



CAIO PALMEIRA GOULART

**ESTIMATIVA DA UMIDADE DE TORAS DE *Eucalyptus* sp. EM CAMPO A PARTIR
DE ESPECTROMETROS NO NIR PORTÁTEIS**

LAVRAS-MG

2025

CAIO PALMEIRA GOULART

**ESTIMATIVA DA UMIDADE DE TORAS DE *Eucalyptus* sp. EM CAMPO A PARTIR
DE ESPECTROMETROS NO NIR PORTÁTEIS**

Projeto de dissertação apresentado à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós- Graduação em Ciência e Tecnologia da Madeira, para a obtenção do título de Mestre.

Prof. Dr. Paulo Ricardo Gherardi Hein
Orientador

Prof. Dr. Thiago de Paula Protásio
Co-orientador

LAVRAS-MG

2025

**Ficha Catalográfica elaborada pelo Sistema de Geração
de Ficha Catalográfica da Biblioteca Universitária da UFLA, com
dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).**

Goulart, Caio Palmeira.

Estimativa da umidade de toras de Eucalyptus sp. em campo a partir de
espectrometros no NIR portáteis / Caio Palmeira Goulart. - 2025.
52 p. : il.

Orientador: Paulo Ricardo Gherardi Hein

Coorientador: Thiago de Paula Protásio

Dissertação (Mestrado Acadêmico) - Universidade Federal de Lavras, 2025.
Bibliografia.

1. Indústria Madeireira. 2. Umidade da Madeira. 3. Espectroscopia NIR. 4.
Madeira Serrada. I. Gherardi Hein, Paulo Ricardo. II. Protásio, Thiago de Paula. III.
Universidade Federal de Lavras. IV. Título.

CAIO PALMEIRA GOULART

**ESTIMATIVA DA UMIDADE DE TORAS DE *Eucalyptus* sp. EM CAMPO A PARTIR
DE ESPECTROMETROS NO NIR PORTÁTEIS**

**ESTIMATION OF MOISTURE CONTENT OF *Eucalyptus* sp. LOGS IN THE FIELD
USING PORTABLE NIR SPECTROMETERS**

Projeto de dissertação apresentado à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós- Graduação em Ciência e Tecnologia da Madeira, para a obtenção do título de Mestre.

APROVADO em 23 de julho de 2025.

Dr. Paulo Ricardo Gherardi Hein – UFLA
Dr. Graziela Baptista Vidaurre Dambroz – UFLA
Dr.^a Fernanda Maria Guedes Ramalho – UFLA
Dr.^a Maria Fernanda Vieira Rocha – UFLA.

Orientador

Prof. Dr. Paulo Ricardo Gherardi Hein

Coorientador

Prof. Dr. Thiago de Paula Protásio

LAVRAS - MG

2025

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus pela saúde, força e determinação concedida para superar as dificuldades;

Aos meus pais André e Jú, minhas irmãs Jade e Marisa e meu irmão Arthur, meus exemplos, por todo suporte, compreensão, carinho e amor nos momentos em que mais necessitei, sempre me ajudando e apoiando minhas decisões. Espero um dia ser digno de seus esforços, pois estes foram fundamentais para que esta conquista se tornasse possível;

Ao professor, orientador e amigo Paulo Ricardo Gherardi Hein, que me abriu as portas para mais esta etapa da jornada acadêmica, pelo incentivo, apoio e conhecimento compartilhado durante todo o processo;

Ao meu co-orientador, professor Thiago de Paula Protásio, por sua disposição, pela disponibilidade e atenção, sendo muito importante no suporte e no desenvolvimento deste trabalho;

À toda equipe do Departamento de Ciência e Tecnologia da Madeira - DCTM, assim como os amigos e colegas de academia que contribuíram para meu desenvolvimento intelectual, seja compartilhando saberes, conhecimentos e no convívio diário através das atividades acadêmicas;

Aos amigos da escalada esportiva que se dedicam e se esforçam para manter ativa a prática do esporte na universidade, que sempre me incentivaram a superar os limites do corpo e da mente;

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq: grants nº. 406593/2021-3) e a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG: APQ-00742-2);

Por fim, a todos que de alguma forma direta ou indireta, fizeram parte da minha formação,

Muito obrigado!

RESUMO

A umidade afeta o desempenho operacional durante o processamento industrial da madeira. Apesar de moroso, o método gravimétrico tem sido amplamente utilizado para determinação da umidade da madeira. A espectroscopia no infravermelho próximo (NIR) tem sido utilizada para estimar as propriedades físicas e químicas dos materiais orgânicos de forma rápida e confiável e tem sido apontada como alternativa promissora para caracterização da madeira. O objetivo deste estudo foi desenvolver uma metodologia para aplicação da técnica NIR para monitorar a variação de umidade da madeira de toras empilhadas no campo por meio de espectrômetros portáteis. Com auxílio de uma furadeira portátil com broca e motosserra, amostras de serragem foram recolhidas de toras de *Eucalyptus* sp. recém abatidas e empilhadas no pátio de secagem. A serragem foi classificada em diferentes granulometrias, armazenadas em tubos falcon e utilizadas para coleta dos espectros e determinação da umidade em laboratório. Além disso, discos de madeira foram retirados das toras, seccionados em cunhas para determinação da umidade real da madeira e obtenção de espectros no NIR. Estes dados foram utilizados para calibrar e validar modelos para estimar a umidade da serragem com base nas assinaturas espectrais. O acompanhamento da secagem de toras no pátio foi realizado por meio de coletas espectrais e determinação da umidade da madeira de cunhas e de serragem produzida pelas brocas e motosserra pelo método gravimétrico durante a secagem das toras em intervalos de 15 dias. Espectros foram coletados nos equipamentos portáteis microNIR e TrinamiX na madeira amostrada da condição saturada até a umidade de equilíbrio. As informações foram avaliadas por análise de componentes principais (PCA) e os valores de umidade obtidos da serragem de madeira foram associados aos espectros no NIR por regressão dos mínimos quadrados parciais (PLS-R), a fim de ajustar modelos preditivos de umidade em tempo real. Resultados mostram que os modelos preditivos apresentaram elevado desempenho, com o MicroNIR apresentando $R^2_{cv} = 0,9370$ e RMSE = 4.3% para o modelo global, enquanto o modelo desenvolvido pelo TrinamiX apresentou $R^2_{cv} = 0,8735$ e RMSE = 6.1%. Portanto, observou-se forte relação entre a umidade da cunha e da serragem da tora, indicando que esses parâmetros podem ser usados como indicadores confiáveis de umidade da madeira. Além disso, os espectros NIR, adquiridos tanto pelo MicroNIR quanto pelo TrinamiX mostraram-se eficientes para estimativa da umidade da madeira em tempo real a partir da serragem. Esta abordagem pode ser utilizada na otimização industrial em larga escala, gerando produtos com maior qualidade tendo em vista o monitoramento da umidade do material antes do processo produtivo.

Palavras-chave: Indústria Madeireira; Umidade da Madeira; Espectroscopia NIR; Madeira Serrada.

ABSTRACT

Moisture affects operational performance during industrial wood processing. Although time-consuming, the gravimetric method has been widely used to determine wood moisture. Near-infrared (NIR) spectroscopy has been used to quickly and reliably estimate the physical and chemical properties of organic materials and has been identified as a promising alternative for wood characterization. The objective of this study was to develop a methodology for applying the NIR technique to monitor wood moisture variations in logs stacked in the field using portable spectrometers. Using a portable drill with a drill bit and a chainsaw, sawdust samples were collected from freshly felled *Eucalyptus* sp. logs stacked in the drying yard. The sawdust was classified into different particle sizes, stored in falcon tubes, and used for spectral collection and moisture determination in the laboratory. Furthermore, wooden discs were removed from the logs, sectioned into wedges to determine the actual wood moisture content, and obtained NIR spectra. These data were used to calibrate and validate models to estimate sawdust moisture content based on spectral signatures. Log drying in the yard was monitored through spectral collections and moisture content determination of wedge wood and sawdust produced by drills and chainsaws using the gravimetric method during log drying at 15-day intervals. Spectra were collected with portable microNIR and TrinamiX equipment on wood sampled from saturated to equilibrium moisture content. The information was evaluated by principal component analysis (PCA), and the moisture values obtained from sawdust were associated with the NIR spectra using partial least squares regression (PLS-R) to fit real-time moisture predictive models. The results show that the predictive models performed well, with MicroNIR presenting $R^2_{cv} = 0.9370$ and $RMSE = 4.3\%$ for the global model, while the model developed by TrinamiX presented $R^2_{cv} = 0.8735$ and $RMSE = 6.1\%$. Therefore, a strong relationship was observed between the moisture content of the wedge and sawdust, indicating that these parameters can be used as reliable indicators of wood moisture content. Furthermore, the NIR spectra acquired by both MicroNIR and TrinamiX proved to be efficient in estimating wood moisture content in real time from sawdust. This approach can be used in large-scale industrial optimization, generating higher-quality products by monitoring material moisture content prior to the production process.

Keywords: Timber Industry; Wood Moisture; NIR Spectroscopy; Lumber.

INDICADORES DE IMPACTO

O estudo avaliou a umidade da madeira de *Eucalyptus* sp em pátio de secagem utilizando a espectroscopia no infravermelho próximo (NIR). Os resultados mostraram confiabilidade das medições e os modelos preditivos apresentaram elevados desempenho, trazendo contribuições relevantes nos âmbitos ambiental, tecnológico e socioeconômico. O uso da espectroscopia no infravermelho próximo (NIR) para monitoramento da umidade da madeira representa um avanço significativo em termos de qualidade do processo de avaliação. A técnica se destaca pela rapidez na obtenção dos resultados, permitindo medições práticas e em tempo real diretamente no pátio de secagem, o que garante maior agilidade no acompanhamento da variação de umidade. Além disso, trata-se de um método não destrutivo, que dispensa a retirada de grandes amostras e preserva a integridade das toras destinadas ao uso industrial, evitando desperdícios. A confiabilidade da técnica confere segurança às análises, possibilitando o uso em rotinas de controle e tomada de decisão. Outro aspecto relevante é sua viabilidade de aplicação em escala industrial, uma vez que os equipamentos portáteis podem ser facilmente incorporados ao manejo do pátio, contribuindo para a padronização dos processos e para o aumento da eficiência operacional. Soma-se a isso o caráter sustentável do método, que reduz a geração de resíduos e o uso de insumos laboratoriais, consolidando-se como uma alternativa prática, precisa e ambientalmente responsável para o monitoramento da umidade da madeira.

IMPACT INDICATORS

The study evaluated the moisture content of Eucalyptus sp. wood in a drying yard using near-infrared (NIR) spectroscopy. The results demonstrated reliable measurements, and the predictive models demonstrated high performance, providing significant contributions in environmental, technological, and socioeconomic terms. The use of near-infrared (NIR) spectroscopy to monitor wood moisture represents a significant advance in the quality of the assessment process. The technique stands out for its rapid results, allowing practical, real-time measurements directly in the drying yard, ensuring greater agility in monitoring moisture fluctuations. Furthermore, it is a non-destructive method that eliminates the need for large samples and preserves the integrity of logs intended for industrial use, avoiding waste. The reliability of the technique provides reliable analyses, enabling its use in control and decision-making routines. Another relevant aspect is its feasibility for industrial-scale application, as portable equipment can be easily incorporated into yard management, contributing to process standardization and increased operational efficiency. Added to this is the method's sustainable nature, which reduces waste generation and the use of laboratory supplies, consolidating its position as a practical, accurate, and environmentally responsible alternative for monitoring wood moisture.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1-Espectro eletromagnético.....	20
Figura 2- Esquema de desenvolvimento do trabalho.....	35
Figura 3- Equipamentos NIR e faixa espectral.....	37
Figura 4- Comparação entre umidades. A- Umidade da cunha e serragem da cunha; B- Umidade da cunha 1 e furo 1 (próximo a medula); C- Umidade da cunha 2 e furo 2 D- Umidade da cunha 3 e furo 3 (próximo a casca).	39
Figura 5- Comparação entre umidades. A- Umidade da tora ponderada e cunha ponderada; B- Umidade da tora na posição 1 (região interna) e cunha 3 (próximo a casca); C- Umidade da tora na posição 2 (próxima a casca) e cunha 3 (próximo a casca); D- tora ponderada e cunha 3 (próximo a casca).	41
Figura 6- Comparação entre umidades. A- Umidade da serragem retirada pelo motosserra e cunha ponderada; B- Umidade da serragem retirada pelo motosserra e da cunha 3 (próxima a casca)	42
Figura 7- Espectros pelo MicroNIR. A- Espectros brutos pelo MicroNIR; B- Espectros 1º Derivada MicroNIR; F (furo na tora)) M (motosserra) e T (tora)	43
Figura 8- Espectros pelo TrinamiX. A- Dados brutos pelo TrinamiX; B- primeira derivada TrinamiXtosserra; F (furo na tora)) M (motosserra) e T (tora)	43
Figura 9- Análise dos escores da PCA. A) Dados brutos do MicroNIR; B) dados do MicroNIR tratados com primeira derivada; C) dados brutos do TrinamiX; D) dados do TrinamiX tratados com primeira derivada. (M) serragem por motosserra; (F) serragem do furo na cunha; (T) serragem do furo na tora.....	45
Figura 10- Análise de PLS-R pelos dados espectrais. A) Dados brutos MicroNIR; B) Dados MSC MicroNIR; C) primeira derivada MicroNIR; D) dados brutos TrinamiX; E) Dados MSC TrinamiX; F) primeira derivada TrinamiX.....	47
Figura 11- Regressão dos valores de umidade obtidos por MicroNIR (A) e TrinamiX. (B). F (serragem pelo furo na cunha)) M (serragem por motosserra) e T (serragem da tora)	48

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Calibrações e validações cruzadas para estimar a umidade da madeira com base em espectros NIR.....	46
--	----

LISTA DE SIGLAS

NIR – Near-Infrared (Infravermelho Próximo)

PLS-R – Partial Least Squares Regression (Regressão por Mínimos Quadrados Parciais)

PCA – Principal Component Analysis (Análise de Componentes Principais)

R² – Coeficiente de Determinação

RMSE – Root Mean Square Error (Raiz do Erro Quadrático Médio)

RMSE_c – Root Mean Square Error of Calibration (Raiz do Erro Quadrático Médio da Calibração)

RMSE_{cv} – Root Mean Square Error of Cross-Validation (Raiz do Erro Quadrático Médio da Validação Cruzada)

R²_c – Coeficiente de Determinação da Calibração

R²_{cv} – Coeficiente de Determinação da Validação Cruzada

MEMS – Micro-Electro-Mechanical Systems (Sistemas Microeletromecânicos)

LVF – Linear Variable Filter (Filtro Linear Variável)

PbS – Lead Sulfide (Sulfeto de Chumbo)

MSC – Multiplicative Scatter Correction (Correção Multiplicativa de Dispersão)

PSF – Ponto de Saturação das Fibras

T – Tora (umidade da serragem da tora)

F – Furo (umidade da serragem a partir do furo na cunha)

M – Motosserra (umidade da serragem a partir do motosserra)

SUMÁRIO

PRIMEIRA PARTE.....	14
1 INTRODUÇÃO.....	15
2 OBJETIVO	16
3 REFERENCIAL TEÓRICO	16
3.1 Aspectos gerais sobre a cultura do gênero <i>Eucalyptus</i>	16
3.2 Desafios e perspectivas para estimativas de umidade da madeira	17
3.3 Espectroscopia no infravermelho próximo (NIR).....	19
3.4 Aplicações NIR para avaliar umidade da madeira.....	21
REFERÊNCIAS	24
SEGUNDA PARTE - ARTIGO.....	30
RESUMO	31
ABSTRACT	32
1. INTRODUÇÃO.....	33
2. MATERIAL E MÉTODOS	34
2.1 Obtenção do material e coleta das amostras.....	34
2.2 Determinação da umidade.....	35
2.3 Coleta de dados espectrais.....	36
2.4 Análise de dados	37
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	38
3.1 Variação da umidade na madeira por posição e método de amostragem	38
3.2 Espectros por MicroNIR e TrinamiX.....	42
3.4 PCA das assinaturas espectrais obtidas com MicroNIR e TrinamiX	44
3.5 Resultados de PLS-R (MicroNIR e TrinamiX)	46
4 CONCLUSÃO.....	48
REFERÊNCIAS	49

PRIMEIRA PARTE

1 INTRODUÇÃO

A umidade da madeira afeta seu comportamento no decorrer de processamentos, secagem e preservação, além de afetar outras propriedades, como estabilidade dimensional. Na indústria madeireira, é essencial monitorar as mudanças na umidade durante a secagem, etapa essencial na fabricação da maioria dos produtos (Baliza *et al.*, 2022). Para avaliar a qualidade da madeira é necessário o conhecimento da umidade do material, pois normalmente a madeira fica empilhada e exposta as variações climáticas, assim de acordo com a posição e o tempo de exposição, existem grandes diferenças de umidade entre o material.

A partir disso, métodos precisos para monitoramento de umidade e controle adequado deste parâmetro são fundamentais para obter produtos de qualidade superior (Baliza *et al.*, 2022).

Dessa forma, a espectroscopia na região do infravermelho próximo (NIR) é uma ferramenta viável para tais aplicações pois trata-se de técnica não destrutiva que requer preparação mínima de amostras e utiliza alta penetração de radiação (Su *et al.*, 2022). Os espectros no NIR correlacionam-se com informações dos constituintes e propriedades do material e, quando combinados com análises multivariadas, pode-se obter modelos estatísticos que estimam parâmetros de interesse (Amaral *et al.*, 2020). Segundo Sandak *et al.* (2016), a análise de componentes principais (PCA) é a análise multivariada mais usada para avaliação qualitativa de espectros, enquanto para avaliação quantitativa, a regressão de mínimos quadrados parciais (PLS-R) é a mais comum.

A técnica NIR consiste o seu princípio de funcionamento em expor um espécime ao espectro da região do infravermelho próximo. Os espectros gerados contêm dados dos constituintes químicos do material que, quando relacionados aos resultados das análises convencionais, formam modelos estatísticos que explicam a maioria das informações nos espectros (Price *et al.*, 2001; Pavia *et al.*, 2010; Pasquini, 2018). A partir dele é possível estimar diversas propriedades contidas em materiais biológicos, como a madeira (Dahlbacka e Lillhonga, 2010; Tyson *et al.*, 2012; Tsuchikawa e Schwanninger, 2013; Tsuchikawa e Kobori, 2015; Arriel *et al.*, 2019).

Muitos estudos indicaram que a espectroscopia NIR é adequada para estimar a umidade da madeira. Alguns exemplos incluem desenvolvimento de modelos para estimar a umidade em madeira de eucalipto (Santos *et al.*, 2020), avaliação do desempenho de umidade usando NIR portátil adaptado para utilização em linha, comparados com os modelos de predição já implementados de NIR portátil (Leoni *et al.*, 2024), monitoramento do comportamento

hidromecânico da madeira durante a secagem utilizando NIR, análise de imagens (Amaral *et al.*, 2023) e monitoramento de dessorção de água de polpa de celulose por espectroscopia NIR (Medeiros *et al.*, 2023).

Apesar desses estudos terem mostrado que a técnica NIR é promissora para caracterização e classificação da madeira em condições de laboratório, é necessário desenvolver uma metodologia prática para aplicação do NIR em situação de campo, sobretudo com os equipamentos NIR portáteis, visando o monitoramento da umidade.

As informações metodológicas disponíveis na literatura em geral são úteis para os estudos realizados em laboratório, onde as condições são controladas. Contudo, ainda não está claramente compreendido se a aquisição espectral em serragem retirada de toras recém abatidas (ou durante a secagem) por furadeira ou motosserra possuem potencial para serem usadas em monitoramento de madeira em tempo real a partir de equipamentos portáteis. Assim, apesar de haver alguns trabalhos com umidade, poucos estudos foram feitos em pátio de secagem e nenhum deles com a serragem da madeira. Nesse sentido, o trabalho tem o objetivo de desenvolver uma metodologia para monitorar a umidade da madeira de toras empilhadas no campo, a partir de espectros no NIR.

2 OBJETIVO

O objetivo deste estudo foi desenvolver uma metodologia para monitorar a umidade da madeira de toras empilhadas no campo, incluindo as operações de retirada de amostras de madeira por furadeira ou motosserra, aquisição de espectros no NIR, tratamento nos dados, ajuste de regressões para estimar a umidade da madeira a partir de assinaturas espectrais.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 Aspectos gerais sobre a cultura do gênero *Eucalyptus*

O gênero *Eucalyptus* é nativo da Austrália e faz parte da família Myrtaceae, a qual essa família é composta por mais de 140 gêneros e 3800 espécies (Bachir e Benali, 2012). O gênero *Eucalyptus* é dividido em 13 subgêneros (Brezáni *et al.*, 2013; Salehi *et al.*, 2019) possuindo alguns registros recentes que indicam que o gênero *Eucalyptus* contém cerca de 900 espécies e subespécies (Stankov *et al.*, 2020).

A descoberta do eucalipto é atribuída às viagens do capitão James Cook no Endeavour do século XVIII. Um dos botânicos, David Nelson, na terceira viagem coletou espécimes e

estes foram estudados e depois publicados como a única espécie de um gênero recém-descoberto, que ele chamou de *Eucalyptus* por um botânico francês, Charles Louis L'Héritier de Brutelle. Este nome foi formado a partir dos termos gregos, "*eu*" significa bem e "*calyptos*" significa cobertos, que representa o *operculum* cobrindo os estames na raiz antes da antese (Brooker Botany, 2002).

Atualmente, no Brasil o eucalipto, abrange 76% da área plantada, permanecendo como a espécie mais cultivada, totalizando 7,6 milhões de hectares. Os plantios de eucalipto estão localizados, principalmente, nas regiões Sudeste e Centro-Oeste do país, com destaque para Minas Gerais (29%), Mato Grosso Sul (15%) e São Paulo (13%). Além disso, a produtividade do eucalipto no Brasil foi estimada em 32,7 m³/ha/ano (com casca), com uma duração média do ciclo de 6,7 anos (IBÁ, 2023).

O sucesso do *Eucalyptus* deve-se ao seu rápido crescimento e à capacidade de resistir e recuperar de condições ambientais adversas. Essas adaptações incluem padrão indeterminado de brotos, brotos epicórmicos, capacidade de corte, lignotúberes, casca resistente ao fogo e mecanismos para resistir à seca e ao ataque de insetos (Jacobs, 1955). Além disso, as árvores cultivadas no Brasil colocam o país como referência mundial na produção de celulose e papel, assim como matéria-prima para laminados de diversos tipos; de carvão vegetal, utilizado na indústria do aço, além de bioprodutos como tecidos, ceras e graxas, papeis para impressão, higiênicos, sanitários, fraldas, embalagens, moveis, palets, caixotarias, viscose, entre outros (IBÁ, 2023).

No entanto, a alta produtividade do eucalipto exige técnicas de manejo eficientes para garantir qualidade e sustentabilidade. Atualmente, métodos tradicionais de monitoramento — como a medição manual da umidade da madeira — podem ser lentos e pouco precisos, gerando gargalos na cadeia produtiva. Por isso, é essencial buscar soluções mais práticas, rápidas e inovadoras para otimizar processos, reduzir perdas e aumentar a competitividade do setor florestal.

3.2 Desafios e perspectivas para estimativas de umidade da madeira

A madeira tem sido um material estrutural dominante para muitas aplicações de serviço. Contudo, sua natureza higroscópica significa que ela tende a absorver a umidade do ambiente. A presença de muitos grupos funcionais hidrofílicos na madeira atrai as moléculas de água, resultando em comprometimento da estabilidade dimensional e resistência biológica (Thybring

et al., 2020; Fujimoto *et al.*, 2015). Essa umidade dentro do material influencia o desempenho de produtos de madeira, pois afeta características importantes do material, como a resistência à decomposição (Stamm *et al.*, 1946; Boddy, 1983), as propriedades mecânicas (Chow, 1972; Ishimaru *et al.*, 2001) e as dimensões (Sargent, 2019).

Embora a umidade não seja uma característica intrínseca da madeira, ela está entre suas propriedades mais importantes, pois sua variação afeta o comportamento do material durante as fases de processamento e aplicação industrial (Tsuchikawa e Schwanninger, 2013). As indústrias de celulose processam madeira na forma de cavaco e o conhecimento da umidade do material durante diversas etapas do processo produtivo é de grande importância, pois além de garantir a qualidade do produto final, reduz perdas e custos com reagentes Amaral *et al.* (2018). Assim, prever como a umidade afeta o desempenho da madeira é relevante para aplicações importantes da madeira, como a vida útil dos componentes de construção de madeira.

Em geral, a água pode estar presente em três estados diferentes na madeira: água livre e vapor de água podem ser encontrados no lúmen e água de ligação na parede celular. Essas três fases da água estão interagindo entre si. A água ligada à parede celular e o vapor de água, bem como a água livre no lúmen, em determinados momentos atingem o equilíbrio de pressão de vapor com a atmosfera, denominado umidade de equilíbrio higroscópico. A umidade é definida como a massa de água de ligação e de água livre pela massa seca de madeira, uma vez que a concentração de vapor de água é desprezível por ser muito menor que as demais contribuições (Krabbenhøft, 2004).

Durante a secagem, o primeiro tipo de água a ser liberado para a atmosfera é a água livre, ocasionando perda de massa da madeira. Quando toda a água livre é retirada da madeira tem-se o denominado ponto de saturação das fibras (PSF), variando em média entre 28 a 30% de umidade. Pode-se dizer que o PSF é alcançado quando a parede celular está completamente saturada de água, mas não existe água livre nos lúmens das células (Skaar, 1988).

Abaixo do PSF, a madeira começa a sofrer variações dimensionais, contraindo-se ao perder água ou inchando ao ganhar umidade. Essas variações dimensionais ocorrem de forma diferente em cada plano anatômico (longitudinal-tangencial, longitudinal-radial e transversal) e têm como consequência os defeitos nas peças de madeira. Empenamentos, abaulamentos, colapsos, encanoamentos e arqueamentos são alguns desses defeitos que podem vir a ocorrer em peças de madeira. Esses defeitos podem ser reduzidos controlando-se o processo de secagem (Braz *et al.*, 2015).

De acordo com Viscarra (1998), a perda de água pela madeira ocorre de forma diferente, ou seja, dependendo se a umidade está acima ou abaixo do PSF. Acima desse ponto, a

velocidade de secagem permanece constante, desde que a temperatura e umidade relativa do ar permaneçam estáveis. Abaixo do PSF, a água retida na madeira se move mais lentamente.

De acordo com Gatto (2002), a secagem natural ou ao ar livre consiste em empilhar a madeira em local ventilado e, preferencialmente, coberto, a fim de evitar a incidência direta dos raios solares e da chuva, fazendo-se o controle do teor de umidade em intervalos regulares até que ela atinja o valor desejado, geralmente, em razão do uso final a que a madeira se destina ou das condições climáticas da região.

O método mais simples e preciso para determinar o teor de umidade da madeira é o gravimétrico, considerado padrão de referência. No entanto, apresenta algumas desvantagens, como ser destrutivo, demandar longo tempo para a obtenção dos resultados e ser inadequado para espécies que contêm substâncias voláteis. A determinação da umidade também pode ser realizada por meio de medidores elétricos, que, embora sejam menos precisos, oferecem a vantagem de fornecer resultados de forma imediata (Forrer, 1984; Ponce & Watai, 1985; Skaar, 1988; Simpson, 1991; Haygreen & Bowyer, 1996; Forest Products Laboratory, 1999).

De acordo com Forrer (1984), Skaar (1988), Simpson (1991) e Forest Products Laboratory (1999), os medidores elétricos se dividem em dois tipos principais: Medidores resistivos, que avaliam a resistência elétrica ao fluxo de corrente contínua entre dois eletrodos inseridos na madeira e Medidores dielétricos, que determinam a constante dielétrica ou permissividade elétrica da madeira, utilizando corrente alternada.

No entanto, a obtenção de modelos para predição de umidade é desafiadora, pois as vias de fluxo de água líquida podem diferir entre as espécies de madeira, devido à heterogeneidade de distribuição de umidade na estrutura anatômica da madeira (Möttönen *et al.*, 2011). Dessa forma, técnicas avançadas de visualização de umidade são necessárias para estudar as características de secagem de materiais celulares e hidrofílicos da madeira, bem como para apoiar modernas construções de modelos computacionais de secagem de madeira (Nguyen *et al.*, 2021).

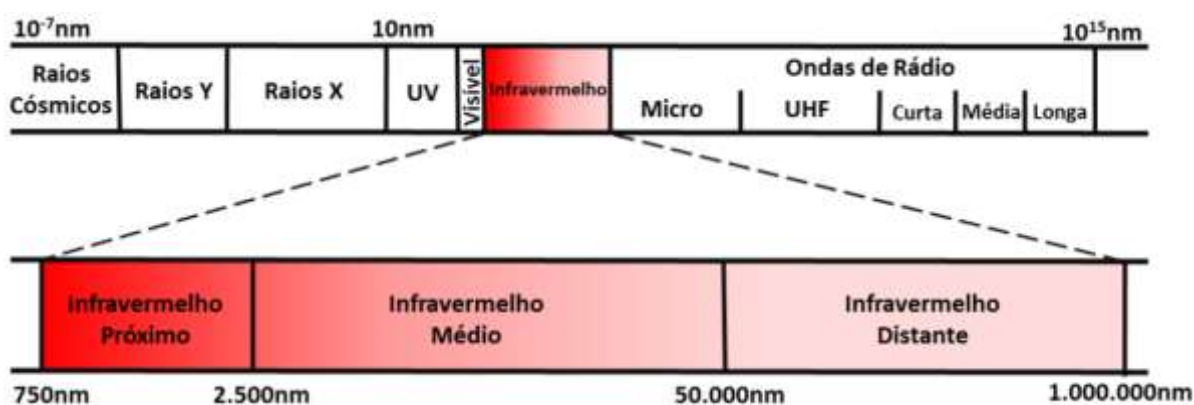
3.3 Espectroscopia no infravermelho próximo (NIR)

A espectroscopia NIR foi descoberta e utilizada na pesquisa agroindustrial por Karl Norris, pela primeira vez na década de 1960. A partir de então, expandiu-se rapidamente para cobrir uma ampla gama de produtos agrícolas (Norris e Butler, 1961). No setor florestal, o NIR foi investigado para avaliar o número kappa da polpa, demonstrando uma melhoria acentuada em comparação com instrumentos específicos (Birkett e Gambino, 1989).

Em resumo, essa técnica se baseia na medição da energia absorvida ou liberada pelas diferentes ligações moleculares presentes na amostra em comprimentos de onda específicos na banda de 750 a 2500 nm (Munck, 2007; Bec e Huck, 2019; Roitsch *et al.*, 2019; Bec *et al.*, 2020). A partir dessas características, os espectros NIR são complexas, em comparação com outros tipos de técnicas de espectroscopia, oferecendo dados significativos sobre as características físico-químicas da amostra (Munck, 2007; Bec *et al.*, 2020; Bec e Huck, 2019).

No entanto, em se tratando de técnica analítica, a espectroscopia NIR é considerada altamente reprodutível, rápida e não destrutiva, exigindo preparação mínima ou nenhuma da amostra (Munck, 2007; Bec e Huck, 2019; Bec *et al.*, 2020).

Figura 1- Espectro eletromagnético.



Autor: Amaral *et al.* (2018).

Em relação as limitações, o NIR apresenta exigência de grande número de amostras para uma calibração robusta do modelo e posteriormente para a manutenção da rotina de calibração para cada aplicação específica. Além disso, a previsão de parâmetros com valores fora do intervalo de treinamento também não é possível. Dessa forma, a espectroscopia NIR é uma técnica analítica secundária, que requer calibração para método de referência. A precisão dos modelos NIR são regidas pela precisão do método de referência (primário), isto é, os valores de referência medidos do conjunto de treinamento, normalmente obtidos por meio de técnicas tradicionais de laboratório (Chung, 2007).

Atualmente, diversas aplicações relacionadas à madeira têm sido exploradas a partir do NIR, incluindo previsão de propriedades químicas, físicas e mecânicas. Além disso, o NIR tem sido utilizado para classificação e identificação de espécies de madeira (Lima *et al.*, 2022a; Lima *et al.*, 2022b; Novaes *et al.*, 2023) e o desempenho de materiais de madeira e estruturas de papel (Tsuchikawa, 2007; Tsuchikawa, 2013).

O NIR é frequentemente combinado com métodos estatísticos multivariados para classificação, caracterização de materiais e controle de qualidade em diversos setores industriais, incluindo matérias-primas, indústrias farmacêuticas, química e de alimentos (Riba *et al.*, 2013; Bonifazi *et al.*, 2022). Dessa forma, para interpretação analítica do espectro NIR é necessário o uso de ferramentas de análise multivariada, de modo a pré-processar os dados, excluir ou modelar os sinais de interferentes a fim de realizar a diferenciação entre espectros de amostras distintas e quantificar propriedades de interesse (Braga e Magalhães, 2018).

Nesse sentido, a análise de componentes principais (PCA) é uma técnica exploratória de agrupamento não supervisionada que identifica tendências e reduz a multidimensionalidade do conjunto de dados (Szabo *et al.*, 2018). A PCA é um método pouco supervisionado, contudo bem conhecido, muitas vezes usado para redução da dimensionalidade de dados multivariados (Eriksson *et al.*, 2006) que é capaz de destacar características comuns que permitem agrupar amostras com composição semelhante e, portanto, atributos subjacentes, como mostrado em trabalhos anteriores (Acri *et al.*, 2016; Marsico *et al.*, 2018).

Da mesma forma, para calibração de modelos multivariados, o método dos mínimos quadrados parciais (PLS), do inglês (*Partial Least Square*) é um dos métodos mais utilizados, em razão de sua alta generalização e facilidade em resolver problemas (Cunha *et al.*, 2024). A PLS utiliza PCA nos dados de entrada e saída a fim de potencializar a covariância entre ambos (Hein, 2009). Sua principal vantagem está em poder adicionar ou retirar amostras do conjunto de calibração sem alteração dos parâmetros do modelo de forma significativa, mantendo os resultados confiáveis (Costa, 2003).

3.4 Aplicações NIR para avaliar umidade da madeira

O NIR é uma técnica analítica que tem sido explorada com madeira e tem sido testado em escala laboratorial em diferentes estudos e tem demonstrado potencial como ferramenta de controle de qualidade durante o processamento e fabricação de madeira (Cooper *et al.*, 2011).

Por exemplo, Santos *et al.* (2021) desenvolveram modelos para estimar umidade em 40 espécies de eucaliptos. Os autores observaram que os melhores modelos para estimar a umidade foram a partir de espectros NIR registrados na superfície transversal produzida com a serra de fita, utilizando a esfera integradora ($R^2p = 0,96$ e $RMSEP = 8,56\%$) e sonda de fibra óptica ($R^2p = 0,83$ e $RMSEP = 20,09\%$) na aquisição dos espectros.

No trabalho de Leoni *et al.* (2024) foi avaliado o desempenho de umidade usando NIR portátil adaptado para utilização em linha, comparados com os modelos de predição já implementados de NIR portátil. Diante da qualidade do cavaco de madeira industrial e o uso de três abordagens de réplicas diferentes, os resultados mostram um bom desempenho variando de $R^2_{cv} = 0,64$ a $0,86$ como coeficiente de determinação, com erros de predição de $4,44$ a $2,88\%$, confirmados por um viés de predição abaixo de $2,5\%$ para mais de 50% das amostras. Além disso, o controle de umidade atendeu às várias vantagens da técnica NIR, com potencial aplicação em linha para obter rastreamento de qualidade em tempo real.

Em outro estudo, Amaral *et al.* (2023) monitoraram o comportamento hidromecânico da madeira de eucalipto durante a secagem utilizando NIR e análise de imagens. A partir desse estudo, observaram que nas etapas iniciais da secagem, as extremidades do material apresentaram alta umidade em relação ao centro da amostra. Contudo, a perda de umidade foi 11% maior nas extremidades da tábua de madeira quando comparada ao seu interior, enquanto a retração nas zonas externas foi 3 vezes maior do que na parte interna. Nesse sentido, a técnica NIR associada pode ser uma ferramenta promissora para estimar valores de umidade.

Medeiros *et al.* (2023) monitoraram a dessorção de água de polpa de celulose por espectroscopia NIR. Os autores reportaram que, combinando a espectroscopia NIR com a técnica PLS-R, a umidade das polpas em diferentes condições foi estimada com R^2 variando de $0,89$ a $0,98$ para validação independente e erro quadrado médio radicular (RMSEP) variando de $5,1\%$ a $18,3\%$. Além disso, os modelos PLS-R foram aplicados aos espectros NIR retirados de outras polpas e as estimativas foram consistentes.

Toscano *et al.* (2022) avaliaram o desempenho de um espectrômetro NIR portátil para estimar a umidade de cavacos de madeira para combustível e relataram modelos preditivos com R^2_{cv} variando de $0,86$ a $0,89$. Além disso, uma única medida pode ser adquirida em poucos segundos, e o potencial de implantar a análise diretamente no armazenamento de combustível e em diferentes etapas da cadeia de suprimentos divulga uma ampla gama de opções para controlar eficientemente a qualidade do combustível.

No trabalho de Nunes *et al.* (2024) investigando a aplicação da espectroscopia NIR para estimar a densidade básica, umidade e poder calorífico de cavacos de madeira de híbridos de *Eucalyptus urophylla* $\times$ *Eucalyptus grandis* diretamente no pátio da empresa. Os modelos preditivos apresentaram coeficientes de determinação (R^2_{cv}) de $0,83$ para densidade básica, $0,81$ a $0,90$ para umidade e $0,74$ para poder calorífico.

A tecnologia NIR foi usada para estimar a umidade em cavacos de madeira por meio de PLS-R num estudo apresentado por Amaral *et al.* (2020). Os autores reportaram que o

modelo desenvolvido a partir de espectros registrados na face longitudinal por meio da esfera integradora apresentou estatística ligeiramente melhor ($R^2_{cv} = 0,96$; $RMSE_{cv} = 7,15\%$) do que o modelo baseado em sonda de fibra óptica ($R^2_{cv} = 0,90$; $RMSE_{cv} = 11,86\%$). Este estudo sugere que para calibração de modelo preditivo robusto para estimativa do teor de umidade em cavacos, os espectros devem ser registrados na superfície longitudinal da madeira usando o método de aquisição da esfera integradora.

Realizando teste de espectrômetro NIR baseado em sistema microeletromecânico portátil (MEMS) para estimar a umidade e a densidade básica de toras congeladas, Guillaume Hans *et al.* (2013) verificaram que modelos específicos de temperatura e modelos generalizados forneceram precisão de previsão semelhantes e não houveram efeitos de condição de temperatura no modelo PLS-R, tanto para a umidade quanto para a estimativa densidade básica.

Medeiros *et al.* (2024) utilizaram (PLS-DA) para classificar categorias de densidade e regressão por mínimos quadrados parciais (PLS-R) para desenvolver modelos preditivos. Utilizando dos mesmos métodos, Gomes *et al.* (2025) avaliou o efeito da umidade da madeira na capacidade preditiva dos modelos para discriminação de espécies com base em espectros NIR usando um espectrômetro de bancada e portátil. Os modelos PLS-DA classificaram com sucesso amostras de madeira desconhecidas por espécie com mais de 91% de precisão, independentemente do teor de umidade. Ambos os dispositivos NIR apresentam forte potencial para uso em inspeções florestais.

Baliza *et al.* (2022) utilizaram regressão multivariada para estimar a umidade a partir de espectros de infravermelho próximo (NIR) e regressão multivariada para monitorar a variação espacial na umidade da madeira durante a secagem ao ar e em estufa. Uma regressão baseada em NIR ($R^2_p = 0,90$ e $RMSEP = 10,51\%$) foi aplicada para estimar o teor de água, e seu gradiente espacial durante a secagem foi então mapeado. Essas análises revelaram a variação espacial da umidade dentro das peças de madeira durante a secagem.

Com isso, diversas são as vantagens de utilização do NIR, dada sua rapidez e natureza não destrutível. Principalmente para avaliação de umidade, dado que os espectros NIR contém abundantes informações de absorção em relação à água, tornando-se uma ferramenta importante para prever a umidade de amostras de madeira (Tsuchikawa *et al.*, 2023). Além disso, diversos estudos foram realizados em laboratório, com condições controladas, contudo, o presente trabalho foi feito no campo, simulando condições reais de ambiente.

REFERÊNCIAS

- ACRI, G.; TESTAGROSSA, B.; VERMIGLIO, G. FT-NIR Análise de diferentes cultivadores de alho. *J. A J. Comida Meas. - Caract*, 10, 127–136. 2016.
- AMARAL, E. A.; BALIZA, L. F.; SILVA, C. H.; RAMALHO, F. M. G.; TRUGILHO, P. F.; SOL, H.; HEIN, P. R. G. Estimation of moisture in wood chips by Near Infrared Spectroscopy. *Maderas, Cienc. tecnol.*, Concepción, v. 22, n. 3, p. 291-302, 2020.
- AMARAL, E. A.; BALIZA, L. F.; DOS SANTOS, L. M.; SHASHIKI, A. T.; TRUGILHO, P. F.; HEIN, P. R. G. Comportamento hidromecânico da madeira durante a secagem estudado por espectroscopia NIR e análise de imagens. *Holzforschung*, 77 (8), 618-628. 2023.
- ARRIEL, T.G.; RAMALHO, F.M.G.; LIMA, R.A.B.; SOUZA, K.I.R.; HEIN, P.R.G. TRUGILHO, P.F. Developing near infrared spectroscopic models for predicting density of Eucalyptus wood based on indirect measurement. *Cerne* 25(3): 294-300, 2019. <https://doi.org/10.1590/01047760201925032646>
- BACHIR, R. G.; BENALI, M. Antibacterial activity of the essential oils from the leaves of Eucalyptus globulus against Escherichia coli and Staphylococcus aureus. *Asian Pacific Journal of Tropical Biomedicine*, 2(9), 739–742. 2012. doi: 10.1016/S2221-1691(12)60220-2.
- BALIZA, L. F.; SILVA, C. H. D.; AMARAL, E. A.; RAMALHO, F. M. G.; TRUGILHO, P. F.; SUN, H.; and HEIN, P. R. G. Evaluation of the spatial variation in moisture content inside wood pieces during drying by NIR spectroscopy. *Holzforschung*, 77(2), 95-105, 2023.
- BIRKETT, M. D.; GAMBINO M. J. T. Estimativa do número kappa da polpa com espectroscopia no infravermelho próximo. *Tappi J.*;72: 193–7, 1989.
- BODDY, L. Efeito da temperatura e do potencial hídrico na taxa de crescimento de baidiomycetos de madeira. *Trans. Br. - O meu colar. Soc. - É o Soc*, 80, 141-149, 1983.
- BONIFAZI, G.; GASBARRONE, R.; PALMIERI, R.; SERRANTI, S. End-of-Life Textile Recognition in a Circular Economy Perspective: A Methodological Approach Based on Near Infrared Spectroscopy. *Sustainability*, 14, 10249, 2022.
- BRAGA, J. W. B.; DE OLIVEIRA MAGALHÃES, L. Capítulo 9. Equipamentos Portáteis de Espectrometria no Infravermelho Próximo. *Espectroscopia no Infravermelho Próximo para Avaliar Indicadores de Qualidade Tecnológica e Contaminantes em Grãos*, 159. 2018.
- BREZÁNI, V.; ŠMEJKAL, K. Secondary metabolites isolated from the genus Eucalyptus. *Current Trends in Medicinal Chemistry*, 7, 65–95. 2013.
- BRAZ, R. L.; DUARTE, A. P. C.; OLIVEIRA, J. T. D. S.; MOTTA, J. P.; ROSADO, A. M. Curva característica de secagem da madeira de Tectona grandis e Acacia mangium ao ar livre. *Floresta e Ambiente*, v. 22, p. 117-123, 2015
- CHOW, S.Z. Acessibilidade hidroxila, conteúdo de umidade e atividade bioquímica em paredes celulares de árvores Douglas-fir. *Tappi*, 55, 539-5544. 1972.
- CHUNG, H. Applications of Near-Infrared Spectroscopy in Refineries and Important Issues to Address. *Appl. Spectrosc. Rev.*, 42, 251–285. 2007.

COOPER, P. A.; JEREMIC, D.; RADIVOJEVIC, S.; UNG, Y. T.; LEBLON, B. Potential of near-infrared to characterize wood products. *Can J For Res* 41(11):2150–2157, 2011.

COSTA FILHO, P. A. Estudo comparativo de técnicas de inteligência artificial e modelos lineares em determinações quantitativas no infravermelho próximo. 2003. Tese. Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP. Campinas, São Paulo, 2003.

DA CUNHA, P. H. P.; FOLLI, G. S.; DIONISIO, S. J. I.; CALDEIRA, A. G.; FILGUEIRAS, P. R. Tutorial para aplicação didática de quimiometria em software gratuito—Parte II: Regressão por Mínimos Quadrados Parciais (PLS) em dados de infravermelho médio e próximo para determinação de teor de adulterantes e propriedades físico-químicas. *Revista Ifes Ciência*, 10(4), 01-16. 2024.

DAHLBACKA, J; LILLHONGA, T. Moisture measurement in timber utilising a multi-layer partial least squares calibration approach. *J Near Infrared Spec* 18(6): 425-432. 2010. <https://doi.org/10.1255/jnirs.906>

DOS SANTOS, L. M.; AMARAL, E. A.; NIERI, E. M.; COSTA, E. V. S.; TRUGILHO, P. F.; CALEGÁRIO, N.; HEIN, P. R. G. Estimating wood moisture by near infrared spectroscopy: Testing acquisition methods and wood surfaces qualities. *Wood Material Science & Engineering*, 16(5), 336-343, 2021.

ERIKSSON, L.; JOHANSSON, E.; KETTANEH-WOLD, N.; TRYGG, J.; WIKSTROM, C.; WOLD, S. Análise de dados multi e megavariada. Parte I: Princípios e Aplicações Básicas, 2a ed.; UMETRICS AB: Ume, Suécia, 2006.

FUJIMOTO, T.; NUMA, T.; KOBORI, H.; TSUCHIKAWA, S. Visualização da distribuição espacial do teor de umidade e densidade básica usando o método de imagem hiperspectral do infravermelho próximo em sugi (*Cryptomeria japonica*). *Int Wood Prod J* 6:46–48. 2015. <https://doi.org/10.1179/20426453Y.00000000084>

FORRER, J. B. An electronic system for monitoring gradients of drying wood. *Forest Products Journal, Madison*, v. 34, n. 7/8, p. 34-44, 1984.

FOREST PRODUCTS LABORATORY. Wood handbook - wood as an engineering material. Washington, D.C.: United States Department of Agriculture, 1999. 463 p.

GATTO, D. A. Avaliação quantitativa e qualitativa da utilização madeireira na região da quarta colônia de imigração italiana do Rio Grande do Sul [dissertação]. Santa Maria: Universidade Federal de Santa Maria; 2002.

GOMES, J. N. N, MEDEIROS, D. T, VIANA, L. C, & HEIN, P. R. G. Influência da umidade na identificação de espécies lenhosas tropicais por espectroscopia NIR. *Holzforschung*, 79 (4-5), 188-201. 2025.

GHASEMIAN, A.; ESLAMI, M.; HASANVAND, F.; BOZORGI, H. and AL-ABODI, H. R, Eucalyptus camaldulensis properties for use in the eradication of infections. *Comparative Immunology, Microbiology and Infectious Diseases*, 65, 234–237. 2019. doi: 10.1016/j.cimid.2019.04.007

HANS, G., LEBLON, B., STIRLING, R., NADER, J., LAROCQUE, A., & COOPER, P. Monitoramento do teor de umidade e gravidade específica básica em toras de abeto negro

usando um espectrômetro infravermelho próximo portátil baseado em MEMS. *The Forestry Chronicle*, 89 (5), 607-620. 2013.

HAYGREEN, J. G.; BOWYER, J. L. Forest products and wood science: an introduction. Iowa: Iowa State University Press: AMES, 1996. 484 p.

HEIN, P. R. G.; LIMA, J. T.; CHAIX, G. Robustness of models based on near infrared spectra to predict the basic density in *Eucalyptus urophylla* wood. *Journal of Near Infrared Spectroscopy*, v. 17, n. 3, p. 141-150, 2009.

INSTITUTO BRASILEIRO DE ÁRVORES. *Relatório Anual 2023*. São Paulo: IBA, 2023. Disponível em: <https://iba.org/>. Acesso em: 5 dez. 2024

ISHIMARU, Y.; ARAI, K.; MIZUTANI, M.; OSHIMA, K.; IIDA, I. Propriedades físicas e mecânicas da madeira após o condicionamento de umidade. *J. A J. A Wood Sci*, 47, 185-191, 2001.

JACOBS, M. R. Growth habits of the eucalypts. Forestry and Timber Bureau, Canberra, Australia, 1955.

KRABBENHØFT, K.; DAMKILDE, L. A model for non-Fickian moisture transfer in wood Mater. Struct., 37 (9), pp. 615-622, 10.1007/BF02483291, 2004.

LEONI, E.; MANCINI, M.; PICCHI, G.; TOSCANO, G. Performance evaluation of NIR spectrophotometer simulating in-line acquisition for moisture content prediction of woodchips and comparison with hand-held NIR spectrophotometer. *Fuel*, 357, 130015. 2024.

LIMA, M. D. R.; TRUGILHO, P. F.; BUFALINO, L.; JÚNIOR, A. F. D.; RAMALHO, F. M. G.; DE PAULA PROTÁSIO, T.; HEIN, P. R. G. Efficiency of near-infrared spectroscopy in classifying Amazonian wood wastes for bioenergy generation. *Biomass and Bioenergy*, v. 166, p. 106617, 2022a.

LIMA, M. D. R.; RAMALHO, F. M. G.; TRUGILHO, P. F.; BUFALINO, L.; JÚNIOR, A. F. D.; DE PAULA PROTÁSIO, T.; HEIN, P. R. G. Classifying waste wood from Amazonian species by near-infrared spectroscopy (NIRS) to improve charcoal production. *Renewable Energy*, v. 193, p. 584-594, 2022b.

NOVAES, T. V.; RAMALHO, F. M. G.; DA SILVA ARAUJO, E.; LIMA, M. D. R.; DA SILVA, M. G.; FERREIRA, G. C.; HEIN, P. R. G. Discrimination of Amazonian Forest species by NIR spectroscopy: wood surface effects. *European Journal of Wood and Wood Products*, v. 81, n. 1, p. 159-172, 2023.

MARSICO, A.D.; PERNIOLA, R.; CARDONE, M.F.; VELENOSI, M.; ANTONACCI, D.; ALBA, V.; BASILE, T. Estudo da Influência de Diferentes Cepas de Levedura na Fermentação do Vinho Tinto com Espectroscopia FT-NIR e Análise Principal de Componentes. *J. A J. Multidisciplinar. Sci. J. A J*, 11, 133-147. 2018.

MÖTTÖNEN, V.; KÄRKI, T.; MARTIKKA, O. Method for determining liquid water flow in wood during drying using a fluorescent dye tracer. *Eur J Wood Wood Prod* 69:287–293. 2011. <https://doi.org/10.1007/s00107-010-0424-z>

NGUYEN, D. M.; ALMEIDA, G. NGUYEN, T. M. L. *et al.* A critical review of current imaging techniques to investigate water transfers in wood and biosourced materials. *Transp Porous Media* 137:21–61, 2021.

NORRIS, K. H.; BUTLER, W. L. Técnicas para obter espectros de absorção em amostras biológicas intactas. *Ire Trans Biomed Electron IEEE.* ;8: 153–7, 1961.

OLIVEIRA, J. T. S.; HELLMEISTER, J. C.; TOMAZELLOFILHO, M. Variation of the moisture content and specific gravity in the wood of seven eucalypt species. *Revista Arvore*; 29: 115–127, 2005.

PASQUINI, C. Near Infrared Spectroscopy: a mature analytical technique with new perspectives - A review. *Anal Chim Acta* 1026(1): 8-36. 2018. <https://doi.org/10.1016/j.aca.2018.04.004>

PAVIA, D.L.; LAMPMAN, G.M.; KRIZ, G.S.; VYVYAN, J.R. Introdução a espectroscopia. 4th Ed. *Cengage Learning*: São Paulo, Brazil. 716p. 2010. <https://www.cengage.com.br/learning-solutions/introducao-a-espectroscopia-traducao-da-4a-edicao-norte-americana/>

PRICE, N.C.; DWEK, R.A.; WORMALD, M.; RATCLIFFE, R.G. Principles and problems in physical chemistry for biochemists. 3rd Ed. Oxford University Press: Oxford, UK. 401p. <https://iubmb.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/bmb.2002.494030030046>, 2001.

PONCE, R. H.; WATAI, L. T. Secagem da madeira. Brasília, D.F.: STI/IPT, 1985. 70 p.

RIBA, J. R.; CANALS, T.; CANTERO, R. Recovered Paperboard Samples Identification by Means of Mid-Infrared Sensors. *IEEE Sens. J*, 13, 2763–2770. 2013.

ROITSCH, T., CABRERA-BOSQUET, L., FOURNIER, A., GHAMKHAR, K., JIMÉNEZ-BERNI, J., PINTO, F., & OBER, E. S. New sensors and data-driven approaches—A path to next generation phenomics. *Plant Science*, 282, 2-10, 2019.

SALEHI, B.; SHARI, J.; QUISPE, C.; LLAIQUE, H.; VILLALOBOS, M.; SMERIGLIO, A.; TROMBETTA, D.; EZZAT, S. M.; SALEM, M. A.; ZAYED, A.; MARINA, C.; CASTILLO, S.; EMAMZADEH, S.; SEN, S.; ACHARYA, K.; SHAROPOV, F. and MARTINS, N. Insights into Eucalyptus genus chemical constituents, biological activities and health-promoting effects. *Trends in Food Science & Technology*, 91, 609–624. 2019. doi: 10.1016/j.tifs.2019.08.003

SANDAK, J.; SANDAK, A.; MEDER, R. Assessing trees, wood and derived products with near infrared spectroscopy: hints and tips. *J. Infrared Spectrosc.* 24 (6), 485–505, 2016.

SARGENT, R. Avaliando a estabilidade dimensional em madeira maciça: uma revisão da prática atual. *J. A J. A Wood Sci*, 65, 36, 2019.

SKAAR, C. Wood-water relations. New York: Springer-Verlag; 1988. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-73683-4>.

SØRENSEN, M.; RINNAN, R.; WOODROW, I.; MØLLER, B. L.; NEILSON, E. J. H. The entangled dynamics of eucalyptus leaf and flower volatile emissions. *Environmental and Experimental Botany*, 176, 104032. 2020. doi: 10.1016/j.envexpbot.2020.104032

STAMM, A. J.; BURR, H. K.; KLINE, A. Staybwood. Heat-Stabilized wood. *Industrial and Engineering Chemistry*. 38(6):630-4, 1946.

STANKOV, S.; FIDAN, H.; STEFANOVA, G.; KOSTOVA, I.; DAMYANOVA, S.; DIMITROVA-DYULGEROVA, I.; ERCISLI, S.; STOYANOVA, A. Chemical Composition and Antimicrobial Activity of Essential Oil from Aerial Part (Leaves and Fruit) of *Eucalyptus gomphocephala* DC. *Journal of Essential Oil-Bearing Plants*, 23(2), 204–212. 2020. doi: 10.1080/0972060X.2020.1727365.

SKAAR, C. Wood-water relations. New York: Springer-Verlag, 1988. 283 p.

SIMPSON, W. T. Dry kiln operator's manual. Madison: United States Department of Agriculture - USDA, 1991. 274 p.

SU, K.; MAGHIRANG, E.; TAN, J.W.; YOON, J.Y.; ARMSTRONG, P.; KACHROO, P.; HILDEBRAND, D. NIR spectroscopy for rapid measurement of moisture and cannabinoid contents of industrial hemp (*Cannabis sativa*). *Ind. Crop. Prod.* 184, 115007 <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2022.115007>, 2022.

SZABO, E. S.; GERGELY, E. A. O.; SALGO. Análise discriminante linear, análise discriminante de mínimos quadrados parciais e modelagem independente suave de analogia de classe de espectros de infravermelho próximo experimental e simulado de um meio de cultivo para células de mamíferos. *Journal of Chemometrics* 32 (4):e3005. 2018. doi: <https://doi.org/10.1002/cem.3005>(aberto em uma nova janela).

TAYLOR & FRANCIS. Brooker Botany of Eucalyptus. In: *Eucalyptus: The Genus Eucalyptus*, Edits., J.J.W. Coppen, pp. 4, London, CRC Press, 2002. Link: <https://pdfcoffee.com/258771886-eucalyptus-the-genus-eucalyptuspdf-pdf-free.html> Acesso em: 14 de fevereiro de 2025.

THYBRING, E. E.; PIQUERAS, S.; TARMIAN, A.; BURGERT, I. Acessibilidade à água a hidroxilas confinadas em paredes de células de madeira maciça. *Cóslepol* 27:5617–5627. 2020. <https://doi.org/10.1007/s10570-020-03182-x>

TOSCANO, G.; LEONI, E.; GASPERINI, T.; PICCHI, G. Performance of a portable NIR spectrometer for the determination of moisture content of industrial wood chips fuel. *Fuel*, 320, 123948, 2022.

TSUCHIKAWA, S. Uma revisão da pesquisa recente de infravermelho próximo para madeira e papel. *AppliSpectrosc Rev* 42(1):43–71, 2007.

TSUCHIKAWA, S.; INAGAKI, T.; MA, T. Application of near-infrared spectroscopy to forest and wood products. *Current Forestry Reports*, 9(6), 401-412, 2023.

TSUCHIKAWA, S.; KOBORI, H. A review of recent application of near infrared spectroscopy to wood science and technology. *J Wood Sci* 61(3): 213-220. 2015. <https://doi.org/10.1007/s10086-015-1467-x>

TSUCHIKAWA, S.; SCHWANNINGER, M. A review of recent near-infrared research for wood and paper (Part 2). *Appl Spectrosc Rev* 48(7): 560-587. 2013. <https://doi.org/10.1080/05704928.2011.621079>

TSUCHIKAWA, S.; TSUTSUMI, S. Adsorptive and Capillary Condensed Water in Biological Material. *J. Mater. Sci. Lett*, 17 (8), 661–663. 1998.
<https://doi.org/10.1023/A:1006672324163>.

TYSON, J.A.; SCHIMLECK, L.R.; AGUIAR, A.M.; ABAD, J.I.M.; REZENDE, G.D.S.P; MAMBRIM, O. Development of near infrared calibrations for physical and mechanical properties of eucalypt pulps of mill-line origin. *J Near Infrared Spec* 20(2): 287-294. 2012.
<https://doi.org/10.1255/jnirs.988>

VIEIRA NUNES, SÂMARA MAGDALENE; DIAS, THALLES LOIOLA; BALDIN, TALITA; BARAÚNA, EDY EIME PEREIRA; GHERARDI HEIN, PAULO RICARDO. NIR-based models for the evaluation of basic density, moisture and higher heating value of industrial wood chips. *Wood Material Science and Engineering*, v. 19, p. 1-8, 2024.

VISCARRA, S. Guía para el secado de la madera em hornos. Bolivia: USAID; Documento Técnico 69, 1998.

SEGUNDA PARTE - ARTIGO

DESENVOLVIMENTO DE METODOLOGIA PARA ESTIMATIVA DA UMIDADE DE TORAS DE *Eucalyptus* sp. EM CAMPO A PARTIR DE ESPECTROMETROS NO NIR PORTÁTEIS

RESUMO

O desempenho dos produtos madeireiros está intimamente ligado ao seu teor de água, que influencia nas suas propriedades físicas, mecânicas e químicas. Alguns métodos são utilizados para medir a umidade da madeira, dentre eles, técnicas gravimétricas tradicionais e o uso de higrômetros. Contudo, uma técnica mais prática e não destrutiva é a Espectroscopia do infravermelho próximo (NIR), que se baseia na interação da luz infravermelha próxima com vibrações moleculares na amostra, permitindo a análise não destrutiva e rápida de várias propriedades, incluindo a umidade. O objetivo deste estudo foi mensurar a umidade de madeira de *Eucalyptus* sp. a partir de espectros de NIR portátil em pátio de secagem. Com auxílio de uma furadeira portátil e uma broca, amostras de serragem foram recolhidas de toras de *Eucalyptus* sp. recém abatidas e empilhadas no pátio de secagem. A serragem foi classificada em diferentes granulometrias, armazenadas em Falcon e utilizadas para coleta dos espectros e determinação da umidade em laboratório. Além disso, discos de madeira foram retirados das toras, seccionados em cunhas para determinação da umidade da madeira em estufa e obtenção de espectros no NIR. Estes dados foram utilizados para calibrar e validar modelos para estimar a umidade da serragem, segundo suas assinaturas espectrais. O acompanhamento da secagem de toras no pátio foi realizado por meio de coletas espectrais e determinação da umidade da madeira da cunha e da serragem produzida pelas brocas e motosserra pelo método gravimétrico durante a secagem em intervalos de 15 dias até o equilíbrio higroscópico. Espectros foram coletados nos equipamentos portáteis microNIR e TrinamiX na madeira amostrada da condição saturada até a umidade de equilíbrio. As informações foram avaliadas por análise de componentes principais (PCA) e os valores de umidade obtidos da serragem de madeira foram associados aos espectros no NIR por regressão dos mínimos quadrados parciais (PLS-R), a fim de ajustar modelos preditivos de umidade em tempo real. Resultados mostraram que os modelos preditivos apresentaram elevado desempenho, com o MicroNIR indicando $R^2_{cv} = 0,9370$ e $R^2_c = 0,9662$ com o modelo global, enquanto o modelo desenvolvido pelo TrinamiX teve $R^2_{cv} = 0,9045$ e $R^2_c = 0,8735$. Portanto, observou-se forte relação entre a umidade da cunha e da serragem da tora, indicando que esses parâmetros podem ser usados como indicadores confiáveis de umidade da madeira. Além disso, os espectros NIR, adquiridos tanto pelo MicroNIR quanto pelo TrinamiX mostraram-se eficientes para estimativa da umidade da madeira em tempo real a partir da serragem. Esta abordagem pode ser utilizada na otimização industrial em larga escala, gerando produtos com maior qualidade tendo em vista o monitoramento da umidade do material antes do processo produtivo.

Palavras-chave: Indústria Madeireira; Umidade da Madeira; Espectroscopia NIR; Madeira Serrada.

ABSTRACT

The performance of wood products is closely linked to their moisture content, which influences their physical, mechanical and chemical properties. Several methods are used to measure wood moisture, including traditional gravimetric techniques and the use of hygrometers. However, a more practical and non-destructive technique is near-infrared spectroscopy (NIR), which is based on the interaction of near-infrared light with molecular vibrations in the sample, allowing for the non-destructive and rapid analysis of several properties, including moisture. The objective of this study was to measure the moisture content of *Eucalyptus* sp. wood using portable NIR spectra in a drying yard. Using a portable drill and a drill bit, sawdust samples were collected from freshly felled *Eucalyptus* sp. logs and stacked in the drying yard. The sawdust was classified into different particle sizes, stored in a Falcon and used to collect spectra and determine moisture content in the laboratory. In addition, wood discs were removed from the logs, sectioned into wedges to determine wood moisture content in a kiln and obtain NIR spectra. These data were used to calibrate and validate models to estimate sawdust moisture content according to their spectral signatures. Log drying in the yard was monitored by means of spectral collections and determination of the moisture content of the wedge wood and the sawdust produced by the drills and chainsaw by the gravimetric method during drying at 15-day intervals until hygroscopic equilibrium was reached. Spectra were collected using microNIR and TrinamiX portable equipment on wood sampled from the saturated condition to equilibrium moisture content. The information was evaluated by principal component analysis (PCA) and the moisture content values obtained from the sawdust were associated with the NIR spectra by partial least squares regression (PLS-R) in order to adjust predictive moisture content models in real time. Results showed that the predictive models presented high performance, with MicroNIR indicating $R^2_{cv} = 0.9370$ and $R^2_c = 0.9662$ with the global model, while the model developed by TrinamiX had $R^2_{cv} = 0.9045$ and $R^2_c = 0.8735$. Therefore, a strong relationship was observed between the moisture content of the wedge and the sawdust of the log, indicating that these parameters can be used as reliable indicators of wood moisture. In addition, the NIR spectra acquired by both MicroNIR and TrinamiX proved to be efficient for estimating wood moisture in real time from sawdust. This approach can be used in large-scale industrial optimization, generating products with higher quality by monitoring the moisture content of the material before the production process.

Keywords: Wood Industry; Wood Moisture; NIR Spectroscopy; Sawn Timber.

1. INTRODUÇÃO

O desempenho dos produtos madeireiros está intimamente ligado ao seu teor de água, que influencia nas suas propriedades físicas, mecânicas e químicas e até mesmo na sua coloração (Herrera-Díaz *et al.*, 2018; Klement *et al.*, 2019; Kask *et al.*, 2021; Shen *et al.*, 2020), bem como o processamento e uso da madeira (Passarini e Hernández, 2016; Liu *et al.*, 2019; Yin e Liu, 2021; Zhou e Liu, 2022). Por esse motivo, especialmente a madeira proveniente de plantios florestais, necessita de tratamentos adicionais para melhorar a qualidade e agregar novas funcionalidades (Yang *et al.*, 2021; Nishiyama, 2021; Fang *et al.*, 2021; Feng *et al.*, 2022). Nesse contexto, a secagem da madeira é uma etapa essencial pois permite diminuir a água no material a um nível adequado contribuindo para a melhorar as propriedades do mesmo, prolongando a vida útil dos produtos madeireiros (Zen *et al.*, 2020).

Alguns métodos são utilizados para medir a umidade da madeira, dentre eles, técnicas gravimétricas tradicionais (Donato, 2012) e o uso de higrômetros (Jankowsky, 2010). Contudo, uma técnica mais prática e não destrutiva é a Espectroscopia do Infravermelho Próximo (NIR). A utilização do NIR em pátios de secagem apresenta como vantagem a rapidez na determinação da umidade, além de não provocar a destruição da peça de madeira. Nesses locais, o monitoramento da umidade é essencial para definir o ponto ideal de destinação do material ao processamento e a praticidade corrobora nesse acompanhamento.

O NIR se baseia na interação da luz infravermelha próxima com vibrações moleculares na amostra, permitindo a análise não destrutiva e rápida de várias propriedades, incluindo a umidade. A espectroscopia NIR capitaliza o fato de que diferentes compostos químicos absorvem e refletem luz em comprimentos de onda específicos, fornecendo informações importantes sobre a composição da amostra (Ozaki *et al.*, 2020).

O NIR está se tornando uma ferramenta essencial na ciência das plantas em função de suas capacidades de análise rápida e não destrutiva com preparação mínima da amostra. Avanços na miniaturização, óptica e digitalização, juntamente com a maior disponibilidade de poder computacional, estão transformando a espectroscopia NIR em um método analítico versátil, eficiente e amplamente disponível para análise e pesquisa de plantas em tempo real. Nos últimos anos, extensa pesquisa foi conduzida sobre a aplicação da espectroscopia NIR na determinação do teor de água de vegetais, com foco específico naqueles caracterizados por alta umidade (Zhou *et al.*, 2028; Zhang *et al.*, 2021; Zahir *et al.*, 2022; Vitalis *et al.*, 2023; Ahaddi e Al-Husseini, 2023).

O considerável teor de água e, conseqüentemente, a presença de ligações de hidrogênio nessas vegetais contribuem para um maior envolvimento de grupos hidroxila (OH) em sua estrutura aquosa. Essa presença de grupos OH aumenta a capacidade das moléculas de água livre de absorver efetivamente a luz NIR (Ma *et al.*, 2019; Zahir *et al.*, 2022; Chaudhry, 2019). Contudo, observa-se uma lacuna na literatura quanto à aplicação sistemática dessa técnica em espécies vegetais lenhosas à campo, utilizadas para produção de madeira.

Alguns estudos por Rosso *et al.* (2013), Costa *et al.* (2018), Arriel *et al.* (2019) e Amaral *et al.* (2021), testaram modelos para estimativa da densidade básica da madeira de eucalipto por espectroscopia NIR com instrumento de bancada e apresentaram resultados adequados para a seleção do material genético em empresas florestais. Trabalhos por Lima *et al.* (2022a), Lima *et al.* (2022b) e Novaes *et al.* (2023) também utilizaram NIR para classificação e identificação de espécies de madeira. Além disso, há pesquisas que a técnica espectroscópica NIR foi adotada com sucesso para monitorar a umidade e os compostos bioativos de vários alimentos (Abdullah *et al.*, 2024). Kapoor *et al.* (2022) testaram com sucesso um dispositivo NIR portátil em linha para medir a umidade de fatias de maçã. Seus resultados indicaram que o espectrofotômetro NIR em miniatura incorporado ao modelo de regressão de mínimos quadrados parciais (PLSR) pode ser aplicado para previsão ideal de umidade durante o processo de desidratação.

Diante do exposto e em razão da ausência de trabalhos com umidade de madeira em campo, os estudos sobre esse aspecto são escassos e existe uma lacuna no conhecimento científico, podendo esses aspectos indicar uma limitação do uso do NIR em condições adversas (Medeiros *et al.*, 2024). Uma vez que, a maioria dos modelos desenvolvidos são baseados em madeira com teor de água em equilíbrio (aproximadamente 12% da massa seca), variável pela região. Com isso, a aplicação do NIR em amostras de madeira com diferentes gradientes de umidade é importante para fornecer equipamentos tecnicamente viáveis para situações reais, como em campo, pátio ou esteira, onde a umidade da madeira não é controlada.

Diante disso, o trabalho teve o objetivo de mensurar a umidade de madeira de *Eucalyptus* sp. a partir de espectros de NIR portátil em pátio de secagem.

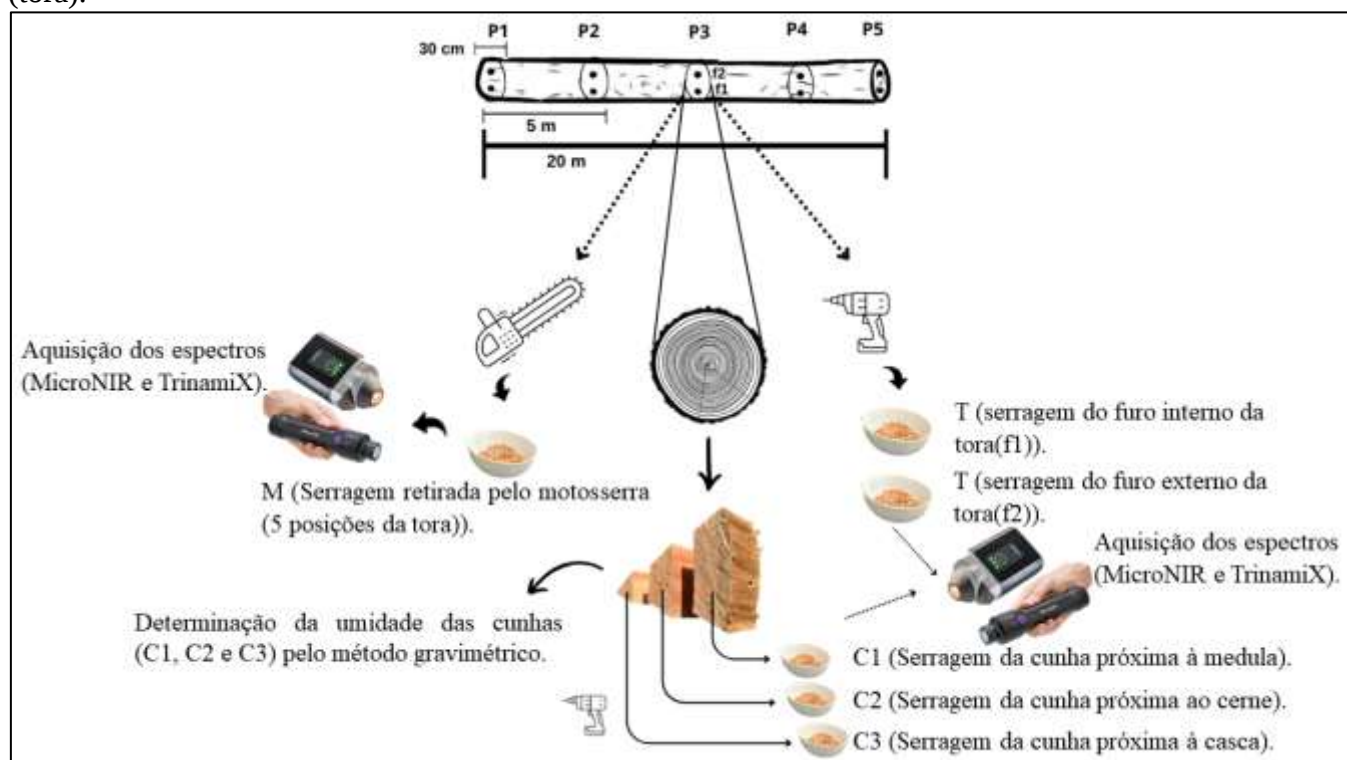
2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Obtenção do material e coleta das amostras

Foram utilizadas árvores de *Eucalyptus* sp. com idade de 22 anos provenientes do plantio florestal experimental da Universidade Federal de Lavras – UFLA, Minas Gerais, que foram abatidas e levadas ao pátio de secagem da Unidade experimental de processamento da madeira.

Foram utilizadas três brocas de pré teste (1/2" x 11", 5/16" x 11, e 3/4" x 11") para retirada da serragem em cinco posições do fuste, a cada 5 m a 30 cm das bordas (Figura 2). As diferentes brocas foram utilizadas a fim de avaliar a melhor granulometria e a praticidade da coleta e assim foi escolhida a de granulometria (5/16). Em seguida foram retirados discos de 7 cm das mesmas extremidades de coleta de serragem, com auxílio de motosserra (Figura 2). Cada árvore gerou 5 discos que foram subdivididos em 3 partes (próximo a casca, próximo a medula e próximo ao cerne) a fim de observar a variação de umidade no sentido medula-casca.

Figura 2- Esquema metodológico para o desenvolvimento do trabalho. P (posição); f (furo interno (próximo à medula) (furo externo próximo à casca)); M (motosserra); C (cunha) T (tora).



Fonte: Autores (2025).

2.2 Determinação da umidade

A umidade na base seca da madeira foi determinada durante etapas da secagem das toras, utilizando o método gravimétrico de acordo com a NBR 14.929 (ABNT, 2003). Com

isso, a cada coleta, em intervalo de 25 dias, foram secas 3 cunhas de um total de 5 discos, em estufa a 105 ± 2 °C até massa constante, para comparação com coletas dos espectros NIR. As coletas dos espectros foram realizadas até as toras do pátio de secagem atingirem umidade de equilíbrio higroscópico (aproximadamente 12%).

2.3 Coleta de dados espectrais

Os espectros NIR foram registrados a partir de dois equipamentos portáteis: MicroNIR e TrinamiX (Figura 3) de acordo registros realizados também por Gomes *et al.* (2025) e Medeiros *et al.* (2024). O MicroNIR On-site (Viavi Solutions Inc., CA, Estados Unidos) foi usado no modo de refletância diretamente na superfície da serragem de madeira. A faixa espectral foi de 908 a 1676 nm com resolução de 6,19 nm, o que produziu espectro composto por 125 variáveis espectrais. Cada espectro representa uma média de 16 varreduras. Um espectro por amostra de serragem foi registrado pela técnica apontar e disparar. Uma varredura escura e uma varredura de referência foram realizadas aproximadamente a cada 10 min. A aquisição dos dados foi realizada por meio do *software Spectral Soft Solutions* (Viavi Solutions Inc., CA, Estados Unidos).

Espectros no NIR foram adquiridos também a partir de um dispositivo L VF NIR portátil TrinamiX NIR, modelo SYS-IR-R-P (Ludwigshafen, Alemanha). A faixa espectral do TrinamiX se estende de 1.450 nm a 2.450 nm, com resolução espectral de 2,83 nm, produzindo um conjunto de dados com 353 variáveis espectrais. O espectrômetro usa 6 lâmpadas de halogênio em um arranjo circulador colocado em torno de um sensor de sulfeto de chumbo linear (PbS). O sensor PbS compreende uma matriz de 256 pixels na qual é colocado um filtro variável linear (LVF).

Figura 3 – Equipamentos NIR e faixa espectral



Fonte: Autores (2025)

2.4 Análise de dados

O processamento dos dados foi realizado no Chemoface versão 1.71 (Nunes *et al.*, 2012). A análises de componentes principais (PCA) foi aplicada a fim de explorar os dados bem como avaliar a dependência deles por meio de agrupamentos. Os espectros coletados foram analisados pela estatística multivariada na sua forma original e tratada com primeira derivada (15 pontos de alisamento, polinômio de 2º grau e derivada de 1º ordem).

Para ajustar os modelos preditivos foi realizada a análise de regressão por mínimos quadrados parciais (PLS-R), associando as informações espectrais obtidas com a umidade determinada em laboratório pelo método gravimétrico, com o objetivo de gerar modelo global para cada tratamento avaliado. A validação cruzada e independente foi realizada para fins de comparação.

As transformações matemáticas espectrais propostas por Savitzky e Golay (1964) também foram testadas usando os seguintes esquemas: 25.2.1 (25 pontos de suavização, polinômio de segunda ordem, primeira derivada); 15.2.2 (15 pontos de suavização, polinômio de segunda ordem, segunda derivada) conforme descrito em Novaes *et al.* (2023) Tratamentos de padronização de Variável Normal Padrão (SNV) (Barnes *et al.* 1989) e o Método de Espalhamento Multiplicativo (MSC) também foram testados (Geladi *et al.* 1985). Para a transformação MSC, o espectro médio do conjunto de calibração foi usado como espectro de referência. De um ponto de vista prático, usar apenas a primeira ou a segunda derivada seria

preferível.

Amostras que apresentaram grande variação residual ou ruído espectral foram previamente detectadas em análises visuais e tiveram seus espectros imediatamente remensurados. Assim, o banco de dados não continha nenhuma amostra anômala e nenhuma leitura foi considerada outlier. Neste delineamento, o ponto de partida foi considerado o comprimento de onda de 11013 cm^{-1} para o equipamento de bancada, que corresponde ao mesmo ponto de partida dos espectros do sensor portátil.

Para a calibração e validação as amostras em que foram colhidos dados das análises convencionais feitas em laboratório foram analisadas também pelos espectrômetros portáteis. Posteriormente, os valores de absorbância obtidos pelo equipamento, bem como os valores convencionais obtidos em laboratório foram utilizados para calcular os parâmetros de calibração do modelo estatístico. Sendo assim, o modelo foi validado e usado na etapa de previsão, no qual os valores convencionais de amostras desconhecidas foram estimados após a mensuração dos valores de absorbância dessas amostras.

Os parâmetros adotados para selecionar os melhores modelos preditivos foram R^2c (coeficiente de determinação da calibração); $RMSEc$ (raiz do erro quadrático médio na calibração); R^2cv (coeficiente de determinação da validação cruzada) e $RMSEcv$ (raiz do erro quadrático médio na validação cruzada).

Foi utilizado também ajuste de regressão com 95% de probabilidade para verificar o grau da relação existentes entre os valores de umidade obtidos na cunha, tora e furo.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

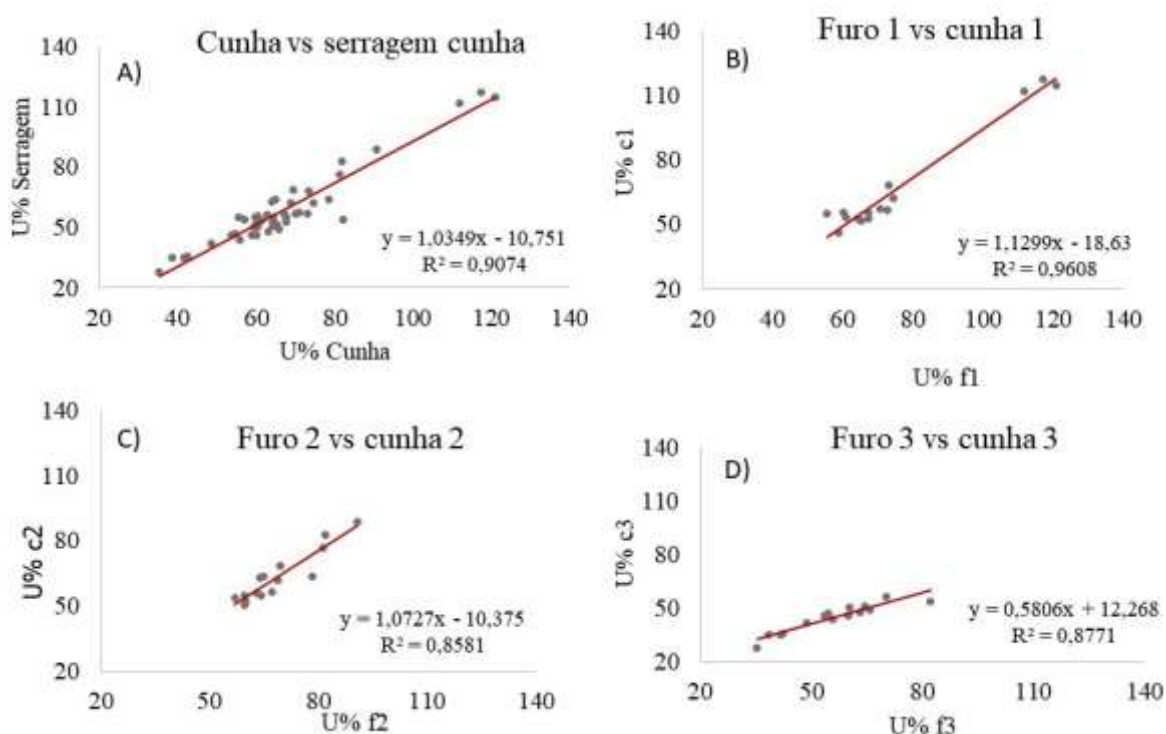
3.1 Variação da umidade na madeira por posição e método de amostragem

A relação entre a umidade da cunha e da serragem da cunha apresentaram elevada correlação ($R^2 = 0.9074$, Figura 4) no entanto, a umidade da serragem apresentou valores ligeiramente maiores que a cunha. Para o modelo apresentado na Figura 4B, o R^2 foi de 0,9608, possuindo relação muito forte entre as umidades do furo 1 (próximo à medula) com a cunha 1. Além disso, observando a linha nos gráficos, a umidade da cunha tende a ser um pouco maior do que a umidade da serragem pelo furo na cunha.

A Figura 4C apresenta boa correlação, porém menor do que as anteriores tendo R^2 com valor de 0,8581. Além disso, a figura indica que a umidade da cunha 2 aumenta um pouco mais rápido em relação a umidade da serragem do furo 2 (próxima ao cerne) na cunha 2. Por fim, na

Figura 4D, houve também correlação forte, porém menores que em 4A e 4B com R^2 de 0,8771. A Figura 4D mostra que a umidade da cunha 3 aumenta mais lentamente em relação a umidade da serragem do furo 3 (próximo à casca) na cunha 3, diferente dos outros gráficos.

Figura 4 - Comparação entre umidades da serragem e da cunha pelo método gravimétrico. A - Umidade da cunha e serragem da cunha; B - Umidade da cunha 1 (próximo à medula) e furo 1 (próximo à medula); C - Umidade da cunha 2 (próxima ao cerne) e furo 2 (próxima ao cerne) D - Umidade da cunha 3 (próximo à casca) e furo 3 (próximo à casca).



Fonte: Autores (2025)

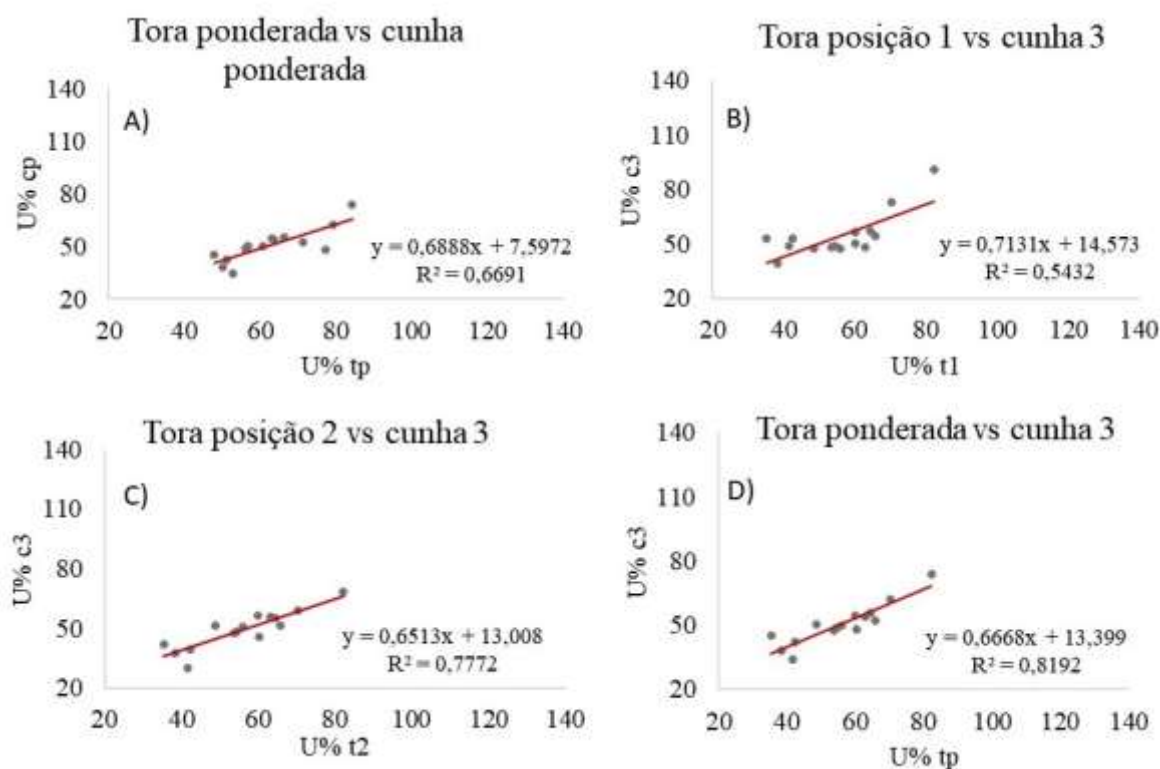
Portanto, os métodos de obtenção da umidade foram executados com sucesso, visto que todas as correlações obtiveram alta consistência. As mudanças descritas que ocorreram são naturais, de modo que a técnica é capaz de descrever os detalhes mínimos do processo de secagem, mantendo sua confiabilidade e importância no condicionamento da madeira ilustradas no seu uso com condições.

A Figura 5 mostra a comparação de umidade entre a serragem da tora e a umidade da cunha 3. É visto a umidade ponderada, realizada para a serragem da tora a partir da serragem interna assumindo 25% da serragem total e a serragem externa representando 75% do total de umidade. Foi realizada a umidade ponderada também para as três cunhas (C1(próximo à

medula), C2(próximo ao cerne) e C3 (próximo à casca)), representando C1=11%, C2=34% e C3=55% da umidade total. Existe uma correlação moderada entre a serragem da tora ponderada e a cunha ponderada, ou seja, à medida que a umidade da serragem da tora ponderada aumenta, a umidade da cunha ponderada também tende a aumentar (Figura 5A). No gráfico, Figura A, a inclinação indica que a umidade da cunha ponderada aumenta de forma mais lenta em comparação a umidade da serragem da tora ponderada, ou seja, em uma determinada coleta, a umidade da serragem da tora ponderada se apresenta maior do que a umidade da cunha na mesma coleta. Além disso, o R^2 de 0,6691 indica que existe alguma variabilidade não explicada pela regressão ou gerada pela ponderação. A correlação entre as variáveis na (Figura 5 B) foram mais fracas com R^2 de 0,5432 e $r = 0,7369$, sugerindo maior dispersão entre os dados. A umidade da cunha 3 aumenta de forma mais lenta em relação a serragem da posição 1 ((f1) região interna) na tora. Assim, mesmo com umidade zero na posição 1 da tora, a cunha 3 ainda apresenta umidade.

Na Figura 5C a correlação é relativamente forte com R^2 de 0,7772 e $r = 0,8816$ indicando que a umidade da serragem da tora na posição 2 ((f2) região externa) é influenciada significativamente pela umidade da cunha 3. Além disso, a umidade da cunha no gráfico cresce de forma mais lenta em relação a umidade da posição na tora. Por fim, na Figura 5D houve correlação forte, com R^2 de 0,8192 e $r = 0,9051$, sendo assim, a umidade da serragem da tora ponderada é um bom indicador da umidade na cunha 3. A umidade da cunha 3 cresce menos do que a umidade da tora ponderada, além disso, a cunha 3 mantém o mínimo de umidade mesmo quando a umidade da serragem da tora é baixa.

Figura 5 - Comparação entre umidades. A - Umidade da serragem da tora ponderada e serragem da cunha ponderada; B - Umidade da serragem da tora na posição 1 (serragem do furo na região interna) e serragem da cunha 3 (próximo à casca); C - Umidade da serragem da tora na posição 2 (serragem do furo na região externa) e serragem da cunha 3 (próximo à casca); D - serragem da tora ponderada e serragem da cunha 3 (próximo à casca).

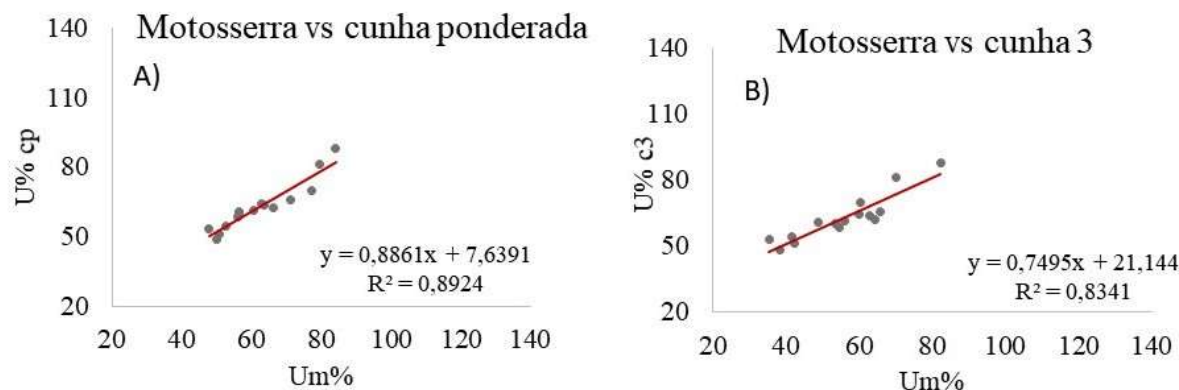


Fonte: Autores (2025).

A Figura 6 apresenta a comparação entre umidade da serragem da tora retirada por motosserra e a umidade da cunha. Na Figura 6A apresenta correlação forte entre os dados com R^2 de 0,8924. Com isso, os dados indicam que a umidade da cunha ponderada se aproxima daquela encontrada para serragem obtida por motosserra.

Da mesma forma a umidade da serragem retirada por motosserra e da cunha 3 na Figura 6B apresentam forte correlação com R^2 de 0,8341. A umidade da cunha 3 aumenta de forma ligeiramente menor do que a umidade pela serragem do motosserra. Nesse caso, mesmo que a umidade pelo motosserra fosse zero, a cunha apresentaria umidade residual.

Figura 6 - Comparação entre umidades. A - Umidade da serragem da tora retirada pelo motosserra e cunha ponderada; B - Umidade da serragem retirada pelo motosserra e da cunha 3 (próxima à casca).



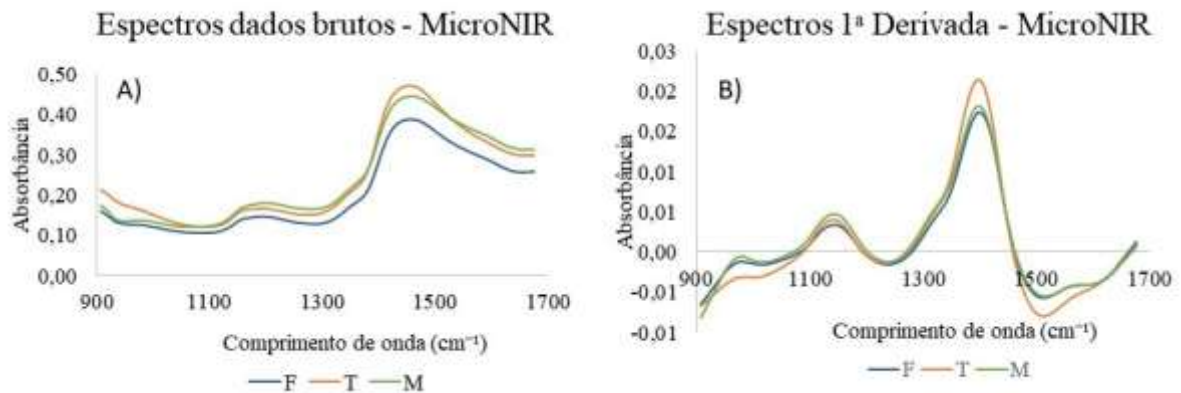
Fonte: Autores (2025)

Determinando a umidade sua variação no tronco das árvores ou das peças de madeira Carmo (1996) encontrou variação de 50-70% para o *Eucalyptus maculata*, de 46-80% para o *E. citriodora* e 50-133% para o *E. grandis* de 50-133%. Da mesma forma, Amaral *et al.* (2020) obteve variações de 0 a >80% de umidade para cavacos da madeira de eucalipto, ambos com valores semelhantes ao presente trabalho que estiveram de 40% a 100%.

3.2 Espectros por MicroNIR e TrinamiX

A absorção dos espectros em diferentes comprimentos de onda obtidas para os três tipos de serragem (furo na cunha, furo na tora e pelo motosserra) seguiram padrão semelhante para ambos espectrômetros NIR (Figura 7A), com diferenças pontuais na intensidade em alguns pontos entre 70 e 100 cm^{-1} no eixo x. Na figura 7B as três condições se apresentam mais próximas e com menor variação. Os picos indicam mudanças bruscas na absorção.

Figura 7- Espectros pelo MicroNIR. A- Espectros brutos pelo MicroNIR; B- Espectros 1º Derivada MicroNIR; F (furo na tora) M (motosserra) e T (tora).

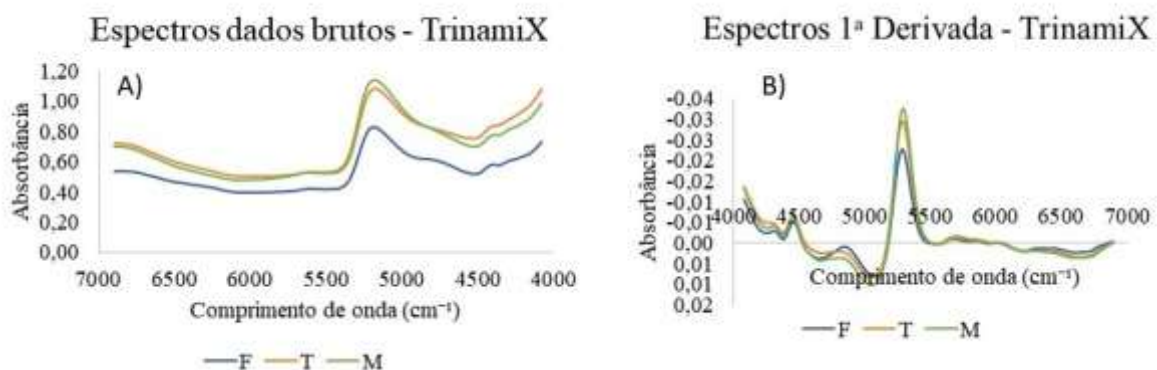


Fonte: Autores (2025).

A Figura 8A, mostra que o padrão geral dos espectros no TrinamiX é semelhante ao MicroNIR, possuindo algumas diferenças notáveis. Sendo uma delas que o TrinamiX possui faixa espectral maior que vai até 400 cm^{-1} . Além disso, a intensidade de absorção foi mais elevada em comparação ao MicroNIR principalmente entre 100 e 150 cm^{-1} . A amostra da serragem da tora e a serragem retirada por motosserra tiveram valores mais altos do que a serragem do furo na cunha.

Por fim, a Figura 8B, observa-se melhor as diferenças das amostras com a primeira derivada, onde o principal pico acontece entre 150 a 200. Além disso, as curvas das três amostras estão bem próximas, indicando variação sutil.

Figura 8- Espectros pelo TrinamiX. A- Dados brutos pelo TrinamiX; B- primeira derivada TrinamiXtosserra; F (furo na tora) M (motosserra) e T (tora).



Fonte: Autores (2025).

Segundo Amaral *et al.* (2020), esses picos são decorrentes da maior quantidade de água que interage com a radiação eletromagnética, indicando vibrações características de grupos hidroxilas (OH), que aumenta com a umidade. As vibrações de moléculas de água caracterizadas por essas bandas são responsáveis pela mudança no perfil do espectro NIR, mas também podem modificar propriedades físicas e mecânicas da madeira (Tsuchikawa; Tsutsumi, 1998). A amostra retirada da tora apresenta pico mais alto entre 80 e 100 cm^{-1} indicando maior absorção nessa faixa espectral. Por outro lado, a amostra retirada do furo na cunha tem valores menores em relação as outras, indicando menor concentração do componente associado a absorção dos espectros.

Esses valores foram inferiores aos encontrados por Amaral *et al.* (2020) no trabalho com determinação de umidade de cunhas, com picos de absorção observados em comprimentos de onda de aproximadamente 7000 cm^{-1} e 5100 cm^{-1} ou (1428 e 1960) cm^{-1} com o MicroNIR. Contudo, os números de onda estão correlacionados com a presença de substâncias componentes da estrutura celular do material (Niskosky *et al.*, 2016).

3.4 PCA das assinaturas espectrais obtidas com MicroNIR e TrinamiX

A PCA (Figura 9A) é distinguido por três grupos: espectros obtidos por meio de serragem por motosserra, serragem na cunha e serragem da tora. Os dados coletados pela furadeira são concentrados de forma mais homogênea.

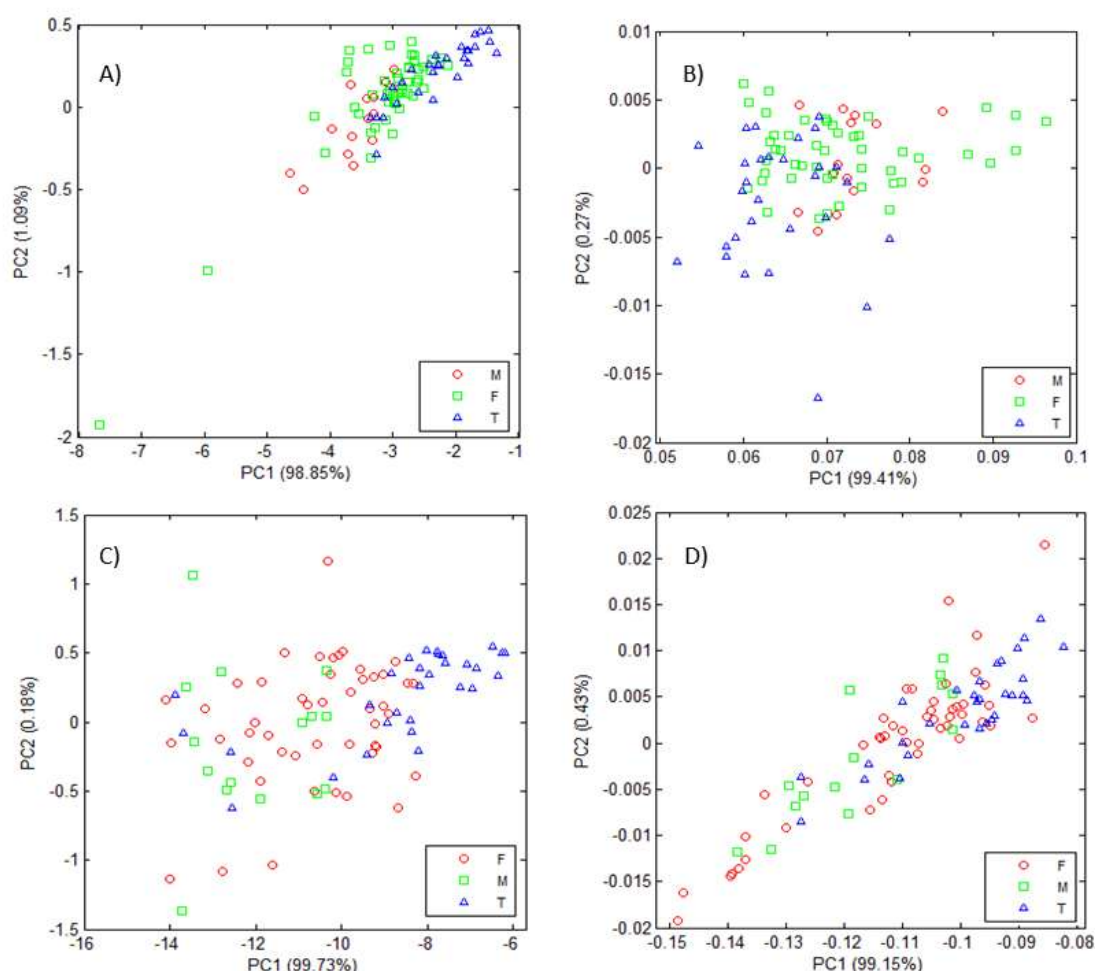
A Figura 9B mostra o gráfico de pontuações PCA da primeira derivada adquiridos pelo MicroNIR. Os dois componentes principais juntos explicam 99,68% da variabilidade dos dados analisados, dos quais o primeiro componente principal explica quase toda a variabilidade dos dados 99,41% (PC1) e 0,27% é explicado pelo componente principal 2 (PC2), ou seja, tem uma contribuição muito menor para a dispersão dos dados. Os pontos dos diferentes tratamentos se sobrepõem em alguns pontos, mas há certa separação entre eles. Como a variação ao longo do PC2 é muito pequena, as diferenças entre os grupos são mais bem explicadas pelo PC1.

A PCA realizada usando os espectros Trinamix (Figura 9C) mostra que o PC1 explicou 99,73% da variabilidade dos dados e PC2 explicou 0,18%; juntos explicaram 99,91% da variância acumulada. É possível observar ainda a discriminação das etapas de secagem de acordo com os grupos de umidade.

A Figura 9D mostra o gráfico de PCA da primeira derivada adquiridos pelo Trinamix. Os dois componentes principais juntos explicam 99,42% da variabilidade dos dados analisados, dos quais o PC1 explica quase toda a variabilidade dos dados 99,15% e 0,27% é explicado pelo

PC2. Os dados possuem distribuição alinhada em diagonal com espectros das amostras similares.

Figura 9 – Análise dos escores da PCA. A) Dados brutos do MicroNIR; B) dados do MicroNIR tratados com primeira derivada; C) dados brutos do TrinamiX; D) dados do TrinamiX tratados com primeira derivada. (M) serragem por motosserra; (F) serragem do furo na cunha; (T) serragem do furo na tora.



Fonte: Autores (2025).

Com isso, pode-se inferir que em todas as condições observadas o agrupamento esteve satisfatório, incluindo a furadeira, que é capaz de fornecer serragem possíveis de passar informações do material de forma eficiente. Fator que pode contribuir para avaliação de umidade, uma vez que a madeira de serragem é mais homogênea do que madeira sólida. Os espectros NIR medidos em madeira sólida são influenciados por heterogeneidades locais, enquanto a madeira em serragem é mais homogênea (Hein *et al.*, 2009).

Os modelos mostraram potencial satisfatório para distinguir os métodos utilizados. Assim, com a análise visual preliminar dos dados espectrais, foi possível observar uma tendência de separação das amostras avaliadas.

3.5 Resultados de PLS-R (MicroNIR e TrinamiX)

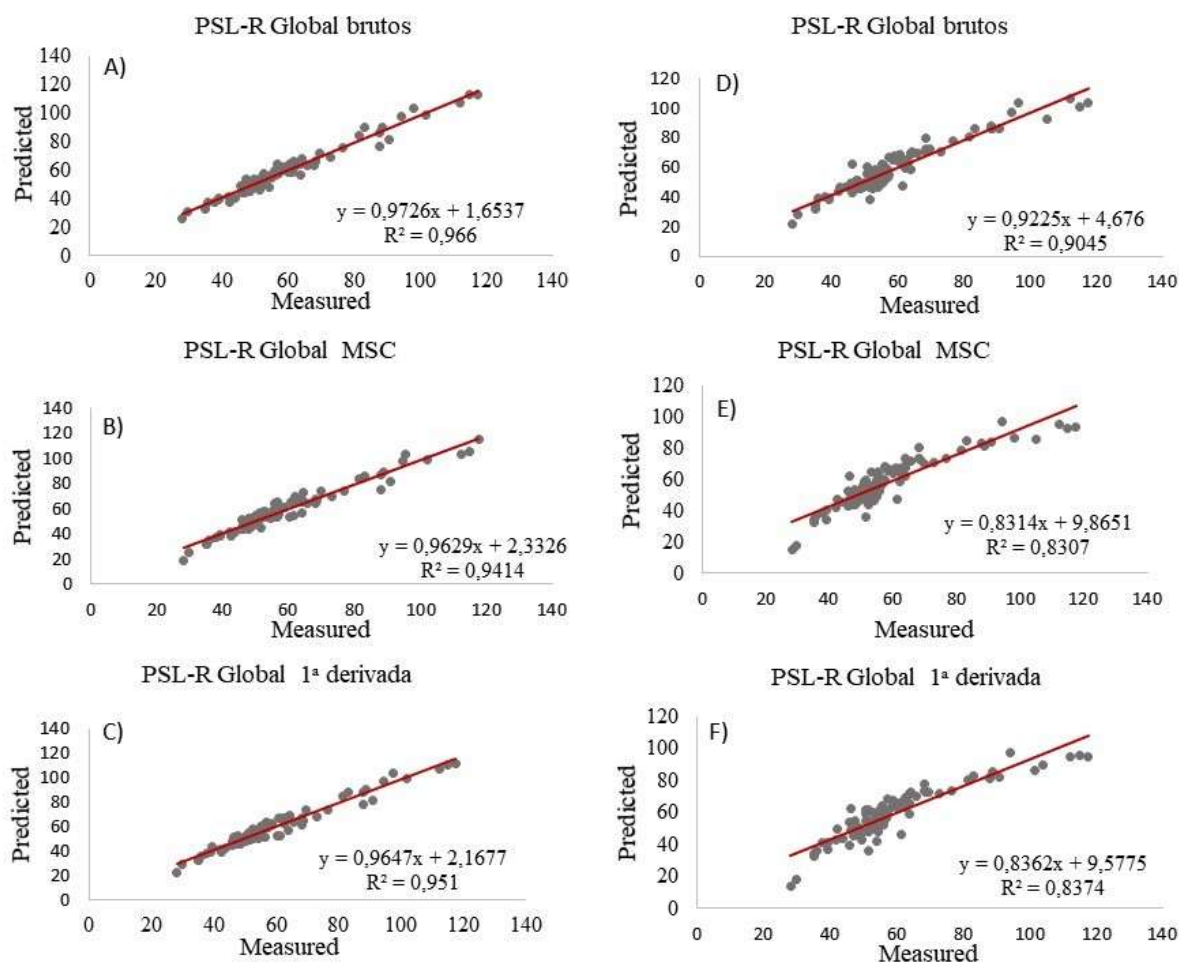
A dispersão dos valores previstos pelo MicroNIR e Trinamix, em que o modelo global com os dados brutos pelo MicroNIR apresentou R^2_{cv} de 0,9370, MSC com R^2_{cv} de 0,9127 e primeira derivada com R^2_{cv} de 0,9276 (Tabela 1) (Figura 10). Para o Trinamix, o modelo global com os dados brutos apresentou R^2_{cv} de 0,8735, o modelo realizado a partir dos espectros tratados por correção multiplicativa de espalhamento (MSC) com R^2_{cv} de 0,7817 e primeira derivada R^2_{cv} de 0,7911. Visto isso, todos os modelos se apresentaram bons, sendo o melhor, representado pelo gráfico do modelo global (gerado com dados espectrais das amostras de serragem dos três tratamentos) do MicroNIR (Tabela 1) (Figura 10).

Tabela 1- Calibrações e validações cruzadas para estimar a umidade da madeira com base em espectros NIR.

Modelo	Trat	Aquisição	R^2c	RMSEc	R^2cv	RMSEcv	LV	RPD
1	Dados brutos	MicroNIR	0,9662	3,1470	0,9370	4,2989	10	4,0643
2	MSC	MicroNIR	0,9413	4,1461	0,9127	5,0635	8	3,4371
3	1ª derivada	MicroNIR	0,9510	3,7958	0,9276	4,6097	7	3,7851
4	Dados brutos	TrinamiX	0,9045	5,3002	0,8735	6,0925	6	2,8740
5	MSC	TrinamiX	0,8292	7,0761	0,7817	8,0231	5	2,1880
6	1ª derivada	TrinamiX	0,8374	6,9566	0,7911	7,8402	4	2,2452

Fonte: Autores (2025).

Figura 10 - Análise de PLS-R pelos dados espectrais. A) Dados brutos MicroNIR; B) Dados MSC MicroNIR; C) primeira derivada MicroNIR; D) dados brutos TrinamiX; E) Dados MSC TrinamiX; F) primeira derivada TrinamiX.



Fonte: Autores (2025).

Trabalho com precisão semelhante, realizado por Amaral *et al.* (2020) a fim de estimar umidade de cavacos de eucalipto, indicaram que a espectroscopia NIR associada à análise multivariada teve potencial de estimar a umidade da madeira em cavacos de eucalipto. O modelo desenvolvido a partir de espectros registrados na face longitudinal pelo método da esfera integradora apresentou estatística ligeiramente melhor ($R^2_{cv} = 0,96$) do que o modelo baseado em sonda de fibra óptica ($R^2_{cv} = 0,90$). Dessa forma, evidenciando a sua funcionalidade também em serragem da madeira.

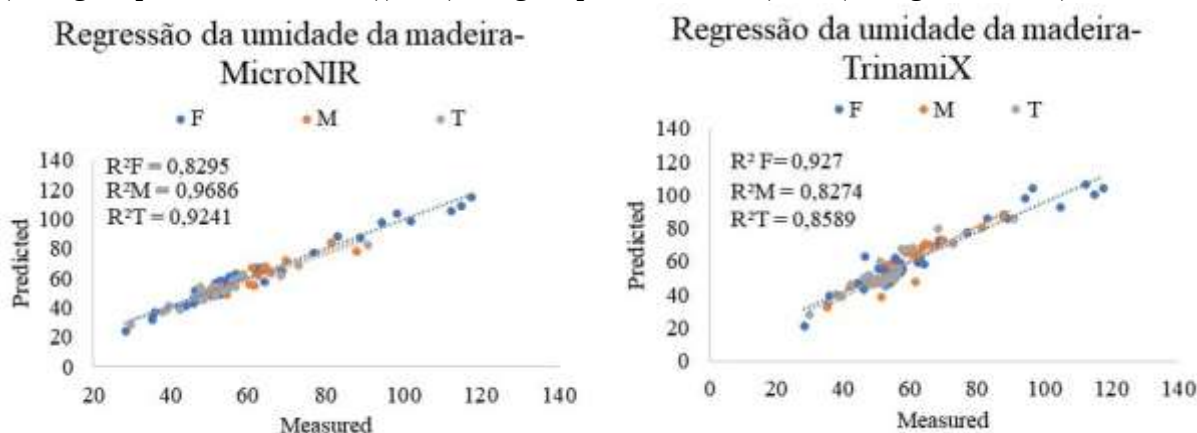
Outro trabalho realizado por Toscano *et al.* (2022), no qual objetivou-se usar um espectrômetro NIR portátil para a determinação da umidade de cavacos de madeira industrial combustível, observou-se que os resultados apresentaram confiabilidade satisfatória com R^2 variando de 0,86 a 0,89, dependendo do modelo. O primeiro modelo de predição (MOD1) foi

desenvolvido nos espectros de 642 amostras com uma faixa de valores de umidade entre 4,3% e 49,1%. O segundo (MOD2) e o terceiro (MOD3) modelos de predição foram desenvolvidos nos espectros de 212 amostras adicionais (diferentes das 642 amostras anteriores) com uma faixa de valores de umidade entre 15,2% e 64,7%.

Diante disso, observa-se nesse estudo, correlação adequada, evidenciando que os modelos preditivos para avaliar a umidade de madeira de *Eucalyptus* apresentados nesse estudo, podem ser utilizados para avaliar a umidade da madeira em tempo real utilizando um espectrômetro portátil em empresas que utilizam a madeira como matéria-prima por exemplo, na indústria moveleira. Dessa forma, facilita a medição da umidade da madeira no seu ponto ideal para a fabricação dos produtos (Amaral *et al.*, 2020).

Adicionalmente, a Figura 11 apresenta a regressão de cada tratamento (serragem do furo na cunha, serragem do motosserra e serragem da tora). A partir dele é possível observar que caso seja utilizado apenas uma metodologia na coleta da serragem, o espectro NIR também se mostra efetivo, apresentando R^2 elevados com forte correlação entre as variáveis.

Figura 11- Regressão dos valores de umidade obtidos por MicroNIR (A) e TrinamiX. (B). F (serragem pelo furo na cunha)) M (serragem por motosserra) e T (serragem da tora).



Fonte: Autores (2025).

4 CONCLUSÃO

Os resultados obtidos neste estudo demonstram a viabilidade do uso de espectrômetros portáteis na região do infravermelho próximo (NIR) para estimar a umidade da madeira de toras de *Eucalyptus* sp. Observou-se forte correlação entre a umidade obtida pelas cunhas e pela serragem extraída com furadeira e motosserra, indicando que a serragem pode ser utilizada como indicador confiável da umidade da tora.

A metodologia proposta, com análises de componentes principais (PCA) aplicada para explorar os dados bem como avaliar a dependência deles por meio de agrupamentos e o uso da

análise de regressão por mínimos quadrados parciais (PLS-R), associando as informações espectrais obtidas com a umidade determinada em laboratório pelo método gravimétrico, com o objetivo de gerar modelo global para cada tratamento avaliado para ajustar os modelos preditivos foi realizada baseada na coleta de espectros em tempo real associada a análises multivariadas, demonstrando elevado potencial de aplicação em condições práticas de secagem de madeira.

Os modelos preditivos ajustados com espectros coletados pelos equipamentos MicroNIR e TrinamiX apresentaram desempenho satisfatório. O modelo global com o MicroNIR alcançou R^2_{cv} de 0,9370 e RMSE de 4,3%, enquanto o TrinamiX apresentou R^2_{cv} de 0,9045 e RMSE de 6,1%. Além disso, a análise de componentes principais (PCA) permitiu identificar padrões consistentes entre os diferentes métodos de amostragem e equipamentos utilizados. A validação cruzada dos modelos PLS-R confirmou a precisão dos espectros para aferir a umidade, com o MicroNIR mostrando os melhores resultados.

Com isso, a metodologia desenvolvida neste trabalho representa alternativa viável, rápida e não destrutiva para o monitoramento da umidade da madeira em pátios de secagem. A aplicação prática desse método pode otimizar o controle do teor de água antes do processamento industrial, contribuindo para a eficiência produtiva e qualidade dos produtos madeireiros. Além disso, os resultados obtidos reforçam o potencial dos espectrômetros NIR portáteis como ferramentas tecnológicas aplicáveis em larga escala, alinhadas às demandas por sustentabilidade e inovação na indústria florestal.

REFERÊNCIAS

ABDULLAH, H. M.; ISLAM, M. N.; SAIKAT, M. H.; BHUIYAN, M. A. Precision agriculture practices from planting to post-harvest: Scopes, opportunities and challenges of innovation in developing countries. *Remote Sensing in Precision Agriculture*, p. 3-26, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-91068-2.00014-X>.

AHADDI, A.; AL-HUSSEINI, Z. The use of hyperspectral sensors for quality assessment: A quantitative study of moisture content in indoor vertical farming. 2023. PhD Thesis, Mälardalen University, Västerås, Sweden.

AMARAL, E. A.; BALIZA, L. F.; SILVA, C. H.; RAMALHO, F. M. G.; TRUGILHO, P. F.; SOL, H.; HEIN, P. R. G. Estimation of moisture in wood chips by Near Infrared Spectroscopy. *Maderas, Cienc. tecnol.*, Concepción, v. 22, n. 3, p. 291-302, 2020.

ARRIEL, T. G.; RAMALHO, F. M. G.; LIMA, R. A. B.; SOUSA, K. I. D.; HEIN, P. R. G.; TRUGILHO, P. F. Developing near-infrared spectroscopic models for predicting the density of

Eucalyptus wood based on indirect measurements. *Cerne*, v. 25, n. 3, p. 294-300, 2019. DOI: 10.1590/01047760201925032646.

BARNES, R. J.; DHANOA, M. S.; AND LISTER, S. J. Standard normal variate transformation and de-trending of near-infrared diffuse reflectance spectra. *Applied Spectroscopy* 43: 772-777, 1989. <https://doi.org/10.1366/0003702894202201>

CARMO, A. P. T. Avaliação de algumas propriedades da madeira de seis espécies de eucalipto. 74 f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) — Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1996.

CHAUDHRY, Muhammad Mudassir Arif. Innovative and non-destructive technologies to evaluate quality of rocket leaves for ready to eat salads. 2019. Doctoral Thesis (PhD in Management of Innovation in the Agricultural and Food Systems of the Mediterranean Region) — Università di Foggia, Dipartimento di Scienze Agrarie, degli Alimenti e dell'Ambiente, Foggia, 2019.

COSTA, E. V. S.; ROCHA, M. F. V.; HEIN, P. R. G.; AMARAL, E. A.; SANTOS, L. M. D.; 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 Infrared Spectroscopy*, v. 26, n. 2, p. 106-116, 2018. DOI: 10.1177/0967033518757070.

FANG, L.; ZENG, J.; ZHANG, X.; WANG, D. Effect of veneer initial moisture content on the performance of polyethylene film reinforced decorative veneer. *Forests*, v. 12, n. 1, p. 102, 2021.

FENG, X.; CHEN, J.; YU, S.; WU, Z.; HUANG, Q. Mild hydrothermal modification of beech wood (*Zelkova schneideriana* Hand-Mzt): Its physical, structural, and mechanical properties. *European Journal of Wood and Wood Products*, v. 80, n. 4, p. 933-945, 2022.

GELADI, P., MACDOUGALL, D., AND MARTENS, H. Linearization and scatter-correction for near-infrared reflectance spectra of meat. *Applied Spectroscopy* 39(3): 491-500. 1985. <https://doi.org/10.1366/0003702854248656>

GOMES, J. N. N, MEDEIROS, D. T, VIANA, L. C, & HEIN, P. R. G. Influência da umidade na identificação de espécies lenhosas tropicais por espectroscopia NIR. *Holzforschung*, 79 (4-5), 188-201. 2025.

HEIN, P. R. G.; LIMA, J. T.; CHAIX, G. Robustness of models based on near infrared spectra to predict the basic density in *Eucalyptus urophylla* wood. *Journal of Near Infrared Spectroscopy*, v. 17, n. 3, p. 141-150, 2009.

HERRERA-DÍAZ, R. et al. Effect of wood drying and heat modification on some physical and mechanical properties of radiata pine. *Drying Technology*, v. 36, n. 5, p. 537-544, 2018.

KAPOOR, R.; MALVANDI, A.; FENG, H.; KAMRUZZAMAN, M. Real-time moisture monitoring of coated edible apple chips during hot air drying using miniature NIR

spectroscopy and chemometrics. *LWT*, v. 154, p. 112602, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.112602>.

KASK, R.; LILLE, H.; KIVISTE, M.; KRUUS, S.; LÄÄNE, J. O. Effect of soaking/oven-drying on mechanical and physical properties of birch (*Betula* spp.) plywood. *Drvna Industrija*, v. 72, n. 2, p. 121-129, 2021.

KLEMENT, I.; VILKOVSKÁ, T.; BARANSKI, J.; KONOPKA, A. The impact of drying and steaming processes on surface color changes of tension and normal beech wood. *Drying Technology*, v. 37, n. 12, p. 1490-1497, 2019.

LIMA, M. D. R.; RAMALHO, F. M. G.; TRUGILHO, P. F.; BUFALINO, L.; JÚNIOR, A. F. D.; DE PAULA PROTÁSIO, T.; HEIN, P. R. G. Classifying waste wood from Amazonian species by near-infrared spectroscopy (NIRS) to improve charcoal production. *Renewable Energy*, v. 193, p. 584-594, 2022b.

LIMA, M. D. R.; TRUGILHO, P. F.; BUFALINO, L.; JÚNIOR, A. F. D.; RAMALHO, F. M. G.; DE PAULA PROTÁSIO, T.; HEIN, P. R. G. Efficiency of near-infrared spectroscopy in classifying Amazonian wood wastes for bioenergy generation. *Biomass and Bioenergy*, v. 166, p. 106617, 2022a.

LIU, H.; ZHANG, J.; JIANG, W.; CAI, Y. Characteristics of commercial-scale radio-frequency/vacuum (RF/V) drying for hardwood lumber. *BioResources*, v. 14, n. 3, p. 6923-6935, 2019.

MA, L.; PENG, Y.; PEI, Y.; ZENG, J.; SHEN, H.; CAO, J.; WU, Z. Systematic discovery about NIR spectral assignment from chemical structural property to natural chemical compounds. *Scientific Reports*, v. 9, n. 1, p. 9503, 2019.

MEDEIROS, D. T. de; GOMES, J. N. N.; BATISTA, F. G.; MASCARENHAS, A. R. P.; PIMENTA, E. M.; CHAIX, G.; HEIN, P. R. G. Estimation of the basic density of *Eucalyptus grandis* wood chips at different moisture levels using benchtop and handheld NIR instruments. *Industrial Crops and Products*, v. 209, p. 117921, 2024.

NISHIYAMA, Y. Retrieving structural information from scattering and attenuation data of transparent wood and (Nano) paper. *Journal of Bioresources and Bioproducts*, v. 6, n. 3, p. 187-194, 2021.

NOVAES, T. V.; RAMALHO, F. M. G.; DA SILVA ARAUJO, E.; LIMA, M. D. R.; DA SILVA, M. G.; FERREIRA, G. C.; HEIN, P. R. G. Discrimination of Amazonian Forest species by NIR spectroscopy: wood surface effects. *European Journal of Wood and Wood Products*, v. 81, n. 1, p. 159-172, 2023.

NOVAES, T. V.; RAMALHO, F. M. G.; SILVA, E.; LIMA, M. D. R.; SILVA, M. G.; FERREIRA, G. C. E. HEIN, P. R. G. Discriminação de espécies florestais amazônicas por espectroscopia NIR: efeitos na superfície da madeira. *EUR. J. Madeira Prod.* 81: 159–172, 2023. <https://doi.org/10.1007/s00107-022-01862-y>.

OZAKI, Y.; HUCK, C.; TSUCHIKAWA, S.; ENGELSEN, S. B. (Eds.). Near-infrared spectroscopy: theory, spectral analysis, instrumentation, and applications. Springer Nature, 2020.

PASSARINI, L.; HERNÁNDEZ, R. E. Effect of the desorption rate on the dimensional changes of *Eucalyptus saligna* wood. *Wood Science and Technology*, v. 50, n. 5, p. 941-951, 2016.

ROSSO, S.; MUNIZ, G. I. B. D.; MATOS, J. L. M. D.; HASELEIN, C. R.; HEIN, P. R. G.; LOPES, M. D. C. Predição da massa específica de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden por espectroscopia no infravermelho próximo. *Cerne*, v. 19, p. 647-652, 2013.

SAVITZKY, A.; AND GOLAY, M. J. Smoothing and differentiation of data by simplified least squares procedures. *Analytical Chemistry* 36: 1627-1639. 1964.

SHEN, Y.; GAO, Z.; HOU, X.; CHEN, Z.; JIANG, J.; SUN, J. Spectral and thermal analysis of *Eucalyptus* wood drying at different temperature and methods. *Drying Technology*, [S. l.], 2020.

TOSCANO, G.; LEONI, E.; GASPERINI, T.; PICCHI, G. Performance of a portable NIR spectrometer for the determination of moisture content of industrial wood chips fuel. *Fuel*, 320, 123948, 2022.

VITALIS, F.; MUNCAN, J.; ANANTAWITTAYANON, S.; KOVACS, Z.; TSENKOVA, R. Aquaphotomics monitoring of lettuce freshness during cold storage. *Foods*, v. 12, n. 2, p. 258, 2023.

YANG, Y. Q.; XU, W.; LIU, X.; WANG, X. D. Study on permeability of *cunninghamia lanceolata* based on steam treatment and freeze treatment. *Wood Research*, v. 66, p. 721-731, 2021.

YIN, Q.; LIU, H. H. Drying stress and strain of wood: a review. *Applied Sciences*, v. 11, n. 11, p. 5023, 2021.

ZAHIR, S. A. D. M.; OMAR, A. F.; JAMLOS, M. F.; AZMI, M. A. M.; MUNCAN, J. A review of visible and near-infrared (Vis-NIR) spectroscopy application in plant stress detection. *Sensors and Actuators A: Physical*, v. 338, p. 113468, 2022.

ZEN, L. R.; NASCIMENTO, T. M.; SANTOS, J. H.; KLITZKE, R. J.; ROCHA, M. P.; MONTEIRO, T. C. Drying methods to evaluate the quality of *Eucalyptus* sawn timber. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, v. 14, n. 2, p. 22-30, fev. 2020. DOI: 10.22587/ajbas.2020.14.2.4.

ZHANG, X.; DUAN, Z.; MAO, H.; GAO, H.; ZUO, Z. A lettuce moisture detection method based on terahertz time-domain spectroscopy. *Ciência Rural*, v. 52, n. 6, p. e20210002, 2021.

ZHOU, T.; LIU, H. Research progress of wood cell wall modification and functional improvement: A review. *Materials*, v. 15, n. 4, p. 1598, 2022.

ZHOU, X.; SUN, J.; MAO, H.; WU, X.; ZHANG, X.; YANG, N. Visualization research of moisture content in leaf lettuce leaves based on WT-PLSR and hyperspectral imaging technology. *Journal of Food Process Engineering*, v. 41, n. 2, p. e12647, 2018.