

# UTILIZAÇÃO DO NIR PARA PREDIÇÃO DE DENSIDADE BÁSICA DA MADEIRA PARA PRODUÇÃO DE POLPA KRAFT

Julia Rodrigues de Araujo Gomes<sup>1</sup>, Fernando José Borges Gomes<sup>1</sup>, Paulo Ricardo Gherardi Hein<sup>2</sup>, Larisse Aparecida Ribas Batalha<sup>1</sup>, Nilton Louvem da Silva Júnior<sup>1</sup>, Roberto Carlos Costa Lelis<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Departamento de Produtos Florestais – DPF, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro – UFRRJ, Seropédica-RJ, Brasil.

<sup>2</sup> Departamento de Ciência e Tecnologia da Madeira – DCTM, Universidade Federal de Lavras – UFLA, Lavras-MG, Brasil.

## RESUMO

A densidade básica é uma das propriedades mais exploradas na área da tecnologia da madeira, devido ao seu impacto significativo na correlação com as propriedades físicas e mecânicas. Enquanto a abordagem tradicional, que é destrutiva, requer investimentos consideráveis e um período prolongado para a realização dos testes, os métodos não destrutivos estão emergindo como uma alternativa valiosa para prever as características da madeira. A espectroscopia na região do infravermelho próximo (NIR) é uma ferramenta não invasiva que possibilita a predição de uma ampla gama de propriedades da madeira, por se tratar de uma análise não destrutiva que permite uma rápida obtenção dos resultados, destacando-se na avaliação de processos e produtos do setor florestal. Esta pesquisa teve como objetivo construir um modelo de predição da densidade básica de *Eucalyptus* spp., usando o NIR associado a análise estatística multivariada dos dados. Clones comerciais de *Eucalyptus* de diferentes regiões foram selecionados para o estudo. Inicialmente, determinou-se a densidade básica em 100 amostras de um mix de cavacos através da ABNT NBR 11941. Os cavacos foram transformados em serragem com o uso de um moinho de facas Wiley. A serragem foi classificada em um conjunto de peneiras, sendo utilizado para as análises a fração que passou pela peneira de 40 mesh e que ficou retida na peneira de 60 mesh. Assinaturas espectrais foram obtidas no espectrômetro nas amostras de serragem. Os dados espectrais receberam tratamento matemático da primeira derivada de Savitzky-Golay, para redução dos ruídos. A regressão dos mínimos quadrados parciais (PLS-R) foi aplicada nos espectros obtidos e nos dados de referência para a predição da densidade, com o uso do software Chemoface. A performance dos modelos foi avaliada por validação cruzada completa, apresentando  $R^2_{cv} = 0,82$  e  $RMSE_{cv} = 21,00 \text{ kg/m}^3$  e por validação independente, com os valores de  $R^2_p = 0,79$  e  $RMSE_p = 21,79 \text{ kg/m}^3$ . O modelo apresentou resultados satisfatórios para predição da densidade. A

técnica NIR se mostrou promissora na predição da densidade da madeira de *Eucalyptus* para a indústria de celulose.

**Palavras-chave:** espectroscopia no infravermelho próximo, avaliação não destrutiva, modelos de calibração, estatística multivariada, qualidade da madeira.

## INTRODUÇÃO

O Brasil, como o segundo maior produtor de polpa celulósica do mundo e o maior exportador desse material no mercado global, precisa garantir a qualidade da matéria-prima, incluindo suas propriedades químicas e físicas, para assegurar uma produção de alto padrão (IBÁ, 2023). A densidade básica é um parâmetro crucial na indústria de celulose, servindo como indicador da qualidade na produção de polpa celulósica e impactando diretamente o consumo de madeira (Segura, 2015). Esse parâmetro, que é calculado pela relação entre massa seca e volume saturado da madeira, representa um desafio em termos de homogeneidade em escala industrial, mas é fundamental para otimizar a eficiência na produção de polpa celulósica (Dias *et al.*, 2018). Um controle inadequado dessa propriedade pode resultar em um aumento no consumo específico de madeira, encarecendo o processo produtivo.

O consumo específico de madeira (CEM) é o volume de madeira sólida necessário para produzir uma tonelada de polpa celulósica, normalmente expressa em tonelada seca ao ar, refletindo a eficiência do cozimento nas indústrias de celulose (Queiroz *et al.*, 2004). A densidade básica da madeira é um dos fatores mais importantes que influenciam o CEM, uma densidade mais baixa e não controlada aumenta o consumo específico e, conseqüentemente, os custos de produção. Portanto, compreender e controlar a densidade da madeira é essencial para otimizar a produção e garantir competitividade no setor de Celulose & Papel (Gardner *et al.*, 2007; Valverde *et al.*, 2006).

**Autor correspondente:** Julia Rodrigues de Araujo Gomes, Itaguaí, 23811-557. Brasil. Fone: +55-21-983941174 e-mail: julia.r.gomes@outlook.com

Enquanto algumas pesquisas utilizam métodos destrutivos e demorados para a amostragem de árvores (Zaque *et al.*, 2018), técnicas não destrutivas, como a espectroscopia no infravermelho próximo (NIR), oferecem soluções rápidas e confiáveis (Costa *et al.*, 2018; Pasquini *et al.*, 2003). O NIR pode estimar diversas propriedades da madeira, incluindo características físicas, químicas, mecânicas e anatômicas, sendo eficaz para monitoramento em tempo real.

Essa abordagem analisa a interação das ondas eletromagnéticas na faixa de comprimento de onda de 800 a 2500 nm com o material em estudo (Tsuchikawa e Kobori, 2015). Durante esse processo, o espectrômetro emite radiação infravermelha sobre a amostra, seja sólida ou líquida, enquanto os sensores registram as oscilações das vibrações moleculares dos compostos químicos presentes, resultando em uma representação gráfica chamada assinatura espectral, que fornece informações essenciais sobre a composição e estrutura da amostra (Diniz *et al.*, 2019). A adoção dessa tecnologia em análises laboratoriais é impulsionada pela rapidez dos resultados, pela ausência de preparação complexa das amostras, por procedimentos simplificados e por uma repetibilidade superior em comparação aos métodos químicos tradicionais (Tsuchikawa e Schwanninger, 2013). A interpretação dos dados espectrais exige a aplicação de técnicas estatísticas multivariadas, sendo a Regressão de Mínimos Quadrados Parciais (PLS-R) frequentemente utilizada para análises quantitativas (Sandak *et al.*, 2016).

Diante desse contexto, o objetivo do presente trabalho consiste em prever a densidade básica da madeira, um dos parâmetros de qualidade da madeira destinada à produção de polpa celulósica kraft, utilizando a ferramenta analítica de espectroscopia no infravermelho próximo (NIR) associada à estatística multivariada para elaboração de modelos preditivos para densidade básica da madeira.

## MÉTODOS

### 1. Obtenção das amostras

O presente estudo foi realizado utilizando-se cavacos obtidos de clones comerciais do gênero *Eucalyptus spp.*, provenientes de diversas regiões e oriundos de plantações de uma empresa brasileira do Setor de Celulose & Papel. Para a coleta das amostras, foram selecionadas três árvores por talhão, totalizando amostras de 100 talhões diferentes.

### 2. Determinação da densidade básica

A densidade básica das 100 amostras do mix de cavacos foi determinada conforme o procedimento descrito na NBR 11941 (ABNT, 2003). Para isso, o volume saturado e a massa na condição anidra foram medidos em todas as amostras, a fim de determinar a densidade básica.

### 3. Preparação das amostras de cavacos

Para coletar os espectros no infravermelho próximo, os cavacos foram transformados em serragem utilizando um

moinho de facas Willey. Para a análise, foi utilizada a fração da serragem que passou por uma peneira com malha de 40 mesh e ficou retida em uma de 60 mesh. Após a classificação, a serragem foi armazenada em uma sala climatizada, com temperatura de 25 °C e umidade relativa de 65%. As 100 amostras de serragem foram então transferidas para pequenos sacos plásticos hermeticamente fechados e devidamente identificados.

### 4. Aquisição dos espectros no infravermelho próximo

As assinaturas espectrais das amostras foram coletadas diretamente da superfície de cada amostra de serragem, utilizando o equipamento microNIR (Viavi Solutions Inc., CA, Estados Unidos). Para a leitura, 2,0 g de serragem de cada amostra foram pesados em cadinho de porcelana.

Os espectros foram registrados na faixa do infravermelho próximo, variando de 880 a 1660 nm, totalizando 125 variáveis espectrais. Cada espectro foi obtido pela média de 15 varreduras. A coleta de dados foi feita com o software SpectralSoft (Viavi Solutions Inc., CA, Estados Unidos).

### 5. Análise da estatística multivariada dos dados

Os espectros obtidos foram analisados utilizando estatística multivariada, com e sem a aplicação de pré-tratamentos matemáticos, através do software Chemoface versão 1.66 (Nunes *et al.*, 2012). A regressão dos mínimos quadrados parciais (PLS-R) foi empregada para correlacionar os espectros medidos pelo espectrômetro com os valores de referência da densidade básica. Os modelos foram desenvolvidos por meio de validação cruzada completa e validação independente. Na validação cruzada, os espectros usados na calibração também foram usados para validar o modelo. Na validação independente, os espectros foram divididos em lotes de calibração (75% das amostras) e de validação (25% das amostras).

Para melhorar a qualidade da calibração e reduzir ruídos, foi aplicado um tratamento matemático de primeira derivada aos dados. Esta derivada foi calculada utilizando 15 pontos de alisamento e um polinômio de segunda ordem através do algoritmo de Savitzky-Golay. A identificação e remoção de outliers foram realizadas por meio da análise do gráfico de resíduos, onde amostras que se desviaram significativamente da linha de tendência foram classificadas como *outliers* e removidas da análise para otimização dos modelos estatísticos.

Os critérios para selecionar os melhores modelos preditivos incluíram os coeficientes de determinação da validação ( $R^2_{cv}$ ) e da predição ( $R^2_p$ ), que indicam o grau de correlação entre os valores medidos e preditos, sendo os valores próximos de 1 indicam maior robustez do modelo. Além disso, foram considerados os valores da raiz do erro quadrático médio (RMSE), tanto da validação (RMSE<sub>cv</sub>) quanto da predição (RMSE<sub>p</sub>).

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 1. Estatística descritiva da densidade básica de referência

A densidade básica média das amostras de *Eucalyptus spp.*, utilizadas foi de 441 kg/m<sup>3</sup>, variando entre 359 kg/m<sup>3</sup> e 562 kg/m<sup>3</sup>, com um coeficiente de variação de 11,09%. Batista, Klitzke e Santos (2010) observaram densidades básicas de 460 kg/m<sup>3</sup>, 450 kg/m<sup>3</sup> e 560 kg/m<sup>3</sup> para *Eucalyptus saligna*, *grandis* e *dunii*, respectivamente. Viana *et al.*, (2010) relataram uma densidade média de 440 kg/m<sup>3</sup> para *Eucalyptus grandis* com três anos de idade. Lima, Breese e Cahalan (2000) encontraram uma variação na densidade básica da madeira de 436 a 577 kg/m<sup>3</sup> em um estudo com 26 clones de *Eucalyptus*. Os dados apresentados na **Tabela 1** mostram que a densidade básica da madeira de *Eucalyptus* está dentro do intervalo esperado, confirmando os valores encontrados na literatura.

**Tabela 1.** Valores médios, mínimos e máximos, diferença, desvio padrão e coeficiente de variação para a densidade básica das amostras de *Eucalyptus*.

DB (kg/m <sup>3</sup> )	Mín (kg/m <sup>3</sup> )	Máx (kg/m <sup>3</sup> )	Dif (kg/m <sup>3</sup> )	DP (kg/m <sup>3</sup> )	CV (%)
441	359	562	203	48,90	11,09

Onde: DB: Densidade Básica Média; Mín: Mínimo; Máx: Máximo; Dif: Diferença; DP: Desvio Padrão e CV: Coeficiente de Variação

### 2. Assinaturas espectrais no infravermelho próximo

Os espectros das amostras de serragem de *Eucalyptus* tanto os dados originais quanto os obtidos após a aplicação do tratamento matemático da primeira derivada estão apresentados na **Figura 1**. Esses resultados foram gerados utilizando o software estatístico Chemoface versão 1.66 (Nunes *et al.*, 2012). Cada assinatura espectral é representada por uma linha no gráfico.

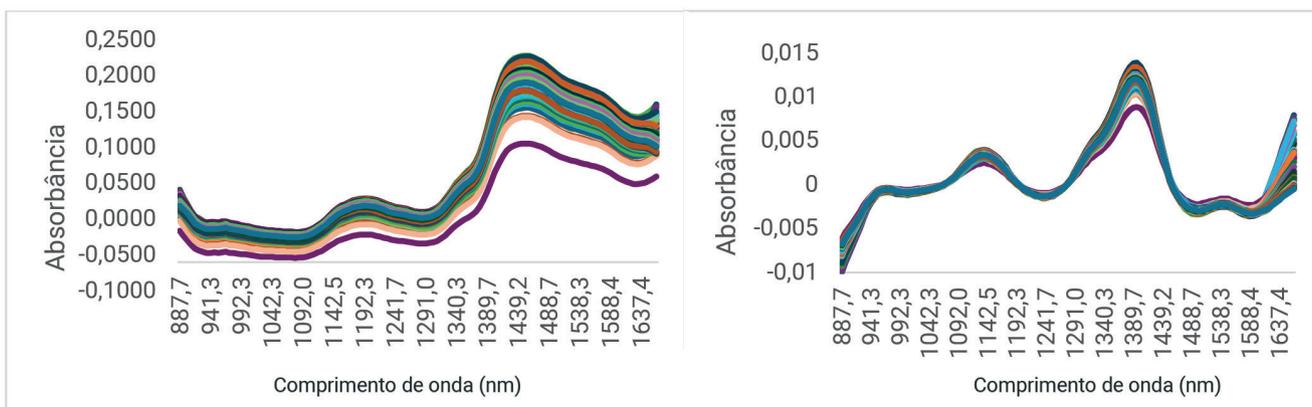
A utilização de tratamentos matemáticos como a primeira derivada na análise da assinatura espectral, reduz significativamente os ruídos na linha de base dos espectros, conforme descrito por Pasquini (2003), permitindo uma correção preci-

sa das informações ao longo dos diferentes comprimentos de onda. Isso aumenta a confiabilidade dos dados e facilita a identificação dos picos de absorção.

De acordo com Sheppard, Willis e Rigg (1985), os comprimentos de onda identificados estão associados às bandas de absorção que interagem com grupos funcionais das substâncias químicas na madeira, como lignina, celulose e hemicelulose. Grupos funcionais na madeira possuem assinaturas espectrais únicas, absorvendo radiação infravermelha em comprimentos de onda específicos, conforme tabelado por Watanabe *et al.*, (2006) e Nigoski *et al.*, (2016) observaram que regiões de celulose amorfa e cristalina se estendem por números de onda entre 1429 nm e 1596 nm. Hemiceluloses estão associados a bandas entre 1667 nm e 1684 nm. Grupos aromáticos e fenólicos associados a lignina e extrativos são identificados no intervalo de 1681 nm e 1709 nm e em de 1449 a 1458 nm. No intervalo de 1429 nm a 1667 nm, ocorrem sobretons associados às ligações O-H e N-H, que interagem com a água, hemicelulose e celulose (Fujimoto *et al.*, 2008; Schawnninger *et al.*, 2011; Yonenobu e Tsuchikawa 2003).

### 3. Modelos PLS-R para estimar a densidade das serragens de *Eucalyptus*

A **Tabela 2** mostra as estatísticas das validações cruzadas completas para a densidade básica da madeira de *Eucalyptus*, com base em espectros originais e após o tratamento espectral utilizando a primeira derivada. Os modelos preditivos apresentaram coeficientes de determinação de validação cruzada (R<sup>2</sup>cv) de 0,80 e 0,82, além de erros quadrático médio de validação cruzada (RMSEcv) de 21,64 e 21,00 kg/m<sup>3</sup>, respectivamente, para os dados sem tratamento e com tratamento matemático. Resultados semelhantes foram encontrados na literatura. Hein, Lima e Chaix (2009) relataram R<sup>2</sup>cv entre 0,66 e 0,74 e RMSEcv de 37,3 a 32,3 kg/m<sup>3</sup> em predições não destrutivas da densidade básica de 140 amostras de *Eucalyptus*, sem aplicar tratamento matemático. Arriel *et al.*, (2019) analisaram 39 clones de *Eucalyptus* e relataram R<sup>2</sup>cv entre 0,38 e 0,77, com



**Figura 1.** Espectros originais (Fig. 1a) e tratados com primeira derivada (Fig. 1b) obtidos das serragens da madeira de *Eucalyptus*

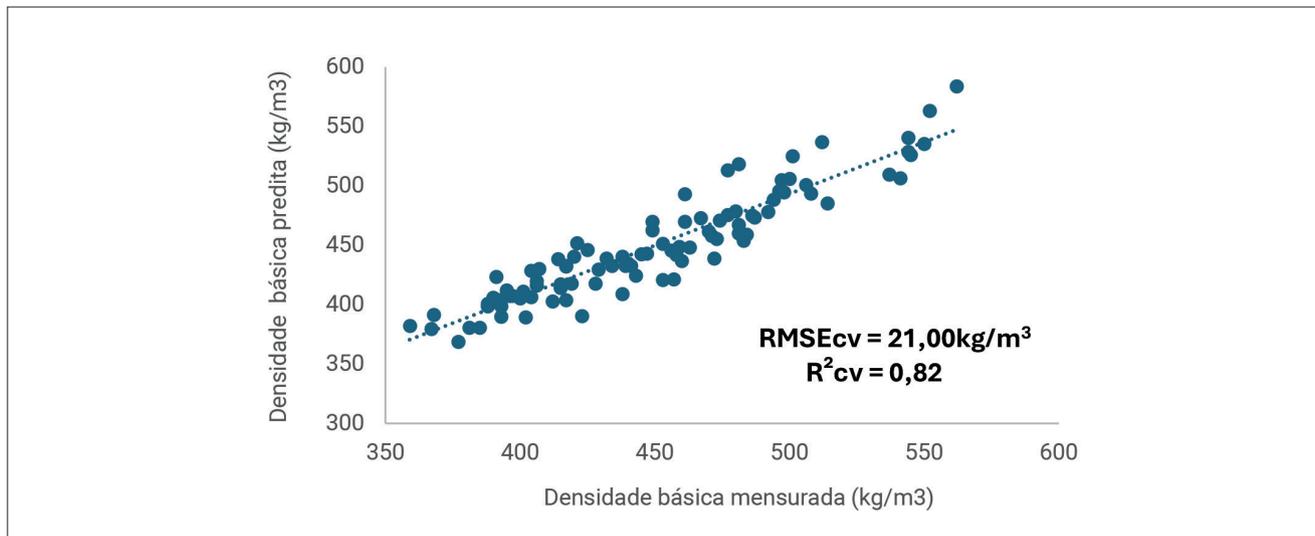


Figura 2: Dispersão dos dados de validação cruzada após tratamento matemático nas amostras de *Eucalyptus*

Tabela 2. Parâmetros de PLS-R da validação cruzada e independente para estimar a densidade básica das madeiras.

Modelo	Tratamentos	Validação cruzada completa		Validação independente	
		R <sup>2</sup> cv	RMSEcv	R <sup>2</sup> p	RMSEp
1	Sem tratamento	0,80	21,64	0,79	21,79
2	Primeira derivada	0,82	21,00	0,79	21,79

R<sup>2</sup>cv = coeficiente de determinação da validação cruzada completa; RMSEcv = raiz do erro quadrático médio da validação cruzada completa; R<sup>2</sup>p = coeficiente de determinação da validação independente; RMSEp = raiz do erro quadrático médio da validação independente.

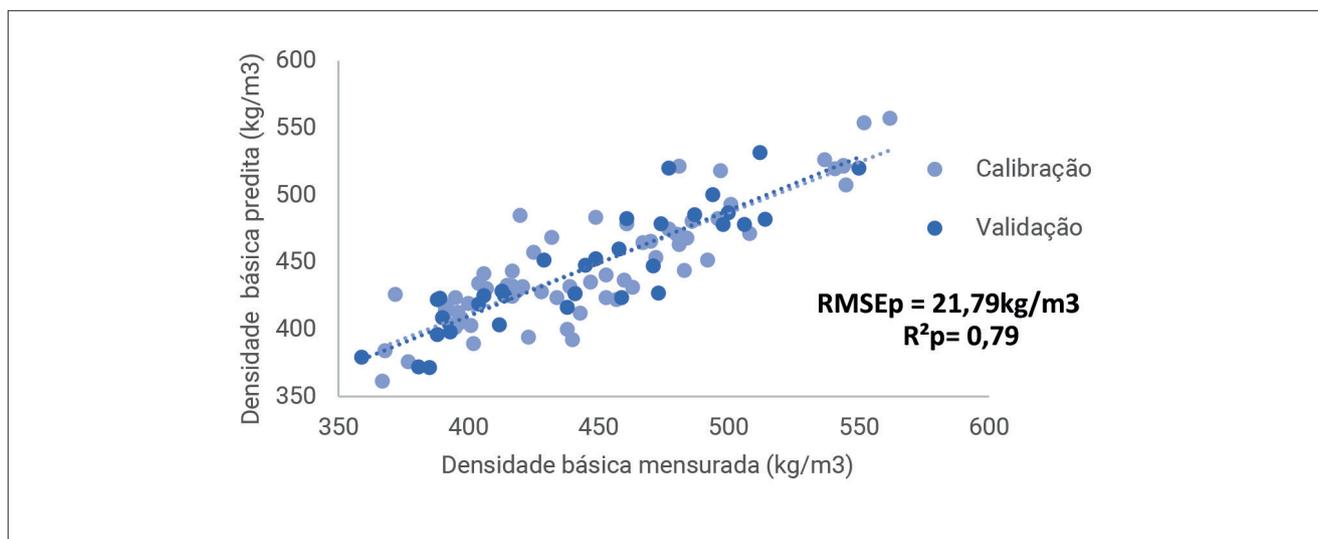
RMSEcv variando de 15,00 a 26,00 kg/m<sup>3</sup> para 117 amostras utilizadas. Estopa *et al.*, (2017), em um estudo sobre fenotipagem de madeira de *Eucalyptus benthamii*, obtiveram R<sup>2</sup>cv de 0,33 e RMSEcv de 27 kg/m<sup>3</sup>, utilizando 481 amostras.

Ao comparar os erros de predição da densidade básica e os coeficientes de determinação reportados na literatura com os resultados deste estudo, observa-se que os erros são relativamente baixos e semelhantes aos previamente citados, mesmo com um tamanho amostral menor neste trabalho. Além disso, os trabalhos citados utilizaram o NIR de bancada, que coleta mais variáveis espectrais das amostras, sendo mais sensível para as análises. Mostrando que o equipamento portátil encontra valores similares e com elevado potencial para a predição da densidade básica.

A Figura 2 apresenta os dados de dispersão da validação cruzada completa para densidade básica da madeira de *Eucalyptus* após tratamento espectral com a primeira derivada nas amostras, é possível observar que os dados mostram valores de referência medidos em laboratório de forma convencional para a densidade básica correlacionados com os valores preditos com base nos espectros de NIR obtidos.

Na Tabela 2, são apresentados dados estatísticos relacionados à validação independente da predição da densidade básica da madeira de *Eucalyptus*. Esses dados foram coletados a partir de 75 amostras com espectros tratados (calibração) e um lote de 25 amostras com espectros não tratados (validação). Os modelos preditivos apresentaram um coeficiente de determinação para predição (R<sup>2</sup>p) de 0,79, com um erro quadrático médio da predição (RMSEp) de 21,79 kg/m<sup>3</sup>. Gouvêa *et al.*, (2011) utilizaram 24 amostras em um lote de validação externa para estimar a densidade básica de clones de *Eucalyptus*, reportando R<sup>2</sup>p de 0,84 e RMSEp de 17,00 kg/m<sup>3</sup>. Em contrapartida, Estopa *et al.*, (2017) encontraram correlações mais baixas, com R<sup>2</sup>p de 0,13 e RMSEp de 23,00 kg/m<sup>3</sup>, utilizando 131 amostras de *Eucalyptus benthamii*. Fantuzzi *et al.*, (2012) relataram R<sup>2</sup>p de 0,68 e RMSEp de 17,00 kg/m<sup>3</sup>.

Ao comparar os erros de predição da densidade básica da madeira na literatura com os resultados deste estudo, observou-se que o erro é relativamente baixo e similar a alguns estudos anteriores. Portanto, o modelo demonstrou viabilidade para determinar a densidade básica da madeira, refletido no coeficiente de determinação satisfatório.



**Figura 3.** Dispersão dos dados de validação independente das amostras de *Eucalyptus*

A **Figura 3** ilustra os dados de dispersão da validação independente para a densidade básica da madeira de *Eucalyptus*, mostrando a correlação entre os valores medidos em laboratório de forma convencional e os valores preditos a partir dos espectros de NIR.

A precisão do NIR, confirmada por meio da validação cruzada e independente, é a forma mais eficaz de medir o desempenho de modelos quantitativos (Hein *et al.*, 2010). O método não destrutivo empregado neste estudo mostrou resultados promissores, apoiando o uso da espectroscopia NIR na avaliação da densidade básica da madeira. Uma grande vantagem é a capacidade de realizar análises no local, após a calibração em laboratório, o que pode resultar em economia de custos e eliminar a necessidade de transporte de materiais pesados. Isso ressalta o potencial do NIR no setor de base florestal, especialmente em áreas como melhoramento genético e indústrias de celulose, já que é um método rápido, prático e confiável que facilita as análises laboratoriais.

## CONCLUSÕES

Neste estudo, foram encontradas boas correlações entre a densidade básica medida e a predita pela modelagem. A validação cruzada mostrou coeficientes de determinação de 0,80 e

0,82, com erros padrão de 21,64 e 21,00 kg/m<sup>3</sup>, respectivamente, sem e com tratamento matemático. Na validação independente, o coeficiente de determinação foi de 0,79, com um erro padrão de predição de 21,79 kg/m<sup>3</sup>.

O MicroNIR se destaca como uma ferramenta promissora para auxiliar no planejamento industrial, especialmente no controle da homogeneidade da densidade básica da matéria-prima. Além disso, possui potencial para uso em programas de melhoramento genético de *Eucalyptus*.

Essa técnica oferece uma alternativa promissora para atender às demandas da indústria florestal, abrindo caminho para novas pesquisas e aprimoramentos que possam explorar maiores aplicabilidades e benefícios.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a Fundação Carlos Chagas Filho de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro (FAPERJ), a Financiadora de Estudos e Projetos (FINEP) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio financeiro, a Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (UFRRJ) pela disponibilidade e pela infraestrutura do Laboratório de Biorrefinaria Lignocelulósica. ■

## REFERÊNCIAS

- 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*, v. 25, n. 3, p. 294-300, 2019.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). NBR 11941: *Madeira: determinação da densidade básica*. Rio de Janeiro, 2003.
- Batista, D. C., Klitzke, R. J., Santos, C. V. T. Densidade básica e reprodutibilidade da madeira de clones de três espécies de *Eucalyptus*. *Ciência Florestal*, v. 20, n. 4, p. 665-674, 2010.
- Costa, E. V. S., Rocha, M. F. V., Hein, P. R. G., Amaral, E. A., Santos, L. M. D., Brandão, L. E. V. D. S. e Trugilho, P. F. Influence of spectral acquisition technique and wood anisotropy on the statistics of predictive near infrared-based models for wood density. *Journal of Near Infrared Spectroscopy*, v. 26 n. 2, p. 106-116, 2018.
- Dias, A. C. C., Marchesan, R., Almeida, V.C., Monteiro, T.C., Moraes, C.B. Relação entre a densidade básica e as retrações em madeira de teca. *Ciência da Madeira (Brazilian Journal of Wood Science)*, v. 9, n. 1, p. 37-44, 2018

- Diniz, C. P., Grattapaglia, D., Mansfield, S. D., Figueiredo, L. F. A. Near infrared based models for lignin syringyl/guaiacyl ratio of *Eucalyptus benthamii* and *E. pellita* using a streamlined thioacidolysis procedure as the reference method. *Wood Science and Technology*, v. 53, n. 3, p. 521-533, 2019.
- Estopa, R. A., Milagres, F. R., Oliveira, R. A. e Hein, P. R. G. Modelos espectroscópicos nir para fenotipagem de características da madeira em programas de melhoramento de *Eucalyptus benthamii*. *Cerne*, v. 23 n. 3, p. 367-375, 2017.
- Fantuzzi, N. H. *Qualidade da madeira de eucalipto para produção de celulose Kraft*. 2012. 105p. PhD thesis. Universidade Federal de Viçosa, Viçosa (MG), 2012.
- Fujimoto, T., Kurata, Y., Matsumoto K., Tsushikawa, S. Application of near infrared spectroscopy for estimating wood mechanical properties of small clear and full length lumber specimens. *Journal of Near Infrared Spectroscopy*, Sussex, v. 16, n. 6, p. 529-537, 2008.
- Gardner, R. A., Little, K. M., Arbuthnot, A. Wood and fiber productivity potential of promising new eucalypt species for coastal Zululand, South Africa. *Australian Forestry*, Melbourne, v. 70, n. 1, p. 37-47, 2007.
- Gouvêa, A. D. F. G., Trugilho, P. F., Gomide, J. L., Silva, J. R. M. D., Andrade, C. R. e Alves, I. C. N. Determinação da densidade básica das madeiras de *Eucalyptus* por diferentes métodos não destrutivos. *Revista Árvore*, v. 35, p. 349-358, 2011.
- Hein, P. R. G., Campos, A. C. M., Lima, J. T., Trugilho, P. F., Chaix, G. Estimativa da resistência e da elasticidade à compressão paralela às fibras da madeira de *Eucalyptus grandis* e *E. urophylla* usando a espectroscopia no infravermelho próximo. *Scientia Forestalis*, Piracicaba (SP), v. 37, n. 82, p. 119-129, 2010.
- Hein, P. R. G., Lima, J. T. e Chaix, G. Otimização de calibrações baseadas em espectroscopia no infravermelho próximo para estimativa de propriedades da madeira de *Eucalyptus*. *Floresta*, v. 40, n. 3, p. 615-624, 2009.
- IBÁ. Relatório 2023. Indústria Brasileira de Árvores. 2023.
- Lima, J. T., Breese, M. C., Cahalan, C. M. Genotype-environment interaction in wood basic density of *Eucalyptus* clones. *Wood Science and Technology*, v. 34, n. 3, p. 197-206, 2000.
- Nisgoski, S. *et al.* Use of NIR for trees discrimination in different fertilizations based on wood and bark spectra. *Braz J Wood Sci*, v. 7, n. 2, p. 100-110, 2016.
- Nunes, C. A., Freitas, M. P., Pinheiro, A. C. M., Bastos, S. C. Chemoface: a novel free user-friendly interface for chemometrics. *Journal of the Brazilian Chemical Society*, v. 23, n. 11, p. 2003-2010, 2012.
- Pasquini, C. Near infrared spectroscopy: A mature analytical technique with new perspectives e A review. *Analytica Chimica Acta*, v. 1026, p. 8-36, 2018.
- Pasquini, C. Near infrared spectroscopy: fundamentals, practical aspects and analytical applications. *Journal of the Brazilian chemical society*, v. 14, p. 198-219, 2003.
- Queiroz, S. C. S., Gomide, J. L., Colodette, J. L., Oliveira A, R. C. DE., Influência da densidade básica da madeira na qualidade da polpa kraft de clones híbridos de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden x *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake clones. *Revista Árvore*, Viçosa, v. 28, n. 6, p. 901- 909, 2004.
- Sandak, J., Sandak, A., Meder, R. Assessing trees, wood and derived products with near infrared spectroscopy: hints and tips. *J Near Infrared Spec*, v. 24, n. 6, p. 485-505, 2016.
- Schwanninger, M., Rodrigues, J. C., Fackler, K. A review of band assignments in near infrared spectra of wood and wood components. *J Near Infrared Spec*, v. 19, n. 5, p. 287-308, 2011.
- Segura, T. E. S. *Avaliação das madeiras de Corymbia citriodora, Corymbia torelliana e seus híbridos visando à produção de celulose kraft branqueada*, 2015. Tese (Doutorado em Recursos Florestais) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2015.
- Segura, T. E. S., Pimenta, L. R., Mattiazzo, F. B., Silva, F. M., Cruz, J. A. e Souza, L. Programa de controle da qualidade da madeira na Eldorado Brasil celulose. *O Papel*, v. 78, n. 7, p. 82-89, 2017.
- Sheppard, N., Willis, H. A., Rigg, J. C. Commission on molecular structure and spectroscopy and commission on quantities and units in clinical chemistry. *Pure and Applied Chemistry*, v. 57, n. 1, p. 105-120, 1985.
- Tsuchikawa, S., Kobori, H. A review of recent application of near infrared spectroscopy to wood science and technology. *Journal of Wood Science*. v. 61, p. 213-220, 2015.
- Tsuchikawa, S., Schwanninger, M. A review of recent near-infrared research for wood and paper. *Applied Spectroscopy Reviews*, v. 48, p. 43-71, 2013.
- Valverde, S. R., Soares, N. S. e Silva, M. L. D. Desempenho das exportações brasileiras de celulose. *Revista Árvore*, v. 30, p. 1017-1023, 2006.
- Viana, L. C., Trugilho, P. F., Hein, P. R. G., Silva, J. R. M. D. e Lima, J. T. Modelos de calibração e a espectroscopia no infravermelho próximo para predição das propriedades químicas e da densidade básica da madeira de *Eucalyptus*. *Ciencia florestal*, v. 20, p. 367-376, 2010.
- Watanabe A, Morita S, Kokot S, Matsubara M, Fukai K, Ozaki Y. Drying process of microcrystalline cellulose studied by attenuated total reflection IR spectroscopy with two-dimensional correlation spectroscopy and principal component analysis. *Journal of Molecular Structure* v. 799, n. 1-3, p. 102-110, 2006.
- Yonenobu, H. e Tsuchikawa, S. Near-infrared spectroscopic comparison of antique and modern wood. *Applied Spectroscopy*, v. 57, n. 11, p. 1451-1453, 2003.
- Zaque, L. A. M., Ferreira, M. D., Melo, R. R. Variação radial e longitudinal da massa específica básica da madeira de *Araucaria angustifolia* com diferentes idades. *Braz J Forest Res*, v. 38, p. 1-5, 2018.