		128	122	95.3
DE	1			110	10	1	122	110	90.2
ME					108		108	108	100.0
HM		15				91	106	91	85.8
	Total						700	667	95.2

GG - *Goupia glabra* Aubl.; MM - *Micropholis melinoniana* Pierre; CP - *Copaifera* sp.; DE - *Dinizia excelsa* Ducke; ME - *Manilkara elata* (Ducke) Chevalier; HM - *Hymenaea* sp.

Fonte: Autor

O resultado observado indica que, para as espécies estudadas, modelos calibrados com amostras produzidas através de motosserra podem ser utilizados para discriminar amostras produzidas com serra circular alcançando valores médios de acertos de 95,2% quando aplicado pré tratamento matemático em 1ª derivada, demonstrando que modelos elaborados com amostras produzidas com motosserra não são limitantes para o uso da técnica em amostras produzidas com serra circular.

4.3 Discriminação de árvores da mesma espécie

Para todas as espécies os valores percentuais médios das classificações foram acima de 90%, sendo os modelos ajustados com aplicação de pré-tratamento matemático em 1ª derivada apresentando os maiores valores médios de classificação para *Goupia glabra*, *Micropholis melinoniana*, *Copaifera* sp. e *Hymenaea* sp. (superfícies: motosserra e serra circular), para *Manilkara elata* e *Dinizia excelsa* o modelo com pré-tratamento matemático em 1ª derivada apresentou maiores valores somente para a superfície produzida com serra circular. Para superfície produzida com motosserra o modelo com maior percentual médio de acerto para espécie *Manilkara elata* foi ajustado com pré-tratamento em 2ª derivada e para *Dinizia excelsa* o ajustado com pré-tratamento Normalize (Tabela 14).

Tabela 14 - Resultado da PLS-DA dos espectros coletados nos cubos de madeira, com percentuais de acertos da validação cruzada considerando diferentes tratamentos matemáticos, espectros coletados nas superfícies produzidas com motosserra e serra circular e avaliando a capacidade do modelo em diferenciar árvores pertencentes a mesma espécie.

Espécies Tipo de corte	NIR - Classificação %Pré tratamento - Validação cruzada (10LV)								
	Sem tratamento	Normalize	1ª Derivative	2ª Derivative	Multiplicative scatter correction	Absorbance to transmittance	Transmittance to absorbance	Standart normal variate	
<i>Goupia glabra</i>	MS	89.9	88.2	96.6	92.5	88.2	85.8	86.7	89.9
	SC	89.3	93.4	96.7	92.0	94.2	93.4	89.5	94.2
<i>Micropholis melinoniana</i>	MS	81.1	88.2	91.6	89.9	87.1	85.5	85.4	87.1
	SC	85.6	91.3	99.2	88.3	93.1	89.0	87.3	90.6
<i>Copaifera</i> sp.	MS	85.0	84.4	91.4	84.4	81.8	82.1	79.8	79.5
	SC	85.6	83.2	94.5	90.6	86.5	83.0	82.2	83.9
<i>Dinizia excelsa</i>	MS	91.6	93.2	92.5	91.4	91.4	90.4	90.4	91.4
	SC	89.5	92.3	92.3	88.3	91.3	87.8	88.7	92.1
<i>Manilkara elata</i>	MS	92.8	92.1	98.1	99.2	92.8	93.1	95.7	93.9
	SC	94.9	96.6	100.0	98.3	99.2	95.7	94.9	98.3
<i>Hymenaea</i> sp.	MS	85.3	82.1	93.9	89.2	83.5	88.1	86.5	84.1
	SC	90.9	90.6	93.4	92.1	90.5	88.0	86.5	90.6

MS Amostrs com corte em motosserra
SC Amostrs com corte em serra circular
Melhores valores percentuais de classificação por espécie e tipo de corte

Fonte: Autor

O resultado evidenciou a sensibilidade do NIR em discriminar amostras de madeira que pertencem a mesma espécie com percentuais médios de classificação acima de 90%, chegando a 100% para *Manilkara elata* com espectros coletados na superfície produzida com serra circular. Para todas as espécies, exceto *Dinizia excelsa* e *Hymenaea* sp., a superfície produzida com serra circular apresentou maiores percentuais médios de

classificação. Esse resultado indica o potencial de uso da técnica para elaboração e monitoramento da cadeia de custódia em PMFS.

Embora seja necessário o desenvolvimento de pesquisa mais específica, o resultado sugere que a qualidade do sítio, a idade da árvore e o tempo de corte podem estar relacionados com a sensibilidade do NIR e sua capacidade em diferenciar amostras de árvores pertencentes a mesma espécie.

4.4 Análise da capacidade de classificação do NIR considerando as diferenças nas assinaturas espectrais obtidas em diferentes posições no sentido medula-casca do plano transversal do disco e o agrupamento dos espectros das árvores da mesma espécie

Para os dados adquiridos via fibra óptica todos os modelos ajustados com espectros coletados próximo a medula apresentaram maiores percentuais médios de acertos na classificação, sendo o maior percentual médio para dados próximo a medula obtido com a aplicação do pré-tratamento matemático *Tramittance to Absorbance* (94,7%), enquanto que o melhor modelo ajustado para os espectros coletados próximo a casca utilizou a aplicação do pré-tratamento matemático em 1ª derivada (85,7%) (Tabela 15).

Considerando os resultados observados na PLS-DA foi elaborada matriz de confusão com o objetivo de verificar onde foram localizados os erros de classificação do NIR para os modelos que apresentaram melhores resultados considerando os espectros adquiridos próximo a medula na superfície produzida com motosserra

Dos 125 espectros coletados próximo a medula e submetidos a validação cruzada, 118 foram classificados de forma correta e 7 não foram classificados de forma correta, sendo os erros identificados em amostras de *Goupia glabra* (onde o NIR classificou uma amostra de forma errada, confundindo com *Manilkara elata*), *Copaifera* sp. (onde o NIR classificou duas amostras de forma errada, confundido uma com *Manilkara elata* e uma com *Hymenaea* sp.), *Dinizia excelsa* (onde o NIR classificou três amostras de forma errada, confundido uma com *Copaifera* sp., uma com *Manilkara elata* e uma com *Hymenaea* sp.) e *Hymenaea* sp. (onde o NIR classificou uma amostra de forma errada, confundido com *Dinizia excelsa*). As demais amostras apresentaram 100% de acerto na classificação da espécie (Tabela 16).

Tabela 15 - Resultado PLS-DA dos espectros coletados nas baquetas, via fibra óptica, com percentuais de acertos da validação cruzada considerando diferentes tratamentos matemáticos, espectros coletados nas superfícies produzidas com motosserra e avaliando a capacidade do modelo em diferenciar as assinaturas espectrais adquiridas em diferentes posições no sentido medula-casca no plano transversal.

Pré tratamento (10 VL)	NIR - Classificação												Média Acertos	
	Espécies e região de aquisição espectral													
	<i>Goupia glabra</i>		<i>Micropholis melinoniana</i>		<i>Copaifera sp.</i>		<i>Dinizia excelsa</i>		<i>Mamilkara elata</i>		<i>Hymenaea sp.</i>		MEDL.	CAS.
	MEDL. %	CAS. %	MEDL. %	CAS. %	MEDL. %	CAS. %	MEDL. %	CAS. %	MEDL. %	CAS. %	MEDL. %	CAS. %	MEDL. %	CAS. %
Sem tratamento	95.24	82.61	89.47	95.24	81.82	75	95.45	75	94.12	89.47	95.83	84.62	92	83.212
Normalize	95.24	69.57	100	95.24	90.91	66.67	90.91	75	94.12	89.47	95.83	84.62	94.4	79.562
Derivative 1 ^a 15x2x1	90.48	95.65	100	100	72.73	75	86.36	75	94.12	84.21	95.83	84.62	89.6	85.7
Derivative 2 ^a 15x2x2	85.71	91.3	94.74	95.24	77.27	70.83	81.82	79.17	76.47	84.21	83.33	73.08	83.2	81.752
Multiplicative scatter correction	90.48	69.57	100	95.24	86.36	62.5	86.36	75	94.12	94.74	95.83	92.31	92	81.022
Absorbance to transmittance	80.95	69.57	89.47	90.48	100	79.17	86.36	79.17	100	100	100	92.31	92.8	84.672
Transmittance to absorbance	95.24	73.91	100	90.48	90.91	70.83	86.36	83.33	100	94.74	95.83	76.92	94.7	81.022
Standart normal variate	90.48	78.26	100	95.24	86.36	66.67	90.91	66.67	94.12	94.74	95.83	92.31	92.8	81.752

MEDL. - Espectros coletados próximo a medula; CAS. - Espectros coletados próximo a casca

Clas. ≥ 90% Clas. ≥ 70% Clas. < 70%

Fonte: Autor

Tabela 16 - Matriz de confusão com quantitativo de acertos e erros de classificação do modelo resultante da PLS-DA em Transmittance to Absorbance dos espectros coletados nas baquetas, adquiridos via fibra óptica, com validação cruzada e considerando os espectros adquiridos na superfície produzida com motosserra próximo a medula.

Espécies	NIR - Classificação das madeiras						n total	n acerto	% acerto
	GG	MM	CP	DE	ME	HM			
GG	20				1		21	20	95.2
MM		19					19	19	100.0
CP			20		1	1	22	20	90.9
DE			1	19	1	1	22	19	86.4
ME					17		17	17	100.0
HM				1		23	24	23	95.8
Total							125	118	94.7

GG - *Goupia glabra* Aubl.; MM - *Micropholis melinoniana* Pierre; CP - *Copaifera sp.*;
DE - *Dinizia excelsa* Ducke; ME - *Mamilkara elata* (Ducke) Chevalier; HM - *Hymenaea sp.*

Fonte: Autor

Considerando o modelo que apresentou melhor resultado na PLS-DA, para os espectros adquiridos próximo a casca na superfície produzida com motosserra, foi elaborada matriz de confusão para verificar a localização dos erros de classificação do NIR.

Dos 137 espectros coletados próximo a casca e submetidos a validação cruzada, 117 foram classificados de forma correta e 20 não foram classificados de forma correta, sendo os erros localizados em *Goupia glabra* (onde o NIR classificou uma amostra de forma errada, confundido com *Manilkara elata*), *Copaifera* sp. (onde o NIR classificou seis amostras de forma errada, confundido quatro com *Dinizia excelsa* e duas com *Hymenaea* sp.), *Dinizia excelsa* (onde o NIR classificou seis amostras de forma errada, confundindo duas com *Goupia glabra*, três com *Manilkara elata* e uma com *Hymenaea* sp.), *Manilkara elata* (onde o NIR classificou três amostras de forma errada, confundindo duas com *Copaifera* sp. e uma com *Hymenaea* sp.) e *Hymenaea* sp. (onde o NIR classificou quatro amostras de forma errada, confundindo duas com *Micropholis melinoniana* e duas com *Dinizia excelsa*). As demais amostras apresentaram 100% de acerto na classificação das espécies (Tabela 17).

Tabela 17 - Matriz de confusão com quantitativo de acertos e erros de classificação do modelo resultante da PLS-DA dos espectros coletados nas baquetas, com pré-tratamento matemático em 1ª derivada (15x2x1), adquiridos via fibra óptica, com validação cruzada e considerando os espectros adquiridos na superfície produzida com motosserra próximo a casca.

Espécies	NIR - Classificação das madeiras						n total	n acerto	% acerto
	GG	MM	CP	DE	ME	HM			
GG	22				1		23	22	95.7
MM		21					21	21	100.0
CP			18	4		2	24	18	75.0
DE	2			18	3	1	24	18	75.0
ME			2		16	1	19	16	84.2
HM		2		2		22	26	22	84.6
Total							137	117	85.7

GG - *Goupia glabra* Aubl.; MM - *Micropholis melinoniana* Pierre; CP - *Copaifera* sp.;
DE - *Dinizia excelsa* Ducke; ME - *Manilkara elata* (Ducke) Chevalier; HM - *Hymenaea* sp.

Fonte: Autor

Para os dados adquiridos via esfera de integração todos os modelos ajustados com espectros coletados próximo a medula apresentaram maiores percentuais médios de acertos na classificação, sendo os maiores percentuais médios para dados próximo a medula obtidos com a aplicação dos pré-tratamento matemático em 1ª derivada e 2ª derivada, ambos com percentuais médios de classificação iguais a 100%, enquanto que o melhor modelo ajustado para espectros coletados próximo a casca utilizou a aplicação do pré-tratamento matemático em 2ª derivada, alcançando percentual médio de classificação igual a 99,3% (Tabela 18).

Considerando a aplicação de validação cruzada e a aquisição espectral via fibra óptica, os resultados indicaram excelente potencial para discriminação das espécies tanto para coletas realizadas próximo a casca quanto próximo a medula, sendo que as amostras próximas a medula apresentaram maiores valores percentuais médios de assertividade, favorecendo a utilização da técnica na indústria, tendo em vista o elevado valor agregado da madeira que compõe o cerne.

Embora seja necessário o desenvolvimento de estudo específico, o resultado sugere que a maior assertividade em amostras próximas a medula pode estar relacionada a menor atividade biológica da região, quando comparado com as amostras mais próximas a casca.

Considerando os resultados observados na PLS-DA foi elaborada matriz de confusão com o objetivo de verificar onde foram localizados os erros de classificação do NIR para o modelo que apresentou melhor resultado considerando os espectros adquiridos próximo a casca na superfície produzida com motosserra.

Dos 137 espectros coletados próximo a casca e submetidos a validação cruzada, 136 foram classificados de forma correta (99,3%) e apenas uma não foi classificada de forma correta, sendo o erro localizado em *Dinizia excelsa* (onde o NIR classificou uma amostra de forma errada, confundindo com *Manilkara elata*). As demais amostras apresentaram 100% de acerto na classificação da espécie (Tabela 19).

Considerando aplicação da validação cruzada e aquisição espectral via esfera de integração os resultados indicam excelente potencial da técnica para discriminar espécies tanto para espectros coletados próximo a casca quanto próximo a medula, tendo apresentado melhores resultados para as amostras produzidas com madeira próxima a medula e maiores valores percentuais médios de assertividade quando comparado ao mesmo experimento realizado com espectros coletados via fibra óptica. O resultado observado também favorece o uso da técnica na indústria.

Tabela 18 - Resultado PLS-DA dos espectros coletados nas baquetas, via esfera de integração, com percentuais de acertos da validação cruzada considerando diferentes tratamentos matemáticos, espectros coletados nas superfícies produzidas com motosserra e avaliando a capacidade do modelo em diferenciar as assinaturas espectrais adquiridas em diferentes posições no sentido medula-casca no plano transversal.

Pré tratamento (10 VL)	NIR - Classificação												Média Acertos	
	Espécies e região de aquisição espectral													
	<i>Goupia glabra</i>		<i>Micropholis melinoniana</i>		<i>Copaifera sp.</i>		<i>Dinizia excelsa</i>		<i>Mamilkara elata</i>		<i>Hymenaea sp.</i>		MEDL.	CAS.
	MEDL. %	CAS. %	MEDL. %	CAS. %	MEDL. %	CAS. %	MEDL. %	CAS. %	MEDL. %	CAS. %	MEDL. %	CAS. %	MEDL. %	CAS. %
Sem tratamento	95.2	100	94.7	90.5	100	87.5	95.5	87.5	100	52.6	100	100	97.6	87.6
Normalize	85.7	95.7	94.7	95.2	100	87.5	95.5	91.7	100	78.9	100	96.2	96.1	91.2
Derivative 1 ^a 15x2x1	100	100	100	100	100	95.8	100	95.8	100	100	100	100	100	98.5
Derivative 2 ^a 15x2x2	100	100	100	100	100	100	100	95.8	100	100	100	100	100	99.3
Multiplicative scatter correction	85.7	95.7	94.7	100	100	91.7	95.5	87.5	100	68.4	100	100	96.1	91.2
Absorbance to transmittance	90.5	100	94.7	85.7	100	87.5	95.5	95.8	100	73.7	100	96.2	96.9	90.5
Transmittance to absorbance	95.2	100	94.7	85.7	100	87.5	95.5	95.8	100	68.4	100	96.2	97.6	89.8
Standart normal variate	90.5	100	100	95.2	100	91.7	95.5	95.8	100	68.4	100	100	97.6	92.7

MEDL. - Espectros coletados próximo a medula
CAS. - Espectros coletados próximo a casca

Clas. ≥ 90% Clas. ≥ 70% Clas. < 70%

Fonte: Autor

Tabela 19 - Matriz de confusão com quantitativo de acertos e erros de classificação do modelo resultante da PLS-DA em 2^a derivada dos espectros coletados nas baquetas, adquiridos via esfera de integração, com validação cruzada e considerando os espectros adquiridos na superfície produzida com motosserra próximo a casca.

Espécies	NIR - Classificação das madeiras						n total	n acerto	% acerto
	GG	MM	CP	DE	ME	HM			
GG	23						23	23	100.0
MM		21					21	21	100.0
CP			24				24	24	100.0
DE				23	1		24	23	95.8
ME					19		19	19	100.0
HM						26	26	26	100.0
Total							137	136	99.3

GG - *Goupia glabra* Aubl.; MM - *Micropholis melinoniana* Pierre; CP - *Copaifera sp.*;
DE - *Dinizia excelsa* Ducke; ME - *Mamilkara elata* (Ducke) Chevalier; HM - *Hymenaea sp.*

Fonte: Autor

4.5 Análise da capacidade de classificação do NIR considerando as diferenças nas assinaturas espectrais obtidas em diferentes posições no sentido medula-casca do plano transversal do disco e a análise individual das baquetas

Dos 264 espectros submetidos a classificação, 218 foram classificados corretamente e 46 não foram classificados corretamente. Amostras de *Goupia glabra* e *Micropholis melinoniana* obtiveram 100% de acertos na classificação e as amostras com menor valor percentual de classificação eram de *Copaifera* sp. (Tabela 20).

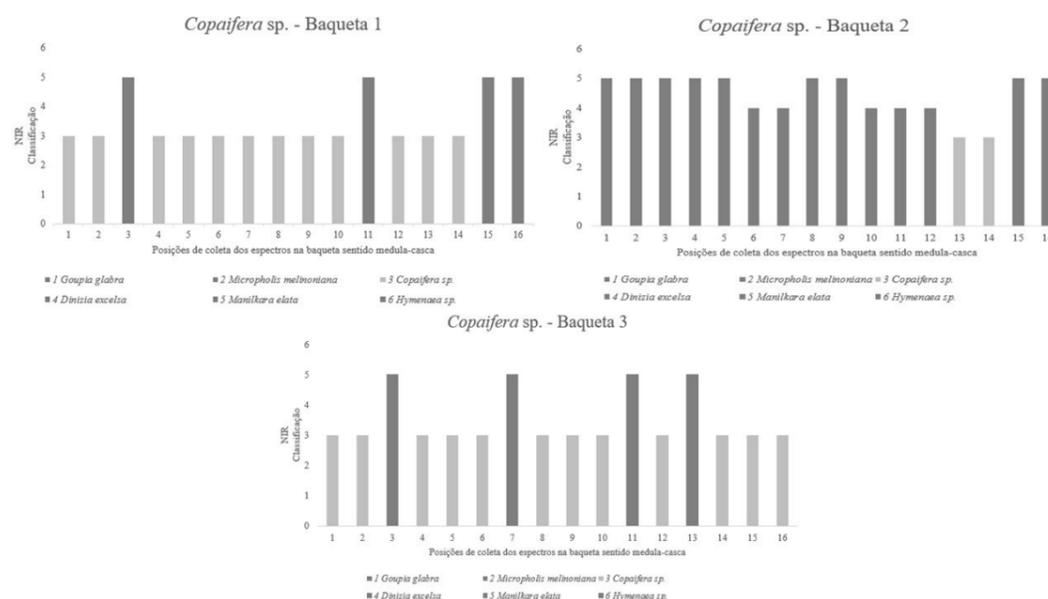
Tabela 20 – Resultado PLS-DA da validação independente utilizando espectros coletados nas baquetas, via esfera de integração, com aplicação de pré-tratamento em 2ª derivada e considerando a capacidade do modelo em classificar espectros coletados em diferentes posições da baqueta no sentido medula-casca.

	Geral	<i>Goupia glabra</i>	<i>Micropholis melinoniana</i>	<i>Copaifera</i> sp.	<i>Dinizia excelsa</i>	<i>Manilkara elata</i>	<i>Hymenaea</i> sp.
n total	264	44	40	48	46	36	50
n acerto	218	44	40	26	38	25	45
% acerto	82.6	100	100	54.2	82.6	69.4	90

Fonte: Autor

Para *Copaifera* sp., o resultado da análise indicou que o menor número de classificações corretas ocorreu na baqueta 2, com apenas dois acertos nos espectros coletados nas posições 13 e 14 (próximo a casca), e os demais espectros classificados de forma errada pelo NIR, sendo confundido nas posições 1, 2, 3, 4, 5, 8, 9, 15 e 16 com *Manilkara elata* e nas posições 6, 7, 10, 11 e 12 com *Dinizia excelsa*. Na baqueta 1 o NIR classificou corretamente os espectros coletados nas posições 1, 2, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 12, 13 e 14, no entanto os espectros das posições 3, 11, 15 e 16 foram classificados de forma errada sendo confundidos com *Manilkara elata*. Para baqueta 3 os erros de classificação ocorreram nas posições 3, 7, 11 e 13, sendo confundidos com *Manilkara elata*, os demais espectros foram classificados de forma correta. Os erros de classificação ficaram bem distribuídos nas posições próximas a medula e próximas a casca sendo os erros de classificação mais frequentes com *Manilkara elata* (Figura 19).

Figura 19 – Espectros coletados nas três baquetas de *Copaifera* sp. em diferentes posições no sentido medula-casca. (medula: próximo de 1)

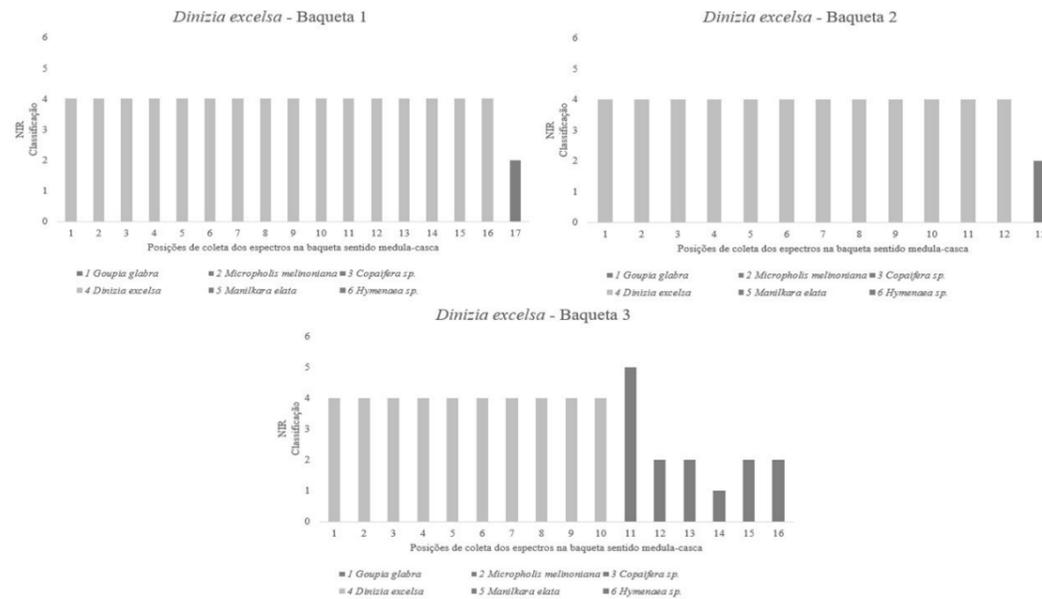


Fonte: Autor

O resultado das análises para as baquetas de *Dinizia excelsa* indicou o maior número de classificações erradas na baqueta 3 onde o NIR confundiu os espectros nas posições 12, 13, 15 e 16 com *Micropholis melinoniana*, o espectro na posição 11 com *Manilkara elata* e o espectro na posição 14 com *Goupia glabra*. Na baqueta 2 ocorreu apenas um erro de classificação na posição 13, onde o NIR confundiu com *Micropholis melinoniana*. Para baqueta 1 o espectro na posição 17 foi confundido com *Micropholis melinoniana*. Para todas as baquetas os erros de classificação ficaram concentrados nas posições próximas a casca e os erros de classificação mais frequentes ocorreram com *Micropholis melinoniana* (Figura 20).

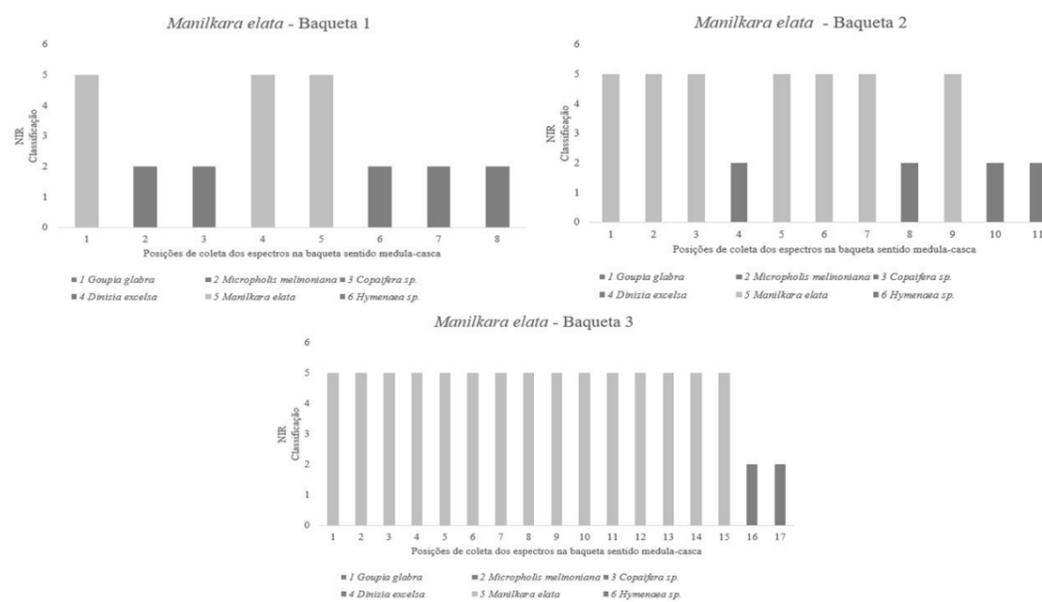
Para *Manilkara elata*, o resultado da análise indicou que o menor número de classificações corretas ocorreu na baqueta 1, com apenas três acertos nos espectros coletados nas posições 1, 4 e 5, já os demais espectros foram classificados de forma errada pelo NIR, sendo confundido nas posições 2, 3, 6, 7 e 8 com *Micropholis melinoniana*. Para baqueta 2 os erros de classificação dos espectros ocorreram nas posições 4, 8, 10 e 11 sendo confundidos com *Micropholis melinoniana*. Na baqueta 3 os espectros foram classificados de forma errada nas posições 16 e 17, sendo confundidos com *Micropholis melinoniana*. Para todas as baquetas os erros de classificação ficaram concentrados nas posições próximas a casca e para todos os erros observados o NIR confundiu com *Micropholis melinoniana* (Figura 21).

Figura 20 - Espectros coletados nas três baquetas de *Dinizia excelsa* Ducke em diferentes posições no sentido medula-casca. (medula: próximo de 1)



Fonte: Autor

Figura 21 - Espectros coletados nas três baquetas de *Manilkara elata* (Ducke) Chevalier em diferentes posições no sentido medula-casca. (medula: próximo de 1)

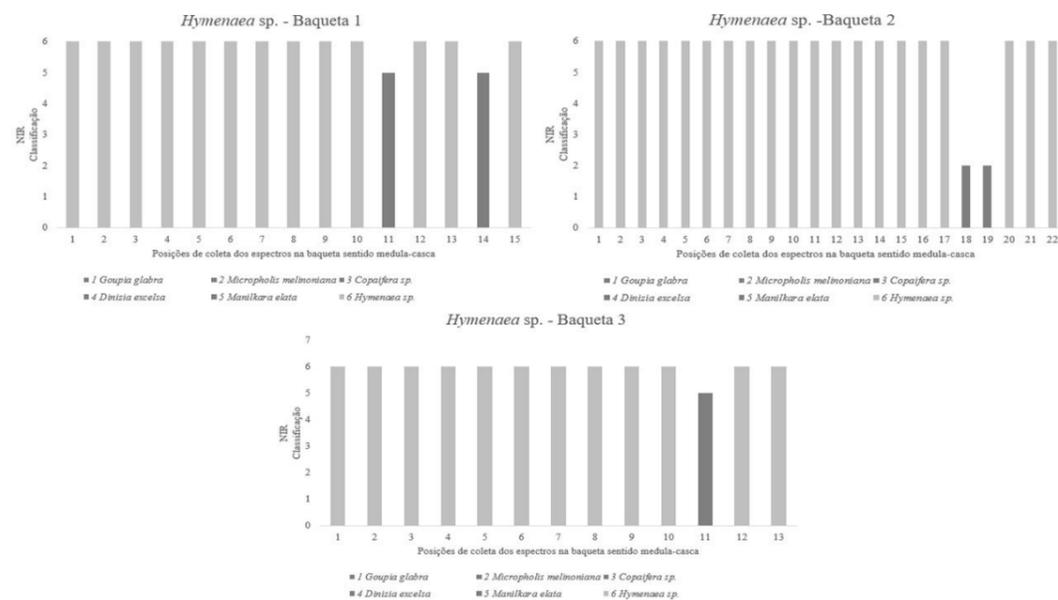


Fonte: Autor

Para *Hymenaea* sp., o resultado da análise indicou que o maior número de classificações corretas ocorreu na baqueta 3, onde apenas o espectro da posição 11 foi classificado de forma errada, sendo confundido com *Manilkara elata*. Na baqueta 1 os

erros de classificação ocorreram nas posições 11 e 14 sendo confundido com *Manilkara elata*. Para baqueta 2 as classificações erradas foram observadas nas posições 18 e 19 sendo confundida com *Micropholis melinoniana*. Para todas as baquetas os erros de classificação ficaram concentrados nas posições próximas a casca e os erros de classificação do NIR foram mais frequentes com *Manilkara elata* (Figura 22).

Figura 22 - Espectros coletados nas 3 baquetas de *Hymenaea* sp. em diferentes posições no sentido medula-casca. (medula: próximo de 1)



Fonte: Autor

4.6 Análise da capacidade de classificação do NIR em modelos calibrados com espectros coletados via esfera de integração e validados com espectros coletados via fibra óptica, considerando as faces produzidas com motosserra

O resultado da análise apresentou modelos com percentuais médios de classificação inferiores a 50%, sendo o modelo que recebeu aplicação de pré-tratamento matemático Absorbance to Transmittance com maior percentual médio para classificações (48,9%). O modelo que recebeu aplicação de pré-tratamento matemático normalizar apresentou o menor percentual médio de classificação para as espécies com 14,8% de acerto (Tabela 21).

Tabela 21 – Resultado da PLS-DA para modelos calibrados com espectros coletados via esfera de integração e validados com espectros coletados via fibra óptica. Todos adquiridos nas amostras em forma de baquetas em superfície produzida com motosserra, considerando a capacidade para classificação de espécies.

Pré tratamento (10 VL)	NIR - Classificação Espécies e Via de aquisição dos espectros						Média Acertos
	<i>Goupia glabra</i>	<i>Micropholis melinoniana</i>	<i>Copaifera</i> sp.	<i>Dinizia excelsa</i>	<i>Manilkara elata</i>	<i>Hymenaea</i> sp.	
	Calibração: ESF. Validação: FIB.	Calibração: ESF. Validação: FIB.	Calibração: ESF. Validação: FIB.	Calibração: ESF. Validação: FIB.	Calibração: ESF. Validação: FIB.	Calibração: ESF. Validação: FIB.	
Sem tratamento	22.7	42.5	10.4	32.6	25.0	0.0	21.2
Normalize	0.0	25.0	0.0	47.8	16.7	2.0	14.8
Derivative 1* 15x2x1	25.0	85.0	39.6	4.3	0.0	6.0	26.1
Derivative 2* 15x2x2	47.7	45.0	66.7	26.1	5.6	20.0	36.0
Multiplicative scatter correction	2.3	35.0	18.8	37.0	50.0	0.0	22.3
Absorbance to transmittance	65.9	32.5	37.5	43.5	86.1	28.0	48.9
Transmittance to absorbance	50.0	55.0	27.1	34.8	58.3	2.0	36.0
Standart normal variate	0.0	50.0	18.8	52.2	72.2	2.0	30.3

ESF. - Amostras adquiridas com esfera de integração
FIB. - Amostras adquiridas com fibra óptica

Clas. ≥ 70% Clas. ≥ 40% Clas. < 40%

Fonte: Autor

Amostras de *Micropholis melinoniana* e *Manilkara elata* registraram maiores valores percentuais de classificação para os modelos testados enquanto que para *Hymenaea* sp. foram observados os menores valores percentuais de classificação para essa abordagem.

Considerando os resultados observados na PLS-DA foi elaborada matriz de confusão com o objetivo de verificar onde foram localizados os erros de classificação do NIR para o modelo que apresentou melhor resultado.

Foram submetidos a validação independente 264 espectros, sendo classificados corretamente 125, enquanto 139 foram classificados de forma errada. Os erros de classificação ocorreram em todas as espécies. Para *Goupia glabra* ocorreram 15 classificações incorretas (onde o NIR confundiu sete espectros com *Copaifera* sp. e oito espectros com *Manilkara elata*), em amostras de *Micropholis melinoniana* foram observados 27 classificações incorretas (onde o NIR confundiu vinte e dois espectros com *Goupia glabra* e cinco espectros com *Manilkara elata*), para *Copaifera* sp. foram 30 classificações erradas (onde o NIR confundiu um espectro com *Goupia glabra* e vinte e nove espectros com *Manilkara elata*), para *Dinizia excelsa* foram 26 classificações erradas (onde o NIR confundiu um espectro com *Copaifera* sp. e vinte e cinco espectros com *Manilkara elata*), para *Manilkara elata* foram 5 classificações incorretas, todas

confundidas com *Copaifera* sp. e para *Hymenaea* sp. foram observadas 36 classificações incorretas, todas confundidas com *Manilkara elata* (Tabela 22).

Tabela 22 - Matriz de confusão com quantitativo de acertos e erros de classificação do modelo resultante da PLS-DA em Absorbance to Transmittance dos espectros coletados nas baquetas, calibrado com espectros coletados via esfera de integração e validado com espectros coletados via fibra óptica, considerando os espectros adquiridos na superfície produzida com motosserra.

Espécies	NIR - Classificação das madeiras						n total	n acerto	% acerto
	GG	MM	CP	DE	ME	HM			
GG	29		7		8		44	29	65.9
MM	22	13			5		40	13	32.5
CP	1		18		29		48	18	37.5
DE			1	20	25		46	20	43.5
ME			5		31		36	31	86.1
HM					36	14	50	14	28.0
	Total						264	125	48.9

GG - *Goupia glabra* Aubl.; MM - *Micropholis melinoniana* Pierre; CP - *Copaifera* sp.;
DE - *Dinizia excelsa* Ducke; ME - *Manilkara elata* (Ducke) Chevalier; HM - *Hymenaea* sp.

Fonte: Autor

O resultado da abordagem indicou um baixo percentual médio de assertividade quando comparado com as demais abordagens realizadas no estudo. Em bora seja necessário o desenvolvimento de estudo específico, o baixo percentual médio de acerto pode estar relacionado a diferenças na região espectral de atuação dos equipamentos, sugerindo a não utilização de modelos calibrados com espectros coletados em esfera de integração para uso em espectros adquiridos em fibra óptica.

5 CONCLUSÃO

Com base nos resultados do experimento e após o encerramento das análises, conclui-se que a espectroscopia no NIR associada à estatística multivariada apresenta potencial promissor para discriminar madeiras de espécies de ocorrência na Amazônia a partir de modelos multivariados de classificação.

A análise discriminante por quadrados mínimos parciais (PLS-DA) gerou valores percentuais de classificação acima de 90% para diferenciar árvores pertencentes a mesma espécie, indicando potencial para sua aplicação na elaboração de cadeia de custódia de PMFS. Para discriminação de madeiras de espécies diferentes, a melhor abordagem testada alcançou classificação média com 99,2% de acertos, demonstrando boa sensibilidade da radiação no NIR para determinação das espécies.

Quanto ao efeito da posição de coleta no plano transversal, os modelos baseados em espectros adquiridos próximo a medula apresentaram melhores percentuais de classificação em relação aos adquiridos próximo a casca, chegando a 100% de assertividade, portanto, sendo recomendado que as coletas para classificação de espécies ocorram nas regiões mais próximas a medula.

A espectroscopia no NIR foi sensível à qualidade da superfície da madeira, sendo que os modelos foram capazes de diferenciar com 98,4% de acertos as amostras cortadas com motosserra e serra circular, sendo que a diferença na qualidade da superfície da madeira não comprometeu o uso da técnica para classificar espécies.

A superfície produzida com serra circular apresentou melhor interação com a radiação no NIR e conseqüentemente as melhores classificações para espécies.

Os modelos baseados em espectros adquiridos via esfera integradora apresentaram os melhores percentuais de classificação de espécies madeireiras.

Modelos calibrados com espectros coletados via esfera de integração e validados com fibra óptica apresentaram percentuais médios de classificação inferiores a 50% não sendo recomendada essa abordagem para classificação de espécies.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALVES, R. C.; OLIVEIRA, J. T. S.; MOTTA, J. P.; PAES, J. B.; Elaboração de Uma Chave de Identificação das Principais Madeiras Comercializadas no Estado do Espírito Santo. Enciclopédia Biosfera, Centro Científico Conhecer - Goiânia, v.9, N.16; p. 979. 2013;
- ARAÚJO, A. M. Monitoramento de processos em tempo real via espectrometria no infravermelho próximo. 2007. 92 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Processos) – Universidade Tiradentes, Aracaju, 2007;
- BASTOS, L.F.; ALESSIO, K.O.; MENEZES, C.M.; COSTA, A.B.; MARDER, L.; Aplicação da espectroscopia no infravermelho próximo e da análise exploratória de dados para identificação de madeiras na indústria de móveis. Revista TECNO-LÓGICA, Santa Cruz do Sul, Vol. 16, n. 1, p. 25-29, jan./jun. 2012;
- BALDIN, T.; MARCHIORI, J, N, C.; DOS SANTOS, G, A, B.; GALLO, R.; DOS SANTOS, O.; VALENTE, B, M. R, T.; HEIN, P, R, G. Evaluation of Alternative Sample Preparation Methods for Development of NIR Models to Assess Chemical Properties of Wood. BioResources 13(3), 5394-5407, 2018;
- BRETERON, R. G. Introduction to multivariate calibration in analytical chemistry, Analyst, v. 125, p. 2125-2154, 2000.
- BURLEY, J. Genetic variation in wood properties. In: Baas P, editor. New perspectives in wood anatomy. Boston: Martinus Nijhoff, Dr. Junk Publishers; 1982;
- CAMARGOS, J. A. A.; CORADIN, V. T. R.; CZARNESKI, C. M.; OLIVEIRA, D.; MEGUERDITEHIAN, I. Catálogo de árvores do Brasil. Brasília, DF: IBAMA, 2001. 896 p;
- CARVALHO, J. B. M. O Norte e a indústria de óleos vegetais sob o aspecto técnico-econômico. Rio de Janeiro: Ministério da Agricultura, 1942. 135p.
- CARVALHO, J. O. P. de. Classificação em grupos ecológicos das espécies mais importantes em uma área da Floresta Nacional do Tapajós, Belterra, PA. Belém: Embrapa Amazônia Oriental, 2000. 4p. (Embrapa Amazônia Oriental. Comunicado Técnico, 41);
- CASCON, V. Copaíba - Copaifera spp. In: CARVALHO, J.C.T. Fitoterápicos antiinflamatórios: aspectos químicos, farmacológicos e aplicações terapêuticas. Ribeirão Preto: Tecmedd, 2004. 480p.
- CASTRO, T. C.; CARVALHO, J. O. P. Dinâmica da população de *Manilkara huberi* (ducke) a. Chev. durante 26 anos após a exploração florestal em uma área de terra firme na Amazônia brasileira. Ciência Florestal, Santa Maria, v. 24, n. 1, p. 161-169, jan.-mar., 2014;
- CENTNER, V.; MASSART, D. Elimination of uninformative variables for multivariate calibration. Analytical Chemistry, v. 68, n. 21, p.3851-3858, 1996.
- CORADIN, V. T. R.; CAMARGOS, J. A. A.; PASTORE, T. C. M.; CHRISTO, A. G. Madeiras comerciais do Brasil: chave interativa de identificação baseada em caracteres

gerais e macroscópicos = Brazilian commercial timbers: interactive identification key based on general and macroscopic features. Serviço Florestal Brasileiro, Laboratório de Produtos Florestais: Brasília, 2010. CD-ROM.

COSTA, L. R.; TRUGILHO, P. F.; HEIN, P. R. G. Evaluation and classification of eucalypt charcoal quality by near infrared spectroscopy. *Revista Biomass and Bioenergy*, n. 112, p. 85 – 92, 2018;

COSTA, L. R.; TONOLI, G. H. D.; MILAGRES, F. R.; HEIN, P. R. G. Artificial Neural Network and Partial Least Square Regressions for Rapid Estimation of Cellulose Pulp Dryness Based on Near Infrared Spectroscopic data. *Revista Carbohydrate Polymers* 224: 115186. 2019;

COSTA, A. C. P. R.; RAMALHO, F. M. G.; COSTA, L. R.; TRUGILHO, P. F.; HEIN, P. R. G. Classification of Commercial Charcoal for Domestic Use by Near Infrared Spectroscopy. *Revista Biomass and Bioenergy*, Vol. 127 pp.105280 ref.22;

COSTA, E. V. S.; ROCHA, M. F. V.; HEIN, P. R. G.; AMARAL E. A.; SANTOS L. M. S.; BRANDÃO, L. E. V. S.; TRUGILHO, P. F.; Influence of spectral acquisition technique and wood anisotropy on the statistics of predictive near infrared-based models for wood density. *Journal of Near Infrared Spectroscopy* 0(00) 1–11, 2018;

CURY, G.; TOMAZELLO FILHO, M. Descrição Anatômica de Espécies de Madeira Utilizadas na Construção Civil. *Floresta e Ambiente*. 18(3):227-236, 2011;

DURGANTE, F. M.; HIGUCHI, N.; ALMEIDA, A.; VICENTINI, A. Species Spectral Signature: Discriminating closely related plant species in the Amazon with Near-Infrared Leaf-Spectroscopy. *Forest Ecology and Management*. 209: 240-248., 2013;

DEFILIPPS, R. A.; MAINA, S. L.; CREPIN, J. Medicinal plants of the guianas (Guyana, Surinam, French Guiana). Washington, D.C.: Smithsonian Institution, 2004;

DICKISON, W. C. Integrative Plant Anatomy. London: Academic Press; 2000; Boletim de ocorrência;

ESTOPA, R. A.; MILAGRES, F. R.; OLIVEIRA, R. AUGUSTO.; HEIN, P. R. G. NIR - Spectroscopic Models for Phenotyping Wood Traits in Breeding Programs of *Eucalyptus Bentharii*. *Revista CERNE*, v. 22 n. 3, p. 367-375, 2017;

EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Embrapa Amazônia Oriental. Maçaranduba – *Manilkara huberi*. Belém. (Espécies Arbóreas da Amazônia, 4). 2004.6p;

EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Embrapa Amazônia Oriental Manual de identificação botânica e anatômica - angelim. Belém, Pará. 2004;

FERREIRA, G.C.; GOMES, J.I.; HOPKINS, M.J.G. Estudo anatômico das espécies de Leguminosae comercializadas no estado do Pará como "angelim". *Revista Acta Amazonica*. Vol. 34 (3). 2004;

FRANCISCO, S.G. Uso do óleo de copaíba (*Copaifera officinalis*) em inflamação ginecológica. *Femina*, v.33, n.2, p.89-93, 2005;

- GUIMARÃES, F. B.; TOMAZELLO FILHO, M.; RODRIGUES, A. C. Caracterização anatômica macroscópica do lenho de árvores de espécies de canela, *Ocotea* e *Nectandra* (Lauraceae), ocorrentes no estado de Santa Catarina. *Revista Biotemas*, 30 (3), setembro de 2017;
- GURGEL, E. S.; GOMES, J. I.; GROppo, M.; MARTINS-DA-SILVA, R.; DE SOUZA, A. S.; MARGALHO, L.; DE CARVALHO, L. T. Conhecendo Espécie de Plantas da Amazônia: Cupiúba (*Goupia glabra* Aubl. – Goupiaceae). Comunicado Técnico nº 262. EMBRAPA, Belém/PA, março, 2015;
- HAWKINS, D.M. The detection of error in multivariate data using principal components. In: *Journal American Statistical Association*. v. 69, p. 340-344, 1974.
- HERSCHEL, W. Experiments on the refrangibility of the invisible rays of the sun. January. 1800;
- HERINGER, E. P.; FERREIRA, M. B. Árvores úteis da região geo-econômica do Distrito Federal. *Dendrologia*. O gênero *Hymenaea* - jatobás, jataís, jataís. etc. Cerrado. Brasília. (27): 27-32, 1975;
- HIRAI, E. H.; CARVALHO, J. O. P.; PINHEIRO, K. A. O. Estrutura da população de maçaranduba (*Manilkara huberi* Standley) em 84ha de floresta natural na Fazenda Rio Capim, Paragominas, PA. *Revista de Ciências Agrárias*, Belém, v. 49, p. 65- 76, jan./jun. 2008;
- IBDF (Instituto Brasileiro de Desenvolvimento Florestal). *Potencial Madeireiro do Grande Carajás*. Brasília, 134 p. 1983;
- IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. *Censo Brasileiro de 2009/2017/2019*;
- KLITZKE, R. J.; SAVIOLI, D. L.; MUÑIZ, G. I. B.; e BATISTA, D. C. Caracterização dos lenhos de cerne, alburno e transição de jatobá (*Hymenaea* sp.) visando ao agrupamento para fins de secagem convencional. *Scientia Forestalis*. Piracicaba, v. 36, n. 80, p. 279-284, dez. 2008;
- LANG, C. O uso da espectroscopia do infravermelho próximo na identificação de espécies amazônicas em diferentes estádios do desenvolvimento. Dissertação (Mestrado); Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia/Programa de pós-graduação em Botânica – INPA; Manaus, 2014;
- LEÃO, N. V. M.; CARVALHO, J. E. U.; OHASHI, S. T. Tecnologia de sementes de espécies florestais nativas da Amazônia brasileira. In: SILVA, J. N. M.; CARVALHO, J. O. P. de; YARED, J. A. G. *A silvicultura na Amazônia Oriental: contribuições do Projeto Embrapa/DFID*. Belém: EMBRAPA Amazônia Oriental: DFID, 2001. p.139 -158;
- LOUREIRO, A. A.; SILVA, M. F. *Catálogo das madeiras da Amazônia*. Belem: SUDAM, 1968. p.167-168;
- LORENZI, H. *Árvores Brasileiras: manual de identificação e cultivo de plantas arbóreas nativas do Brasil*. 2ª edição. São Paulo: Plantarum, 1992. 352p;

MARTINS-DA-SILVA, R. C. V.; HOPKINS, M. J. G. & THOMPSON, I. S. 2003. Identificação botânica na Amazônia: situação atual e perspectivas. Belém, Embrapa Amazônia Oriental. (Documento 169). 81p;

MUÑIZ, G. I. B.; MAGALHÃES, W. L. E.; CARNEIRO, M. E.; VIANA, L. C.; Fundamentos e estado da arte da Espectroscopia no infravermelho próximo no setor de base florestal. *Revista Ciência Florestal*, Santa Maria, v. 22, n. 4, p. 865 - 875, out.- dez., 2012;

NUNES, C.A., FREITAS, M.P., PINHEIRO, A.C.M., BASTOS, S.C., (2012) Chemoface: a novel free user-friendly interface for chemometrics. *J. Braz. Chem. Soc.* 23, 2003–2010;

OLIVEIRA, A. A.; SIQUEIRA, P. H.; NISGOSKI, S.; BOLZON DE MUNIZ, G. I. Identificação de Madeiras utilizando a Espectrometria no Infravermelho Próximo e Redes Neurais Artificiais. *SciELO*; vol.16 no.2 São Carlos May/Aug. 2015;

PACE, J. H. C.; LATORRACA, J. V. F.; HEIN, P. R. G.; CASTRO, J. P.; CARVALHO, A. M.; SILVA, C. E.S. Wood species identification from Atlantic forest by near infrared spectroscopy. *Forest Systems*; 28(3), e015, 10 pg.; 2019;

PASQUINI, C. Review Near Infrared Spectroscopy: Fundamentals, Practical Aspects and Analytical Applications. *Journal of the Brazilian Chemical Society*, v. 14, n. 2, p. 198-219, 2003;

PASTORE, T. C. M.; BRAGA, J. W. B.; CORADIN, V. T. R.; CAMARGO, J. A. A.; DA SILVA, A. R. The use of near infrared spectroscopy to identify solid wood specimens of *swietenia macrophylla*. *International Association of Wood Anatomists – IAWA; Journal*, Vol. 32 (2), 2011: 285–296;

PASTORE, T. C. M.; BRAGA, J. W. B.; CORADIN, V. T. R.; MAGALHÃES, W. L. E.; OKINO, E. Y. A.; CAMARGOS, J. A. A.; MUNIZ, 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 curupixa. *Holzforschung*, Vol. 65, pp. 73–80, 2011;

PIGOZZO, R. J. B.; Espectroscopia no Infravermelho Próximo em madeiras neotropicais: Aplicação na identificação e predição de propriedades físicas. Dissertação de Mestrado. Instituto de Biociência da Universidade de São Paulo – Departamento de Botânica. 97p. São Paulo. 2011.

PROCÓPIO, L.C.; SECCO, R.S.; A importância da identificação botânica nos inventários florestais: o exemplo do “tauari” (*Couratari* spp. e *Cariniana* spp. - *Lecythidaceae*) em duas áreas manejadas no estado do Pará. *Revista Acta Amazonica* Vol. 38(1) p. 31 – 44. 2008;

PENNINGTON, T. D. Sapotaceae. *Flora Neotropica*, New York: The New York Botanical Garden, 1990. 770 p. (Monograph 52);

RAMALHO, F. M. G.; HEIN, P. R.G.; ANDRADE, J. M.; NAPOLI, A. Potential of Near-Infrared Spectroscopy for Distinguishing Charcoal Produced from Planted and Native Wood for Energy Purpose. *Revista Energy Fuels*, n. 31, p. 1593–1599, 2017;

- RAMALHO, F. M. G.; ANDRADE, J. M.; HEIN, P. R. G.; Rapid discrimination of wood species from native forest and plantations using near infrared spectroscopy. *Forest Systems*, v. 27 (2), e 008, 9 pages; 2018;
- RAMALHO, F. M. G.; SIMETTI, R.; ARRIEL, T. G.; LOUREIRO, B. A.; HEIN, P. R. G.; Influence of Particles Size on NIR Spectroscopic Estimations of Charcoal Properties. *Floresta e Ambiente*; 26 (Spec No 1), 2019;
- RAMALHO, R. S.; *Dendrologia I: Terminologia*. Viçosa: UFV; 1975;
- REIS, A. R.S.; Anatomia da madeira de quatro espécies de Aspidosperma Mart. & Zucc. Comercializadas no estado do Pará, Brasil. *Ciência da Madeira (Brazilian Journal of Wood Science)*. 6(1): 47-62, 2015;
- RIZZINI, C. T. *Árvores e madeiras úteis do Brasil*. São Paulo. E. Blucher, 1971. 294P;
- ROCHA, H. S.; BRAGA, J.W. B.; KUNZE, D. C. G. C.; CORADIN, V. T. R.; PASTORE, T. C. M. Identification of mahogany sliced veneer using handheld near-infrared spectroscopy device and multivariate data analysis. *International Association of Wood Anatomists - IAWA Journal* 0 (0), 2021;
- ROSADO, L. R.; TAKARADA, L. M.; ARAÚJO, A. C. C.; SOUZA, K. R. D.; HEIN, P. R. G.; ROSADO, S. C. S.; GONÇALVES, F. M. A. Near infrared spectroscopy: rapid and accurate analytical tool for prediction of non-structural carbohydrates in wood. *CERNE*, v. 25, n. 1, p. 84-92, 2019;
- 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* 32(3): 227–236 (2020);
- SILVEIRA, L. H. C.; REZENDE, A. V.; VALE, A. T. Teor de umidade e densidade básica da madeira de nove espécies comerciais amazônicas. *Acta Amazonica*. VOL. 43(2) 2013: 179 – 184;
- SOARES, L. F.; DA SILVA, D. C.; BERGOA, 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. *Quim. Nova*, Vol. 40, Nº. 4, 418-426, 2017;
- SOUZA, M. H. et al. *Madeiras tropicais brasileiras = brazilian tropical woods*. 2. ed. Brasília, DF: IBAMA. Laboratório de Produtos Florestais. p.82-83. 2002;
- SHANLEY, P.; MEDINA, G. [editores]. CORDEIRO, S.; VALENTE, A.; GUNN, B. [ilustradores]. IMBIRIBA, M.; STRYMPL, F.; SUNGKOWO, D. [desenhistas]. *Frutíferas e plantas úteis na vida amazônica*. Belém: CIFOR, Imazom, 2005. 300p. il;
- THOMAS, E.V. *A Primer on Multivariate Calibration*. Analytical Chemistry. v. 66, n. 15, p. 795-803, 1994;
- VALDERRAMA, P. Avaliação de figuras de mérito em calibração multivariada na determinação de parâmetros de controle de qualidade em indústria alcooleira por

espectroscopia no infravermelho próximo. 2005. Dissertação (mestrado), Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP. Campinas, São Paulo;

VEIGA JUNIOR, V.F.; PINTO, A.C. O Gênero *Copaifera* L. *Química nova*, v.25, n.2, p.273-86, 2002;

VIANA, L. C.; MUNIZ, G. I. B.; HEIN P. R. G.; MAGALHÃES, W. L. E.; CARNEIRO, M. E.; Nir Spectroscopy Can Evaluate The Crystallinity And The Tensile And Burst Strengths Of Nanocellulosic Films. *Maderas. Ciencia y tecnología* 18(3): 493 - 504, 2016;

WALTER, B. M. T. *Goupiaceae*. In: LISTA de Espécies da Flora do Brasil. Rio de Janeiro: Jardim Botânico do Rio de Janeiro, 2010;

YANG, Z.; LIU, Y.; PANG, X.; LI, K. Preliminary Investigation into the Identification of Wood Species from Different Locations by Near Infrared Spectroscopy. *Revista BioResources*, n. 10(4), p. 8505-8517, 2015;

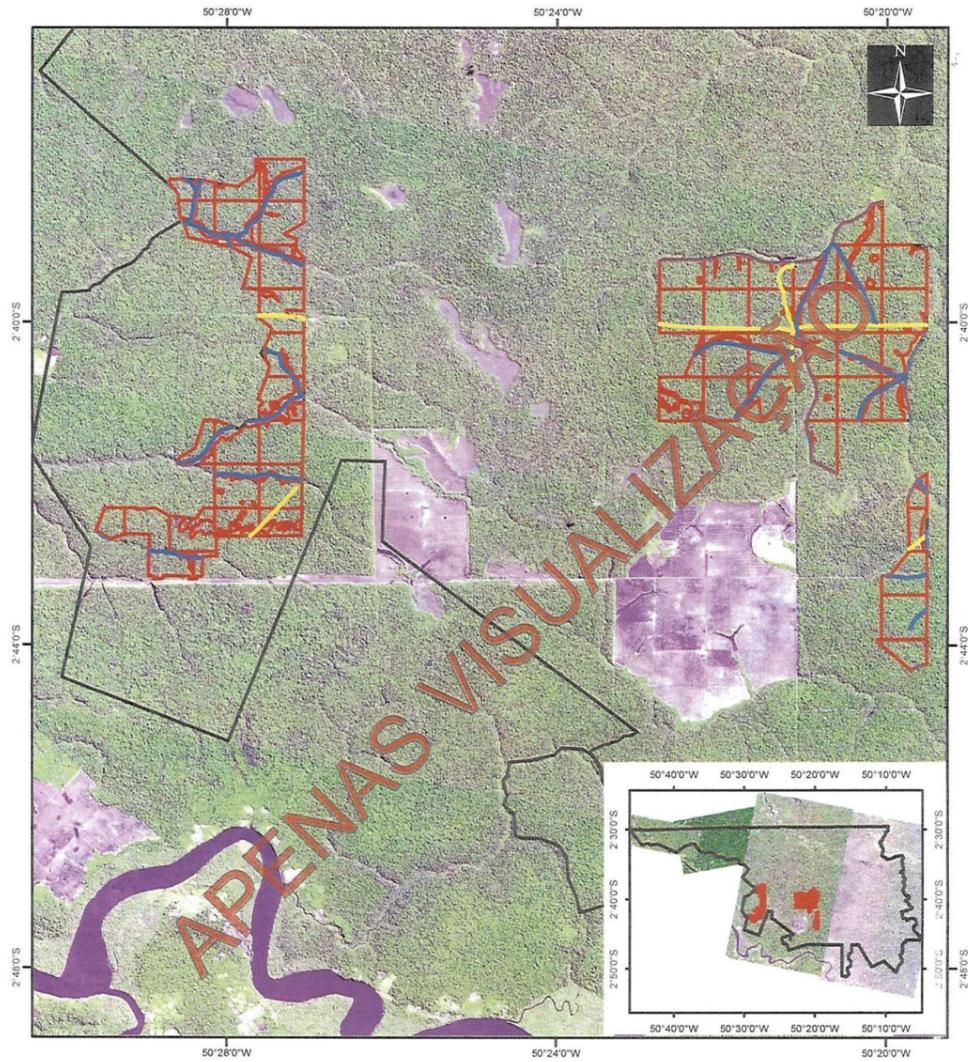
ZANUNCIO, A.J.V.; HEIN, P.R.G.; CARVALHO, A.G.; ROCHA, M.F.V.; CARNEIRO, A.C.O. Determination Of Heat-Treated Eucalyptus And Pinus Wood Properties Using Nir Spectroscopy. *Journal of Tropical Forest Science*, v. 30(1): 117–125, 2018;

ZENID, G. J.; CECCANTINI, G. C. T. Identificação macroscópica de madeiras. São Paulo: IPT, 2007. 24 p;

ANEXOS

Anexo A - Autorização de Exploração Florestal AUTEF

GOVERNO DO ESTADO DO PARÁ SECRETARIA DE ESTADO DE MEIO AMBIENTE E SUSTENTABILIDADE - SEMAS/PA					
Autorização para Exploração Florestal					
AUTEF Nº: 273389/2019		VALIDADE ATÉ: 09/10/2021			
Protocolo Nº: 2019/000000611 Data do protocolo: 07/01/2019		Cadastro Ambiental Rural Nº: 207211/2016 Licença Atividade Rural Nº: 13052/2018			
RESPONSÁVEL TÉCNICO:					
Engenheiro florestal: Charles Alves Maciel Neto		CREA: 1515011496			
DADOS DO PROPRIETÁRIO E DO IMÓVEL:					
PROPRIETÁRIO: Madreira J e Y LTDA e outros CPF/CNPJ: 08.328.063/0002-64					
DETENTOR: Madreira J e Y LTDA CPF/CNPJ: 08.328.063/0002-64					
IMÓVEL: FAZENDA PACAJÁ MUNICÍPIO: Portel COORDENADAS GEOGRÁFICAS: DATUM: SIRGAS2000 - W: 50:31:51,70 - S: 02:41:39,70 PORTE: F - II					
Área Total da propriedade:		145.680,7882 ha	Área de Reserva Legal:	116.285,0787 ha	
Área Total do MFS:		121.632,3690 ha	Área Antropizada:	260,6298 ha	
APP da UPA:		232,7460 ha	Área Autorizada:	4.116,0238 ha (UPA/2019)	
TIPOLOGIA LICENCIADA:					
2611-1 - Unidade de Produção Anual					
ÁREA LÍQUIDA AUTORIZADA:					
3.622,6180 ha (UPA/2019)					
QUANTIFICAÇÃO AUTORIZADA (Lista detalhada por essência no Anexo I)					
PRODUTO		Indivíduos	Qtd. por ha	Qtd. total	UNIDADE
Tora		16442	20,9074	75.748,1809	m3
LOCAL E DATA:		Belém - PA, 10 de outubro de 2019			
IMPORTANTE					
<ul style="list-style-type: none"> - A presente Autorização gera estrito direito de execução da atividade constante do Projeto, não produzindo direitos reais imobiliários, possessórios ou domínios sobre o imóvel objeto da mesma, e nem com efeitos sobre terceiros; - O uso irregular desta autorização implicará na sua cassação, bem como nas sanções previstas na Legislação vigente; - Esta autorização não contém emendas ou rasuras; - Cópia autenticada desta autorização deve ser mantida no local da exploração para efeito de fiscalização; - Os dados técnicos de exploração no plano são de inteira responsabilidade do Engenheiro responsável pela elaboração do PMFS; - A utilização, consumo e transporte de matéria-prima desta autorização estarão desobrigados da reposição florestal, nos moldes da Legislação vigente; - Dar cumprimento as condições constantes no verso deste documento (Anexo II). 					
Quadro de Nomenclatura - Áreas da Legenda na Carta-Imagem:					
DENOMINAÇÃO	NOMENCLATURA	DENOMINAÇÃO	NOMENCLATURA		
Área da Propriedade Rural Total	APRT	Área de Reserva Legal	ARL		
Área de Reserva Legal Compensada	ARLC	Área de Reserva Legal Degradada	ARLD		
Área Desmatada - conversão de solo	ADS	Área a ser Explorada pelo Projeto de Exploração Florestal - PEF	AEP		
Área com Exploração Florestal - Corte Seletivo	AEF	Área do Plano de Manejo Florestal Sustentável - PMFS	AMF		
Área de Preservação Permanente	APP	Área de Preservação Permanente em Área com Exploração Florestal	APPEF		
Área de Preservação Permanente Degradada	APPD	Área de Preservação Permanente em Reserva Legal	APPRL		
Área de Preservação Permanente em Área a ser Manejada - do PMFS	APPMF	Área Comunitária em Assentamentos Rurais	ACAR		



<p>Convenção/Legenda</p> <ul style="list-style-type: none"> Área do Imóvel Área de Preservação Permanente - APP (Sicar) Unidade de Produção Anual - UPA 16 / UT's Estradas 		<p>Governo do Estado do Pará Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Sustentabilidade - SEMAS</p> <p>Detentor / Propriedade Madeira J & Y LTDA Fazenda Pacajá</p> <p>Município PORTEL/ PA</p> <p>Elaboração e Execução Diretoria de Geotecnologias DIGEO/GEOTEC/SEMAS</p> <p>Análise Cartográfica Gerência de Suporte Geotecnológico ao Licenciamento Ambiental GEOTEC</p>	
<p>Escala 1:110.000</p>	<p>Data da Análise Agosto/2019</p>		
<p>Fonte: Santiago & Cintra Consultoria - SCCON Imagem de Satélite Planet 2 Mosaico (Julho/2019)</p>			

 GOVERNO DO ESTADO DO PARÁ SECRETARIA DE ESTADO DE MEIO AMBIENTE E SUSTENTABILIDADE - SEMAS/PA				
Autorização para Exploração Florestal				
AUDEF Nº: 273389/2019			VALIDADE ATÉ: 09/10/2021	
Protocolo Nº: 2019/000000611 Data do protocolo: 07/01/2019			Cadastro Ambiental Rural Nº: 207211/2016 Licença Atividade Rural Nº: 13052/2018	
QUANTIFICAÇÃO DE Tora - Autorizado no Plano Operacional Anual				
ESPÉCIES FLORESTAIS DO POA				
NOME CIENTÍFICO	NOME POPULAR	Indivíduos	QUANTIDADE (m3)	
			por ha	TOTAL
<i>Alexa grandiflora</i> Ducke	Melancieira	108	0,1966	709,3912
<i>Andira anethelmia</i> (Vell.) J.F.Macbr.	Sucupira	13	0,0193	70,2130
<i>Astronium lecointei</i> Ducke	Muiracatiara	344	0,5029	1.822,0323
<i>Bagassa guianensis</i> Aubl.	Tatajuba	18	0,0344	124,8936
<i>Carapa guianensis</i> Aubl.	Andiroba	664	0,5116	1.853,5485
<i>Cariniana micrantha</i> Ducke	Matamatá-vermelho	170	0,1257	455,6968
<i>Caryocar glabrum</i> (Aubl.) Pers.	Pequiarana	14	0,2378	861,7826
<i>Caryocar villosum</i> (Aubl.) Pers.	Pequiá	28	0,0686	248,8075
<i>Chrysophyllum argenteum</i> subsp. <i>auratum</i> (Miq.) T.D.Penn.	Guajará-branco	187	0,2384	863,8077
<i>Chrysophyllum venezuelanense</i> (Pierre) T.D.Penn.	Guajará	211	0,2302	833,9685
<i>Clathrotropis macrocarpa</i> Ducke	Timborana	1819	1,8684	6.768,7571
<i>Copaifera duckei</i> Dwyer	Copalba	73	0,1009	365,8767
<i>Cordia goeldiana</i> Huber	Freijó	14	0,0138	50,1222
<i>Couratari tauari</i> O.Berg	Tauari	1763	2,3834	8.634,3077
<i>Dinizia excelsa</i> Ducke	Angeлим-vermelho	321	0,9765	3.537,6200
<i>Dipteryx odorata</i> (Aubl.) Willd.	Cumarú	321	0,4006	1.451,4513
<i>Enterolobium schomburgkii</i> (Benth.) Benth.	Orelha-de-macaco	141	0,1907	690,9943
<i>Erisma uncinatum</i> Wurm.	Quarubarana	82	0,1394	505,1722
<i>Eschweillera coriacea</i> (DC.) S.A.Mori	Matamatá-branco	166	0,1190	431,1580
<i>Euplasia pinnata</i> I.M.Johnst.	Louro-fais	502	0,5408	1.959,3962
<i>Goupia glabra</i> Aubl.	Cupiúba	911	1,3591	4.923,7225
<i>Hymenaea courbaril</i> L.	Jacóba	148	0,2414	874,7600
<i>Hymenolobium excelsum</i> Ducke	Angeлим-pedra	48	0,0952	345,2160
<i>Lecythis pisonis</i> Cambess.	Sapucaia	153	0,2801	1.014,7098
<i>Macrolobium latifolium</i> Vogel	Peúba	1518	2,2128	8.016,2880
<i>Manilkara huberi</i> (Ducke) Chevalier	Maçaranduba	1173	1,3698	4.962,3786
<i>Manilkara paraensis</i> (Huber) Standl.	Maparajuba	1380	1,4484	5.247,1212
<i>Mezilaurus itauba</i> (Meisn.) Taub. ex Mez.	Itaúba	1	0,0008	2,9528
<i>Micropholis melinoniana</i>	Curupiká	155	0,2443	885,1311
<i>Neoxythece robusta</i>	Guajará Bolacha	1449	1,9326	7.001,3012
<i>Ocotea rubra</i> Mez	Louro-vermelho	184	0,2710	982,0793
<i>Platymiscium duckei</i> Huber	Macacaúba	9	0,0122	44,2676
<i>Pouteria pachycarpa</i> Pires	Goiabão	67	0,0667	241,7145
<i>Pouteria</i> sp.	Guajará-pedra	449	0,4613	1.671,2298
<i>Pterodon emarginatus</i> Vogel	Sucupira-lisa	60	0,0891	323,0937
<i>Qualea lancifolia</i> Ducke	Mandioqueira	7	0,0148	53,7591
<i>Sclerolobium guianense</i> Benth.	Taxi-branco	750	0,8081	2.927,7593
<i>Sterculia alata</i> Roxb.	Coco-pau	118	0,1861	674,4394
<i>Terminalia amazonica</i> (J.F.Gmel.) Exell.	Tanibuca	259	0,3569	1.293,1035
<i>Tetragastris panamensis</i> (Engl.) Kuntze	Barrote	302	0,2111	764,8491
<i>Trattinnickia burseraefolia</i> (Mart.) Willd.	Almesclão	42	0,0614	222,7812
<i>Vantanea cupularis</i> Huber	Uxirana	35	0,0371	134,5513
<i>Vatairea paraensis</i> Ducke	Angeлим-amargoso	188	0,2489	901,9745
TOTAL DE VOLUME AUTORIZADO		16442	20,9074	75.748,1809

 GOVERNO DO ESTADO DO PARÁ SECRETARIA DE ESTADO DE MEIO AMBIENTE E SUSTENTABILIDADE - SEMAS/PA	
Autorização para Exploração Florestal	
AUTEF Nº: 273389/2019	VALIDADE ATÉ: 09/10/2021
<small>Protocolo Nº: 2019/0000000611 Data do protocolo: 07/01/2019</small>	<small>Cadastro Ambiental Rural Nº: 207211/2016 Licença Atividade Rural Nº: 13052/2018</small>

Anexo II - Autorização para Exploração Florestal

Relação das Condicionantes

Informamos a Vossa Senhoria que durante a vigência da Autorização para Exploração Florestal de nº. 273389/2019 requerida no processo protocolado sob nº. 2019/0000000611 em 07/01/2019, deverá cumprir com as exigências abaixo relacionadas:

Item: Boletim de Análise

Prazo de 730 dias

É obrigatória a adoção de procedimentos que possibilitem o controle da origem da produção por meio da rastreabilidade da madeira das árvores exploradas, desde a sua localização na floresta até o seu local de desdobramento. (ART. 13 DA RESOLUÇÃO 406/CONAMA DE 02 DE FEVEREIRO DE 2009, e ART. 38 da IN/SEMAM nº 05, de 10 de setembro de 2015);

O Manejo Sustentável de Reserva Legal será submetido a vistorias técnicas para acompanhar e controlar rotineiramente as operações e atividades desenvolvidas na área de manejo; Desta forma, está SEMA/PA, a qualquer momento durante a fase exploratória deverá **FISCALIZAR** o objeto proposto e devidamente aprovado no PMFS/POA apresentado por este DETENTOR, sendo qualquer transgressão a tais proposições considerada CRIME AMBIENTAL, enquadrando o mesmo às sanções previstas na Lei Federal 9.605 de 1998 e DECRETO FEDERAL nº 6514 de 2008;

Consoante às premissas técnicas e legais da INSTRUÇÃO NORMATIVA/MMA nº 05 de 15 de dezembro de 2006 e Norma de Execução nº 01 de 24 de abril de 2007, determina-se, após o encerramento das atividades exploratórias autorizadas por esta AUTEF, a apresentação de RELATÓRIO DE ATIVIDADES, referente à exploração desta Unidade de Produção Anual - UPA, dentro dos parâmetros técnicos e exigências legais mencionadas nos dispositivos legais sobscritos, além de cronograma de execução de atividades pós-exploratórias atualizado, conforme exigências da IN/SECTAM nº 07 de 27 de setembro de 2006, Art. 30 da IN/SEMAM nº 05, de 10 de setembro de 2015 e RESOLUÇÃO DO CONAMA nº 406, de 02 de fevereiro de 2009; Ressalta-se que tais instrumentos técnicos deverão estar acompanhados de Anotação de Responsabilidade Técnica - ART, do Engenheiro Florestal responsável pela fase pós-exploratória do PMFS em tela, devidamente emitida e cancelada pelo Conselho Regional de Engenharia, Arquitetura e Agronomia - CREA.

Item: Pendência

Prazo de 30 dias

Publicar a licença ora concedida em jornal periódico de grande circulação local e no Diário Oficial do Estado (DOE). PROTOCOLAR CÓPIA na SEMAS (Resolução CONAMA/006 DE 24 DE JANEIRO DE 1986).

Solicitamos sua especial atenção para o fato de que o não atendimento das condições consignadas neste expediente, levará ao enquadramento automático do empreendimento nas normas penais da Legislação Ambiental em

 GOVERNO DO ESTADO DO PARÁ SECRETARIA DE ESTADO DE MEIO AMBIENTE E SUSTENTABILIDADE - SEMAS/PA	
Autorização para Exploração Florestal	
AUTEF Nº: 273389/2019	VALIDADE ATÉ: 09/10/2021
<small>Protocolo Nº: 2019/0000000611 Data do protocolo: 07/01/2019</small>	<small>Cadastro Ambiental Rural Nº: 207211/2016 Licença Atividade Rural Nº: 13052/2018</small>

vigor.

 PAULO ROGÉRIO DE ALMEIDA
 Diretoria de Gestão Florestal e Agrossilvipastoril -
 DGFLOR

 Walmir Carneiro Corumbá
 Coordenadoria de Gestão Florestal - COGEF

Assinado eletronicamente. A assinatura digital pertence a:

Walmir Carneiro Corumbá 10/10/2019 10:30;

PAULO ROGÉRIO DE ALMEIDA 10/10/2019 10:10;

conforme horário oficial de Belém. A autenticidade deste documento pode ser
 conferida no endereço: <https://titulo.page.link/f6fJ>



APENAS VISUALIZAÇÃO

Anexo B - Laudo de Determinação de madeiras

NIDx		Embrapa		
02/2020				
Laudo de Identificação de Madeira		Laboratório de Botânica Embrapa Amazônia Oriental		
Dados do Solicitante				
Nome: Thiago Valente Novaes (MESTRADO UFRA - Prof. Marcela).				
Pessoa (x) Física () Jurídica:		CPF ou CNPJ: 803.813.672 - 15		
Endereço: Tv. Barão do Triunfo N° 1929 Apto. 1601		Cidade: Belém UF: PA		
CEP: 66060 - 860		E-mail: valente.novaes@grail.com		
Telefone: (91) 99808-1101				
Dados do Material para Análise				
Tipo de Amostra: Corpo de prova orientado ()		Corpo de prova irregular (x)		
Local de Origem: Portel - PA		Quantidade de amostra: 18		
Data de Entrada no Laboratório: 14/02/2020.		Data de conclusão da análise: 14/02/2020.		
Identificador: Palmiro Alvão da Costa				
Processo utilizado para identificação				
Tipo de Análise	Unidade	Quantidade	Valor unit. (R\$)	
x Identificação taxonômica	Un.		80,00	
Microscópica completa (Corte, montagem e identificação)	Un.		150,00	
Resultado das Análises				
Nome sugerido p/ solicitante	Nome comercial usual	Nº. da amostra	Nome científico	Família
	Cupiúba	163733106	<i>Goupia glabra</i> Aubl.	Goupiaceae
	Cupiúba	166172264	<i>Goupia glabra</i> Aubl.	Goupiaceae
	Cupiúba	166071130	<i>Goupia glabra</i> Aubl.	Goupiaceae
	Curupixá	161912224	<i>Micropholis melinoniana</i> Pierre	Sapotaceae
	Curupixá	162527403	<i>Micropholis melinoniana</i> Pierre	Sapotaceae
	Curupixá	16166919	<i>Micropholis melinoniana</i> Pierre	Sapotaceae
	Copaiba	163431283	<i>Copaifera</i> sp.	Leg-Caesalpinaceae
	Copaiba	163431277	<i>Copaifera</i> sp.	Leg-Caesalpinaceae
	Copaiba	162623547	<i>Copaifera</i> sp.	Leg-Caesalpinaceae
	Angelim vermelho	16053046	<i>Dinizia excelsa</i> Ducke	Leg-Mimosoideae
	Angelim vermelho	160611002	<i>Dinizia excelsa</i> Ducke	Leg-Mimosoideae
	Angelim vermelho	164543561	<i>Dinizia excelsa</i> Ducke	Leg-Mimosoideae
	Maçaranduba	162725826	<i>Manilkara huberi</i> (Ducke) Chevalier	Sapotaceae
	Maçaranduba	164543765	<i>Manilkara huberi</i> (Ducke) Chevalier	Sapotaceae
	Maçaranduba	164136991	<i>Manilkara huberi</i> (Ducke) Chevalier	Sapotaceae

Anexo C - Laudo de Determinação de madeiras

	Jatobá	1645431665	<i>Hymenaea sp.</i>	Leg-Caesalpinioideae
	Jatobá	164543654	<i>Hymenaea sp.</i>	Leg-Caesalpinioideae
	Jatobá	164543634	<i>Himenaea sp.</i>	Leg-Caesalpinioideae

Belém, 14 de fevereiro de 2020



Fernanda Ilkiu Borges de Souza, Dra.
Pesquisadora - Curadora da Xiloteca