

ESTIMAÇÃO DA DENSIDADE BÁSICA EM FUNÇÃO DA DENSIDADE APARENTE DA MADEIRA DE *Tachigali vulgaris*

Tayllor Eduardo de Macêdo Silva¹, Thiago de Paula Protássio², Delman de Almeida Gonçalves³, Elvis Vieira dos Santos², Jonathan Dias Marques⁴, Alvaro Augusto Vieira Soares¹

¹ Universidade Federal de Uberlândia, Monte Carmelo, Minas Gerais (tayllor.silva@ufu.br);

² Universidade Federal de Lavras, Lavras, Minas Gerais; ³ Embrapa Amazônia Oriental, Belém, Pará; ⁴ Universidade Federal Rural da Amazônia, Belém, Pará.

RESUMO: *Tachigali vulgaris*, popularmente conhecida como tachi-branco, é uma espécie arbórea promissora para a silvicultura nacional, em especial para plantios direcionados à energia da biomassa. A caracterização da qualidade de sua madeira, incluindo estudos sobre a densidade básica e densidade aparente, é essencial para otimização de seu uso. Neste estudo, avaliou-se um modelo estatístico para estimar a densidade básica da madeira de tachi-branco a partir da densidade aparente proveniente de densitometria de raios-X. De 32 árvores foram retirados discos de 5 cm de espessura nas posições longitudinais de 0%, DAP, 25%, 50%, 75% e 100% da altura comercial para a determinação da densidade básica e aparente, sendo a última determinada por densitometria de raios-X. Foi ajustado um modelo linear misto relacionando a densidade básica à densidade aparente contemplando a estrutura hierárquica de árvore dentro de blocos dentro de experimentos. A significância do modelo foi testada pela razão de verossimilhança a 5% de significância, e as estatísticas de qualidade raiz quadrada do erro quadrático médio (RQEM), média dos desvios absolutos (MDA) e coeficiente de correlação de Pearson ($r_{Y\hat{Y}}$) entre valores observados e estimados foram utilizadas para avaliar a acurácia do modelo. O modelo ajustado foi estatisticamente significativo com alta acurácia das estimativas, i.e., RQEM de 9,0%, MDA de 3,8%, e $r_{Y\hat{Y}}$ de 0,85, resultando na equação *Densidade básica* = $0,0598 + 0,7554 * \textit{densidade aparente}$. Assim, conclui-se que o modelo linear misto ajustado demonstra acurácia para estimar a densidade básica das árvores de *T. vulgaris*, a partir da densidade aparente.

Palavras-chave: densitometria de raios-X, manejo florestal, modelagem, Amazônia.

INTRODUÇÃO

Tachigali vulgaris L.F. Gomes da Silva & H.C. Lima (Fabaceae), espécie arbórea, popularmente conhecida como tachi-branco, destaca-se pelo forte potencial para silvicultura nacional, especialmente para uso da biomassa visando obtenção de energia. No entanto, a escassez de informações sobre silvicultura e práticas de manejo representa um obstáculo significativo para expansão do cultivo da espécie em plantações comerciais.

A densidade é o parâmetro mais estudado da madeira. A densidade básica é definida pela razão entre a massa seca e seu volume saturado, enquanto a densidade aparente é definida como a razão entre a massa e o volume da madeira sob umidade pré-estabelecida (MORESCHI,

2014). Ambas se constituem como ferramentas importantes para caracterizar e avaliar a qualidade da madeira para seus usos diversos e estimar a biomassa florestal. A densitometria de raio X determina a densidade aparente das amostras, sendo este método empregado em avaliações diversas da madeira, por exemplo, para determinação da variação da densidade aparente no sentido radial, refletindo como esta variável se comporta ao longo do crescimento da árvore. Estudos com densitometria de raio X têm sido conduzidos para diversas madeiras tropicais, incluindo estudos recentes com *T. vulgaris* (MARQUES *et al.*, 2023). A densidade básica é mais utilizada por empresas florestais, entretanto, alguns testes são possíveis de serem realizados apenas para determinar a densidade aparente, o que demanda estudos de conversão de um tipo de densidade para outro.

Assim, o objetivo deste estudo foi desenvolver um modelo estatístico para a estimativa da densidade básica da madeira de *T. vulgaris* a partir de dados da densidade aparente provenientes de densitometria de raio X.

MATERIAL E MÉTODOS

Os dados foram provenientes de dois testes de adubação em plantio de *T. vulgaris* localizados no distrito de Monte Dourado, município de Almeirim, norte do estado do Pará, em 2010. Um dos testes foi estabelecido em Latossolo Amarelo, de textura média arenosa (ARE), e o outro em Latossolo Amarelo, de textura argilosa (ARG), ambos em delineamento em blocos casualizados sob estrutura fatorial, com quatro blocos, cujos tratamentos são 4 níveis de fósforo (P) e 3 níveis de potássio (K) combinados entre si. O espaçamento de plantio em ambas as áreas experimentais foi de 3 m × 2 m, totalizando 1.667 árvores ha⁻¹. Os tratamentos consistiram em 12 doses de fósforo e potássio (TEIXEIRA, 2021). Dos dois tratamentos extremos, tratamento sem adubação e maior dose (320 kg ha⁻¹ de P e 199 kg ha⁻¹ de K), com 4 parcelas em cada área experimental, foram abatidas 2 árvores para cada bloco e em cada experimento, totalizando 32 árvores, das quais foram retirados discos de 5 cm de espessura nas posições longitudinais de 0%, 25%, 50%, 75% e 100% da altura comercial (i.e., até 5 cm de diâmetro mínimo com casca), além da posição de 1,30 m, para a determinação da densidade básica da madeira. Em laboratório, os discos foram seccionados em quatro cunhas passando pela medula. Duas cunhas opostas foram utilizadas na determinação da densidade básica, sendo submersas em água até a saturação e, em seguida, o volume saturado foi determinado pelo método hidrostático. As amostras foram levadas a estufa com circulação de ar a 105°C, até atingirem massa constante, momento em que foram pesadas para determinação da massa seca.

A densidade básica de cada cunha foi calculada pela razão entre a massa seca e o volume saturado, conforme as recomendações da NBR 11941-02 da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT, 2003). A densidade básica de cada posição foi obtida pela média aritmética das densidades básicas das cunhas. A densidade básica média de cada tronco foi calculada pela média aritmética das densidades básicas das posições longitudinais.

Para a determinação da densidade aparente, amostras dos discos mencionados acima, com dimensões aproximadas de 1 cm de largura × 5 cm de espessura × comprimento igual ao diâmetro do disco, foram coladas em suportes de madeira para facilitar o corte em serra, com alinhamento perpendicular das fibras e vasos. Utilizando uma serra circular dupla paralela, os corpos de prova foram cortados na direção transversal, resultando em dimensões finais de aproximadamente 1,4 cm de espessura × 1 cm de largura × comprimento igual ao diâmetro do disco inicial. A precisão dos resultados foi garantida por meio de medições com paquímetro. As seções transversais foram condicionadas em câmara de climatização a 20°C e 60% de umidade até atingirem 12% de umidade (TOMAZELLO FILHO *et al.*, 2008). Para perfis densitométricos foram obtidos com raio X digital Faxitron, modelo LX 60, imagens digitais em escala de cinza, que posteriormente foram analisadas para determinação dos valores pontuais de densidade na direção radial pelo software WinDendro™.

A partir dos dados de densidade básica e densidade aparente foi ajustado um modelo linear misto com a densidade básica como variável resposta em função da densidade aparente como efeito fixo. Os efeitos aleatórios consistiram em árvore dentro de blocos dentro de tipo de solo, associados ao intercepto. A significância do ajuste foi testada pelo teste de razão de verossimilhança, a 5% de significância por meio do qual foi comparado o modelo completo com estrutura mencionada acima contra o modelo reduzido em que a densidade básica foi ajustada apenas em função do intercepto (média geral + efeitos aleatórios). As estatísticas de qualidade (EQ) utilizadas para avaliar a acurácia das estimativas foram: raiz quadrada do erro quadrático médio (RQEM), média das diferenças absolutas (MDA) e coeficiente de correlação de Pearson entre os valores observados e estimados ($r_{Y\hat{Y}}$):

$$RQEM = 100 \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{n \bar{y}}}$$

$$MDA = \left(\frac{1}{n}\right) \sum_{i=1}^n |y_i - \hat{y}_i| r_{Y\hat{Y}} = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})(\hat{y}_i - \bar{\hat{y}})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{\hat{y}})^2}}$$

Em que y_i = altura observada; \bar{y} = média da altura observada; \hat{y}_i = altura estimada; $\bar{\hat{y}}$ = média da altura estimada; e n = número de observações.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os valores da densidade aparente da madeira variaram, em g/cm^3 , de 0,37 a 0,82, com média de 0,62. Já a densidade básica, variou em 0,33 a 0,71 g/cm^3 , com média de 0,53 g/cm^3 . Esse valor médio de densidade básica é comparável aos reportados para espécies do gênero *Eucalyptus*, amplamente utilizado na produção de biomassa para energia. Protásio *et al.* (2021) identificaram uma faixa de densidade entre 0,498 e 0,553 g/cm^3 para clones de *E. urophylla*, o que posiciona a *T. vulgaris* dentro de uma faixa competitiva para essa finalidade. Entretanto, a considerável variação observada na densidade básica de *T. vulgaris* pode ser atribuída à interação complexa de fatores edafoclimáticos, incluindo temperatura, precipitação e textura do solo, com o crescimento e formação da madeira (DE LIMA COSTA *et al.*, 2020). Contudo, ressalta-se que, a densidade básica da madeira é um dos principais parâmetros utilizados na classificação de espécies para a produção de carvão vegetal. Madeiras com maior densidade básica tendem a gerar carvões de maior densidade, conferindo ao produto características desejáveis, como maior densidade energética aspecto essencial para o uso industrial do carvão vegetal (PROTÁSIO *et al.*, 2022).

Em relação ao modelo ajustado, houve efeito significativo do modelo completo com p-valor $<0,0001$ resultando na seguinte equação: $\text{Densidade básica} = 0,0598 + 0,7554 * \text{densidade aparente}$, com RQME de 9,0% e MDA de 3,8%, indicando baixo erro médio de estimativa, e $r_{Y\hat{Y}}$ de 0,85, alta correlação entre as estimativas e os valores observados.

A Figura 1 (a e b) contrasta os valores observados sobrepostos pelas estimativas somente dos efeitos fixos (Figura 1.a) com os efeitos aleatórios (Figura 1.b)

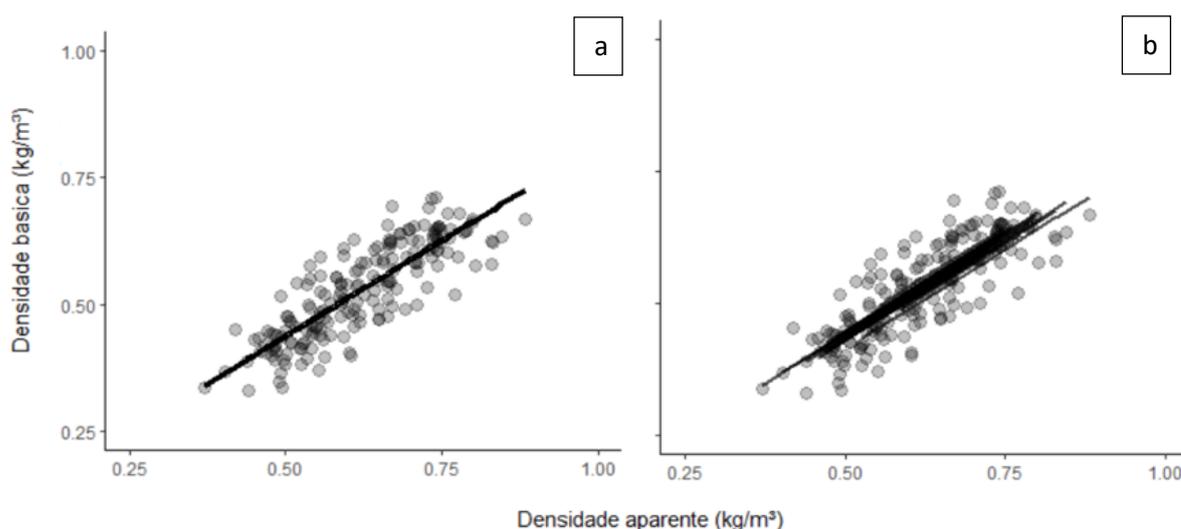


Figura 1. Estimativas do modelo sobre os valores observados. a) reta populacional, ou seja, apenas com o efeito fixo; b) retas específicas de cada árvore dentro de cada bloco para cada tipo de solo, ou com os modificadores específicos dos efeitos aleatórios.

A próxima etapa do projeto é avaliar se existe efeito do tipo de fuste (bifurcado e não bifurcado) e tipo de solo (arenoso e argiloso) na relação do modelo preditor da densidade básica em função da densidade aparente.

CONCLUSÕES

O modelo linear misto ajustado demonstra acurácia para estimar a densidade básica das árvores de *Tachigali vulgaris*, a partir da densidade aparente. Este resultado ressalta a viabilidade do uso de modelos mistos em estudos de densidade de madeira, especialmente para espécies de florestas tropicais.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT. **NBR 11941**: Madeira - Determinação da densidade básica. Rio de Janeiro, 2003.

DE LIMA COSTA, S. E. et al. Efeitos de ambientes contrastantes na densidade básica e incremento médio anual de madeira de clones de eucalipto. **Forest Ecology and Management**, v. 458, p. 117807, 2020.

MARQUES, J. D. et al. Densitometria de raios X aplicada à análise da madeira de *T. vulgaris* em plantações experimentais na Amazônia. **Série Técnica IPEF**, v. 26, n. 48, 2023.

MORESCHI, J.C.. **Apostila de propriedades da madeira**. Setor de Ciências agrárias UFPR, Departamento de Engenharia e Tecnologia Florestal. Disponível em: <<http://www.madeira.ufpr.br/disciplinasmoreschi/PROPRIEDADES%20DA%20MADEIRA.pdf>>. Acesso em: 09 de set de 2024.

TEIXEIRA, R. A. C. **Dinâmica de plantações experimentais de *Tachigali vulgaris* L. F. Gomes da Silva & H. C. Lima em resposta à adubação e textura de solo**. 2021. 79 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Universidade Federal Rural da Amazônia, Belém, 2021. Disponível em: <http://repositorio.ufra.edu.br/jspui/handle/123456789/1479>. Acesso em: 09 de set de 2024.

TOMAZELLO FILHO, M.; et al. **Application of X-ray technique in nondestructive evaluation of eucalypt wood**. Maderas: Ciencia y Tecnologia, Concepcion, v.10, n. 2, p.139-149, 2008. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-221X2008000200006>. Acesso em: 09 de set de 2024.

PROTÁSIO, T. de P. et al. Qualidade da madeira de *Tachigali vulgaris* visando à produção de carvão vegetal siderúrgico. In: WORKSHOP ONLINE FLORESTAS DE TACHIGALI VULGARIS, 1., 2021, Colombo. Anais. Colombo: Embrapa Florestas, 2022.