

MODELAGEM DA RELAÇÃO HIPSOMÉTRICA EM TESTES DE PROCEDÊNCIAS E PROGÊNIES DE *Tachigali vulgaris*

Tayllor Eduardo de Macêdo Silva¹, Roberta Barbosa Morais¹, Alvaro Augusto Vieira Soares¹, Thiago de Paula Protássio², Delman de Almeida Gonçalves³, Daniele Aparecida Alvarenga Arriel¹

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

²Universidade Federal Rural da Amazônia, Parauapebas, AM; ³Embrapa Amazônia Oriental, Belém, PA

RESUMO: *Tachigali vulgaris* (tachi-branco) é uma espécie nativa que vem ganhando espaço entre espécies potenciais da silvicultura. Pesquisas têm mostrado sua adequabilidade ao estabelecimento de plantios puros em especial para fins de energia da biomassa. Dentre a demanda de informação para o manejo desta espécie está a construção de modelos preditivos acurados, que estimem variáveis de difícil medição em função das de fácil medição. Neste estudo, avaliou-se um grupo de modelos estatísticos para a estimação da altura total (ht) das árvores em função de seu diâmetro a 1,30 m de altura (dap) em três testes de procedência e progênies de tachi-branco instalados nos estados do Pará e Amapá. Por volta dos 10 anos de idade, mediu-se a ht e o dap de todas as árvores. Na análise, 70% dos dados foram utilizados para o ajuste dos modelos e 30% para validação. As estatísticas de qualidade (EQ) utilizadas para avaliar e comparar a acurácia dos modelos tanto para a partição do ajuste quanto da validação foram: raiz quadrada do erro quadrático médio (RQEM), média das diferenças absolutas (MDA) e coeficiente de correlação de Pearson entre valores observados e estimados ($r_{Y\hat{Y}}$). Os modelos apresentaram valores de EQ similares a de espécies florestais silviculturais, como o eucalipto. Ao comparar as EQ do ajuste, o modelo de Gompertz apresentou-se como mais acurado, muito embora não tenha havida diferença marcante entre os demais. Tampouco houve grande diferença entre as EQ da validação sendo Chapman & Richards e Campos & Leite 1, ligeiramente mais acurados.

Palavras-chave: modelos preditivos, mensuração florestal, tachi-branco.

INTRODUÇÃO

O *Tachigali vulgaris* L. G. Silva & H. C. Lima (Fabaceae), popularmente conhecido como tachi-branco, é uma espécie que vem despertando interesse do setor florestal no estabelecimento de plantios homogêneos devido a aptidão de sua madeira para bioenergia, segmentos industriais de móveis, produção de lâminas e construção civil (ORELLANA *et al.*, 2018; TONINI *et al.*, 2018). Além desses usos, a espécie destaca-se em programas de recuperação de áreas degradadas e em sistemas agroflorestais (ORELLANA *et al.*, 2018).

Dado este eminente potencial, torna-se necessário construir modelos preditivos a serem utilizados na quantificação do estoque madeireiro. Estes modelos são utilizados para a



estimação de variáveis de difícil medição em função de variáveis de fácil medição. Um exemplo comum do uso de modelos é a estimação da altura total (ht) de árvores em função de seu diâmetro a 1,30 m do solo (dap), em especial para plantios florestais. Ao passo que as estimativas de altura serão utilizadas para o cálculo de outras variáveis como o volume das árvores, que será posteriormente utilizado no planejamento e na tomada de decisão da produção florestal, é fundamental que estas estimativas sejam as mais acuradas possíveis.

Logo, o objetivo deste trabalho foi avaliar um grupo de modelos estatísticos para a estimação da altura total (ht) das árvores em função de seu diâmetro a 1,30 m de altura (dap) em três testes de procedência e progênies de tachi-branco instalados nos estados do Pará e Amapá.

MATERIAL E MÉTODOS

Local, delineamento experimental e coleta de dados

O teste 1 foi instalado em maio de 2011, enquanto os testes 2 e 3 foram instalados em janeiro e fevereiro de 2012, respectivamente. O teste 1 possui espaçamento de 3,5 m x 2,6 m, está localizado na região do Vale do Jari, distrito de Monte Dourado, Almeirim, PA, e é composto por 60 tratamentos (progênies) oriundos de cinco diferentes procedências. O teste 2 está estabelecido sob espaçamento de 3,5 m x 2,0 m, também situado na região de Almeirim, PA, com 92 tratamentos provenientes de quatro diferentes procedências. Já o terceiro teste, está inserido na região do Amapá, no município de Vitória do Jari, e é constituído por 40 tratamentos de três diferentes procedências. Os três testes foram estabelecidos sob delineamento em blocos casualizados, com quatro blocos e seis plantas por parcela.

Após 10 anos do estabelecimento do plantio para o teste 1 e nove anos para os testes 2 e 3, mensurou-se a circunferência a 1,30 m do solo (cap), por meio de fita métrica, e a altura total (ht) em metros com auxílio de um clinômetro digital de todas as plantas dos experimentos. A cap foi posteriormente convertida em diâmetro (dap), dividindo-a pela constante π .

Análise de dados

Foram selecionados 15 modelos hipsométricos, comumente utilizados na literatura, para serem testados, a fim de escolher aquele(s) mais acurado(s) para descrever a relação ht/dap para condição estudada (Tabela 1). A base de dados utilizada na análise integrou os três testes e



totalizou 3.272 árvores. Na análise, 70% dos dados foram utilizados para o ajuste dos modelos e 30% para validação.

Tabela 1. Modelos testados para modelar a altura total (ht) de árvores em plantios homogêneos de *Tachigali vulgaris*

Tipo	Nome	Modelo
Lineares	Curtis	$Ln(ht) = \beta_0 + \beta_1 1/dap + \varepsilon$
	Stoffels	$Ln(ht) = \beta_0 + \beta_1 Ln(dap) + \varepsilon$
	Naslund	$ht = (dap^2 / (\beta_0 + \beta_1 dap)^2) + 1,30 + \varepsilon$
	Assmann	$ht = \beta_0 + \beta_1 1/dap^2 + \varepsilon$
	Henricksen	$ht = \beta_0 + \beta_1 Ln(dap) + \varepsilon$
	Prodan	$dap^2/ht = \beta_0 + \beta_1 dap + \beta_2 dap^2 + \varepsilon$
	Prodan Moderno	$dap^2/(ht - 1,3) = \beta_0 + \beta_1 dap + \beta_2 dap^2 + \varepsilon$
	Silva	$Ln(ht) = \beta_0 + \beta_1 Ln(dap) + \beta_2 (1/dap) + \varepsilon$
	Sanquetta	$ht = \beta_0 + \beta_1 1/dap + \beta_2 dap + \varepsilon$
	Hiperbolico	$dap/\sqrt{ht} = \beta_0 + \beta_1 dap + \varepsilon$
Não lineares	Gompertz	$ht = \beta_0 \exp[-\beta_1 e(-\beta_2 * dap)] + \varepsilon$
	Logístico	$ht = \beta_0 / 1 + e[(\beta_1 - dap) / \beta_2] + \varepsilon$
	Chapman & Richards	$ht = \beta_0 [1 - e(-\beta_1 * dap)]^{\beta_2} + \varepsilon$
	Campos & Leite 1	$ht = \beta_0 e^{\beta_1/dap} + \varepsilon$
	Campos & Leite 2	$ht = \beta_0 dap^{\beta_1} + \varepsilon$

Em que: ht = altura total, em cm; dap = diâmetro a 1,30 m do solo, em cm; β 's = parâmetros a serem estimados; Ln= logaritmo neperiano; e = função exponencial; ε = o erro aleatório.

As estatísticas de qualidade (EQ) utilizadas para avaliar e comparar 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 ($r_{Y\hat{Y}}$), calculadas conforme abaixo:

$$RQEM = 100 \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{n \bar{y}}} \quad MDA = \left(\frac{1}{n}\right) \sum_{i=1}^n |y_i - \hat{y}_i| \quad r_{Y\hat{Y}} = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})(\hat{y}_i - \bar{\hat{y}})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{\hat{y}})^2}}$$

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.

Na comparação de modelos, menores valores de RQEM e MDA indicam menores erros médios de estimativas, e maior $r_{Y\hat{Y}}$ indica maior correlação entre as estimativas e os valores mensurados.

RESULTADOS E DISCUSSÃO



De maneira geral, as estatísticas de qualidade dos modelos apresentaram valores próximos (Tabela 2). Enquanto para o ajuste as maiores distância entre *RQEM*, *MDA* e $r_{Y\hat{Y}}$ foram de 2,56%, 0,40% e 0,08%, respectivamente. Para a validação as distâncias foram ainda menores, indicando bom desempenho dos modelos apresentados com diferenças de 1,78%, 0,35% e 0,05% para *RQEM*, *MDA* e $r_{Y\hat{Y}}$, respectivamente.

Tabela 2. Estatísticas de qualidade de ajuste para modelos hipsométricos locais avaliados para dados de três testes de plantios homogêneos de tachi-branco (*Tachigali vulgaris*)

Tipo	Modelos locais	RQEM (%) Ajuste	RQEM (%) Validação	MDA Ajuste	MDA Validação	$r_{Y\hat{Y}}$ Ajuste	$r_{Y\hat{Y}}$ Validação
Linear	Curtis	12,66	12,77	2,01	2,06	0,84	0,82
	Stoffels	13,48	13,63	2,10	2,14	0,82	0,80
	Naslund	12,82	12,86	2,05	2,08	0,84	0,82
	Assmann	15,18	14,54	2,38	2,38	0,76	0,77
	Hericksen	12,75	12,92	2,00	2,05	0,84	0,82
	Prodan	12,76	12,82	2,04	2,07	0,84	0,82
	Prodan Moderno	12,77	12,84	2,04	2,08	0,84	0,82
	Silva	12,67	12,79	2,00	2,05	0,84	0,82
	Sanquetta	12,74	12,84	2,01	2,05	0,84	0,82
	Hiperbólico	12,74	12,87	2,02	2,07	0,84	0,82
	Não Linear	Gompertz	12,62	12,79	1,99	2,03	0,84
Logístico		12,66	12,83	1,99	2,04	0,84	0,82
Chapman & Richards		12,63	12,76	1,99	2,03	0,84	0,82
Campos & Leite 1		12,63	12,76	1,99	2,03	0,84	0,82
Campos & Leite 2		13,25	13,39	2,09	2,14	0,82	0,80

RQEM (%) = raiz quadrada do erro médio percentual; MDA = média das diferenças absolutas; $r_{Y\hat{Y}}$ = coeficiente de correlação de Pearson entre os valores observados e estimados de altura total.

Ao comparar as EQ do ajuste, o modelo de Gompertz foi sutilmente o modelo mais acurado, com os menores valores de *RQEM*, dentro dos menores de *MDA* e com os maiores valores de $r_{Y\hat{Y}}$. No entanto, a validação é uma das etapas determinantes para escolha do modelo, uma vez que a base de dados é externa ao ajuste. Assim, nesta etapa os modelos Chapman & Richards e Campos & Leite 1 foram ligeiramente mais acurados, com resultados equivalentes de *RQEM*, *MDA* e $r_{Y\hat{Y}}$ (Tabela 2). Em contrapartida, os modelos de Assman, Stoffels e Campos & Leite 2 apresentaram desempenho inferior aos demais, tanto no ajuste quanto na validação, com valores superiores de *RQEM* e *MDA*, e inferiores quanto ao $r_{Y\hat{Y}}$. Além disso, pôde-se



identificar que os modelos de Assmann, Hericksen e Sanquetta, apesar de acurados, geram estimativas negativas de altura para valores baixos de dap. Trabalhos já relataram esta questão, como, por exemplo, Curtis (1967) e Batista, Couto e Marquesini (2001).

Por fim, todos estes modelos se mostraram adequados para estimativas de ht, uma vez que não houve grandes diferenças entre suas EQ. Cuidado deve ser tomado ao se utilizar os modelos de Assmann, Hericksen e Sanquetta, pela possibilidade de estimarem alturas negativas. Em concordância, todas as estatísticas presentes nesse estudo, obtiveram desempenho próximos aos estudos realizados por Sousa (2021), ajustando modelos lineares para espécie de eucalipto. Além disso, os valores das estatísticas MDA e $r_{Y\hat{Y}}$ também estão em conformidade com outros trabalhos semelhantes para *T. vulgaris* (KOURY SOBRINHO, 2019).

CONCLUSÃO

Os modelos hipsométricos testados foram acurados para estimar a altura total das árvores de *T. vulgaris*. A próxima etapa do projeto é avaliar se existe efeito de procedência e progênie na relação entre a ht e o dap das árvores.

REFERÊNCIAS

CURTIS, R. O. Height-diameter and height-diameter-age equations for second-growth Douglas-fir. **Forest science**, v. 13, n. 4, p. 365-375, 1967.

BATISTA, J. L. F.; COUTO, H. T. Z. do; MARQUESINI, Marcelo. Desempenho de modelos de relações hipsométricas: estudo em três tipos de floresta. **Scientia Forestalis**, n. 60, p. 149-163, 2001.

KOURY SOBRINHO, R. M. Caracterização dendrométrica e estimação da altura total de Tachi Branco (*Tachigali vulgaris*) em um plantio no Pará, um estado da Amazônia brasileira. 2019. 35 f. Trabalho de conclusão de curso (Bacharel em Engenharia Florestal), Universidade Federal Rural da Amazônia, Parauapebas, 2019.

ORELLANA, B. B. M. *et al.* Produtividade energética da madeira de *Tachigali vulgaris* por classe diamétrica em plantios experimentais na Amazônia. **Nativa**, v. 6, p. 773-781, 2018.

TONINI, H. *et al.* Crescimento e qualidade energética da madeira de *Tachigali vulgaris* sob diferentes espaçamentos. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 38, e201801569, p. 1-8, 2018.

SOUSA, M. V. C. *et al.* Modelagem hipsométrica utilizando regressão simbólica e variável ambiental. 2021. 72 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Instituto de Ciências Agrárias, Universidade Federal de Minas Gerais, Montes Claros, 2021.