

PREDIÇÃO DA PRODUÇÃO TOTAL EM POVOAMENTOS DE *Pinus taeda* L. POR DIFERENTES CATEGORIAS DE MODELOS

PREDICTING TOTAL PRODUCTION OF *Pinus taeda* L. STANDS BY DISTINCT MODEL CATEGORIES

Ricardo Cavalheiro¹, Sebastião do A. Machado², Afonso Figueiredo Filho³, Allan Libanio Pelissari⁴, Gabriel Orso⁵

^{1, 2, 4, 5}Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR, Brasil – ricardocavalheiro1@gmail.com, profsamachado@gmail.com, allanpelissari@gmail.com, gabrielorso16@gmail.com

³Universidade Estadual do Centro-Oeste, Irati, PR, Brasil – afigfilho@gmail.com

RESUMO

O intuito desse estudo foi modelar o crescimento e a produção de plantios de *Pinus taeda* L. com modelos globais, de distribuição diamétrica e de árvores individuais. Os dados utilizados foram provenientes das medições de 345 parcelas permanentes localizadas no estado de Santa Catarina. Para avaliar a projeção da produção em volume pelos diferentes métodos estudados, 89 parcelas foram selecionadas para compor o conjunto de dados para validação. Aplicou-se o teste estatístico de Wilcoxon para avaliar igualdade estatística dos volumes estimados e observados. As estatísticas de viés e acurácia também foram utilizadas para avaliar as projeções dos volumes totais. Para obtenção dos parâmetros futuros da fdp de Weibull, foram utilizados os métodos dos percentis. Dentre todas as categorias testadas, o modelo global de Clutter (1963) é o mais preciso e acurado para a prognose da produção total com viés médio de $-9,80 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ e acurácia média de $33,60 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$. A modelagem de distribuição diamétrica também apresenta bons resultados. O sistema de árvores individuais não apresenta estimativas precisas e acuradas. O resultado do teste estatístico de Wilcoxon mostra que existe diferença estatística entre os valores observados e estimados entre todos os métodos.

PALAVRAS-CHAVE: Sistema de predição do crescimento, Fdp de Weibull, Manejo florestal.

ABSTRACT

The aim of this research was to model the growth and yield of *Pinus taeda* L. plantations with global models, in diameter classes and individual trees. The data used came from remeasurements of 345 permanent plots located in the State of Santa Catarina. To evaluate the projection of volume yield by the different studied methods, 104 plots were selected to compose the validation data set. For the modeling of the total population, four different models were tested, in which the bias, accuracy and adjustment index statistics were used to evaluate the projections of the total volumes in the validation plots. To obtain the future parameters of Weibull's PDF, the methods of percentiles were used. The results of the mortality probability adjustment were $R^2_{adj} = 0.623$ and $SYX\% = 41.9$. The models of estimates of diameter and total height presented, respectively, $R^2_{adj} = 0.987$, $R^2_{adj} = 0.963$ and $SYX\% = 2.22$, $SYX\% = 4.04$. The methods evaluated for assortment estimation showed unprecise and inaccurate results. Among all the tested methods, the global model from Clutter (1963) was the most precise and accurate for the projection of the total volume with an average bias of $-9.8 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ and an average accuracy of $33.6 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$. The modeling in diameter classes also showed good results. The system of individual trees built does not present precise and accurate projections. The Wilcoxon statistical test was used to assess whether the estimated volumes are statistically equal when compared to the observed volumes.

KEYWORDS: Growth projection system, Forest Management, Weibull PDF.

INTRODUÇÃO

A disputa acirrada por aquisição de terras e a dependência de compra de madeira do mercado podem comprometer a viabilidade do negócio quando existe por exemplo a demanda do abastecimento ou expansão de uma fábrica. Entender a capacidade de oferta própria de madeira é vital para que a empresa direcione suas estratégias de forma mais sólida.

Para se obter produção e produtividade de um plantio florestal utilizam-se modelos estatísticos os quais podem ser divididos em modelos globais, de distribuição diamétrica e árvores individuais (BURKHART & TOMÉ, 2012).

A primeira classe de modelos é a que tem seu uso mais difundido no Brasil já que nessa categoria a predição da produção total é obtida de forma mais simples quando comparada as outras categorias (MIRANDA, 2016). Quando levamos em conta empresas que tem como missão fornecer somente um tipo de sortimento com um único manejo, modelos globais fornecem o detalhe requerido para que as diretrizes da empresa sejam definidas (BURKHART & TOMÉ, 2012). Estudos sobre modelos globais foram desenvolvidos por Romaniuk (2015), Nascimento et al. (2015), Miranda et al. (2015), Pereira et al. (2016) e tem seu uso difundido em empresas no país.

Quando há a necessidade da prognose da produção de toras, utilizam-se classes de modelos que ofereçam maiores níveis de detalhes do plantio florestal. A modelagem de distribuição diamétrica permite essa flexibilidade, já que os volumes da predição são apresentados em classes diamétricas e por sortimentos. Estudos da aplicação dessa classe de modelos foram desenvolvidos por pesquisadores de universidades distribuídas por todo país (SCOLFORO, 1990; EISFELD, 2005; SANTANA, 2008; FERRAZ FILHO, 2009; LEITE et al., 2013; RETSLAFF, 2014; AZEVEDO et al., 2016; VIANA, 2016), mas tem seu uso difundido em poucas empresas florestais.

Os modelos de árvores individuais propiciam um maior detalhamento, pois a predição do crescimento é realizada para cada árvore. No entanto tem seu uso limitado em empresas devido a sua complexidade no ajuste das equações do sistema, e necessita de um número significativo de medições e remedições. Estudos relacionados a essa modelagem foram desenvolvidos por Castro et al. (2013a) e Castro et al. (2013b), e.g. Miranda (2016); Penido et al. (2020), Miranda et al. (2022), Téó (2022). O uso ainda limitado dessa categoria trás inúmeras oportunidades de pesquisa de modo difundir seu uso mais

amplo em empresas florestais.

Considerando as oportunidades existentes no desenvolvimento de estudos no meio científico e a demanda de empresas para obtenção de volumes futuros confiáveis, torna-se essencial pesquisas que testem diferentes categorias de modelagem que sejam capazes de prever a produção total precisa e acurada.

Assim, o objetivo desse estudo foi comparar as projeções da produção total em plantios de *Pinus taeda* projetadas pela modelagem global, modelagem por distribuição diamétrica e com modelo de árvores individuais independentes da distância.

MATERIAIS E MÉTODOS

Área de estudo e fonte de dados

O conjunto de dados utilizados nesse estudo foi cedido por uma companhia alocada no estado de Santa Catarina. A pesquisa foi baseada em informações de 345 parcelas permanentes instaladas em povoamentos de *Pinus taeda* não desbastados, com área de 0,04 ha por parcela. O período de medição ocorreu durante 24 anos e o intervalo de idade foi de 5 a 22 anos. O número de parcelas utilizadas nessa pesquisa foi de 2.641, somando 152.378 árvores com todos os diâmetros a altura do peito (DAP) e alturas totais (h) medidas. Os plantios mais antigos foram implantados em 1978 e os mais recentes em 1996. Houve remedição de 7,6 vezes para cada parcela, sendo que o mínimo de remedições de uma parcela foi quatro e o máximo foi 12. Quanto ao volume, houve parcelas com 43,20 m³ ha⁻¹ até 1.059 m³ ha⁻¹.

Das 345 parcelas 89 foram sorteadas para o conjunto de dados de validação, essas não fizeram parte da etapa de ajuste dos modelos.

Os volumes totais foram obtidos pela aplicação equação volumétrica de Schumacher & Hall ajustados à partir da cubagem de 360 árvores escolhidas para representar a variabilidade das parcelas. Essa equação apresentou um R²adj de 0,988 e S_{y,x%} de 8,1% (Equação 1).

$$\ln(v) = -10,031486 + 1,985510\ln(DAP) + 0,938045\ln(h) \quad (1)$$

Onde: v = volume (m³); DAP = diâmetro à 1,30 do solo (cm); h = altura total (m).

Estimativa da Altura Dominante

O modelo Chapman & Richards (Equação 2) foi escolhido para estimar-se a altura dominante em função

da idade.

$$h_{dom} = \beta_0 [1 - e^{(-\beta_1 I)}] [(1 - \beta_2)^{-1}] \quad (2)$$

Onde: h_{dom} = altura dominante (m); I = idade (anos).

Modelagem Global (MGL)

Foi escolhido o modelo de Clutter (1963) para a projeção da produção pela modelagem global (Equação 3 e 4);

$$\begin{aligned} \ln(G_2) = \ln(G_1) \left(\frac{I_1}{I_2}\right) + \alpha_4 \left(1 - \frac{1}{I_2}\right) \\ + \alpha_5 \left(1 - \frac{1}{I_2}\right) S + \varepsilon \end{aligned} \quad (3)$$

$$\ln(V_2) = \beta_0 + \beta_1 S + \beta_2 \left(\frac{1}{I_2}\right) + \beta_3 \ln(G_2) + \varepsilon \quad (4)$$

Onde: V_2 = volume futuro ($m^3 \text{ ha}^{-1}$); G_2 = área basal estimada na idade de futura ($m^2 \text{ ha}^{-1}$); G_1 = área basal na idade corrente ($m^2 \text{ ha}^{-1}$); I_2 = idade futura (anos); I_1 = idade inicial (anos); S = classe de sítio (m); \ln = logaritmo neperiano; α_i , e β_i = coeficientes ajustados.

Sistema de Equações para Modelagem em Classes de Diâmetros (MCD)

A Tabela 1 mostra as equações ajustadas previamente para realizar a prognose da produção total a partir da estrutura diamétrica, tais como: área basal e consequente dg; sobrevivência nas várias idades; e relação hipsométrica genérica.

Para realização da prognose da distribuição diamétrica, foi utilizada a FDP de Weibull com três parâmetros, a qual foi ajustada pelos atributos do povoamento. Para a recuperação dos parâmetros da FDP de Weibull foi adotada a metodologia proposta por Bailey et al. (1989), a qual utiliza os diâmetros percentis da posição 0, 25, 50 e 95 (Equações 5, 6, 7 e 8):

$$D_0 = e^{(\beta_1 + \beta_2 \ln(\frac{G}{N}) + \beta_3 \ln(N) + \beta_4 \ln(h_{dom}))} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} D_{25} \\ = D_{50} * e^{(\beta_1 \ln(\frac{G}{N}) + \beta_2 I + \beta_3 S + \beta_4 (\frac{1}{I}) + \beta_5 \ln(N) + \beta_6 h_{dom})} \end{aligned} \quad (6)$$

$$D_{50} = e^{(\beta_1 + \beta_2 \ln(\frac{G}{N}) + \beta_3 I + \beta_4 h_{dom} + \beta_5 (\frac{1}{N}))} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} D_{95} \\ = D_{50} \\ * e^{(\beta_1 \ln(\frac{G}{N}) + \beta_2 I + \beta_3 \ln(N) + \beta_4 (\frac{1}{I}) + \beta_5 S + \beta_6 \ln(h_{dom}))} \end{aligned} \quad (8)$$

Onde: D_i = diâmetro estimado na posição percentil 0, 25, 50 e 95 (cm); G = área basal estimada ($m^2 \text{ ha}^{-1}$); I = idade (anos); S = classe de sítio (m); N = total de árvores (árv ha^{-1}); h_{dom} = altura dominante (m); β_i = coeficientes ajustados.

Tabela 1. Modelos selecionados para compor o sistema de projeção dos atributos

Atributo/ Autor	Equação*	R ² _{adj} / R ² _{yy}	S _{yx}	S _{yx%}
Sobrevivência (árv ha ⁻¹) Clutter & Jones (1980)	$\begin{aligned} N_2 \\ = \left\{ N_1^{-1,236244} \right. \\ + 0,005064 \left[\left(\frac{I_2}{100}\right)^{3,101527} \right. \\ \left. \left. - \left(\frac{I_1}{100}\right)^{3,101527} \right]^{-1,236244} \right\} \end{aligned}$	0,9757	30,80	2,10
Área basal (m ² ha ⁻¹) Scolforo (1990)	$\begin{aligned} G_2 \\ = 1,005822 G_1 \left(\frac{I_1}{I_2}\right) \\ + 6,549886 \left(1 - \frac{I_1}{I_2}\right) \ln(N_2) \\ + 31,251503 \left(1 - \frac{I_1}{I_2}\right) \ln(h_{dom2}) \\ - 20,5911 \left(1 - \frac{I_1}{I_2}\right) \ln(I_2) \end{aligned}$	0,9793	1,21	1,90
Diâmetro mínimo (cm) Santana (2008)	$\begin{aligned} D_{min2} \\ = -9,467025 + 1,229119 \bar{d}_2 \\ + 0,101264 h_{dom2} \\ - 0,157676 s^2 d_2 \\ + 0,835325 \ln(G_2) \\ - 0,359224 (dg_2) \end{aligned}$	0,7163	1,49	11,40
Variância dos diâmetros Santana (2008)	$\begin{aligned} s^2 d_2 \\ = 1,052168 s^2 d_1 \\ + 0,01369 dg_1 - 0,436968 G_1 \\ + 0,418467 G_2 \end{aligned}$	0,9700	1,62	7,80
Relação hipsométrica genérica (m) Scolforo (1990)	$\begin{aligned} \ln(h) \\ = 0,256236 \\ + 0,938385 \ln(h_{dom}) \\ - 0,127557 \ln\left(\frac{d_g}{d_i}\right) \\ + 1,540633 \left[\frac{1}{(I \cdot d_i)}\right] \\ - 3,328513 \left(\frac{1}{d_i}\right) \end{aligned}$	0,9531	0,99	5,30

Onde: N_2 = total de árvores na idade futura (árv ha^{-1}); N_1 = total de árvores na idade corrente (árv ha^{-1}); I_2 = idade futura (anos); I_1 = idade inicial (anos); G_2 = área basal estimada na idade futura ($m^2 \text{ ha}^{-1}$); G_1 = área basal na idade corrente ($m^2 \text{ ha}^{-1}$); S = classe de sítio; h_{dom} = altura dominante na idade corrente (m); h_{dom2} = altura dominante na idade futura (m); D_{min2} = diâmetro mínimo estimado na idade futura (cm); $s^2 d_2$ = variância dos

diâmetros na idade futura; $\overline{d_2}$ = média do d na idade futura (cm); dg_2 = diâmetro médio quadrático na idade futura; $s^2 d_1$ = variância dos diâmetros na idade corrente (cm^2); h = altura total estimada (m); d_i = diâmetro do centro da classe (cm) e β_i = coeficientes ajustados.

Os parâmetros foram recuperados pelas seguintes equações: Parâmetro de localização (a) (Equação 9), parâmetro de forma (c) (Equação 10), parâmetro de escala (b) (Equação 11):

$$a = \frac{n^{0,3333} D_0 - D_{50}}{n^{0,3333} - 1} \quad (9)$$

$$c = \frac{2,343088}{\ln(D_{95} - a) - \ln(D_{25} - a)} \quad (10)$$

$$b = -\frac{a\Gamma_1}{\Gamma_2} + \sqrt{\left(\frac{a}{\Gamma_2}\right)^2 (\Gamma_1^2 - \Gamma_2) + \frac{dg^2}{\Gamma_2}} \quad (11)$$

Onde: dg = diâmetro médio quadrático (cm); D_i = diâmetro estimado na posição percentil 0, 25, 50 e 95 (cm); Γ = função gama; a = parâmetro de locação; b = parâmetro de escala; c = parâmetro de forma.

Para o cálculo da produção total foram calculados os atributos do povoamento e realizadas as recuperações dos parâmetros da FDP de Weibull. O volume para cada classe de diâmetro foi obtido por meio da aplicação da Equação 1 tendo como entrada a classe de diâmetro e altura média de cada classe. As produções totais por unidade de área foram obtidas pela multiplicação desse volume pela frequência de árvores em cada classe.

Sistema de Equações para Modelagem de Árvores Individuais (MAI)

Para prognose da produção da MAI foram utilizados os modelos ajustados no estudo de Cavalheiro (2021) conforme as formulações (21, 22);

$$Pm = 0,1401 + \left(1 + e^{\beta_0 + 4,4343IC + 10,8687CC_d - 0,2909h_m - 0,2059I - 0,2139G_c}\right)^{-1} \quad (21)$$

$$Y_2 = Y_1 + e^{\left(-2,5090 + \frac{18,9026}{I_2} - 1,0818RS_1 - 0,0205G_1 + 0,0841Y_1\right)} \quad (22)$$

$$Y_2 = Y_1 + e^{\left(-1,1329 + \frac{17,2365}{I_2} - 3,3936RS_1 + 0,0052G_1 + 0,0139Y_1\right)}$$

Onde: Pm = probabilidade de mortalidade; IC = índice de competição; CC_d = centro da classe de d (cm); h_m = altura total média da classe de d (m); I = idade da parcela (anos); G_c = área basal da classe de d ($m^2 ha^{-1}.classe$); S = classe de sítio (m); Y_2 e Y_1 = variável estimada (h e d) na idade corrente e futura; I_2 = idade de futura (anos); $RS = [(10.000/N)^{0,5}/h_{dom}]$; G_1 = área basal ($m^2 ha^{-1}$) na idade corrente; e β_i = coeficientes ajustados. * Todos os coeficientes foram significativos.

Estatísticas dos ajustes de regressão

Os modelos ajustados foram avaliados pelo coeficiente de determinação ajustado para modelos lineares (R^2_{adj}), coeficiente de correlação ao quadrado para modelos não lineares (R_{yy}^2), erro padrão da estimativa ($S_{y,x\%}$) e análise da dispersão de resíduos. O nível de significância α adotado foi de 5%, assim como para a significância dos coeficientes (p -valor $\leq 0,05$).

Crerios Estatísticos para Avaliao da Produo Total

Com o intuito de avaliar a predio do volume total, projetou-se os valores da primeira mediao das 89 parcelas de validao para a idade de 14 anos.

Aplicou-se o teste estatístico não paramétrico de Wilcoxon para dados pareados. Testou-se a seguinte hipótese ao nível de 5% de significância:

$$H_0: Vol_{obs} = Vol_{est}$$

$$H_1: Vol_{obs} \neq Vol_{est}$$

Onde: H_0 : A mediana dos volumes observados é igual a mediana dos volumes estimados; Vol_{obs} : Volumes observados; Vol_{est} : Volumes estimados; H_1 : Hipótese alternativa.

As estatísticas adotadas para analisar a tendenciosidade das projeções da produção total foram a análise de viés e acurácia. Essas estatísticas foram calculadas pelas seguintes equações (Equação 12 e 13):

$$Viés = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i) \quad (12)$$

$$Acurácia = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i - \hat{y}_i| \quad (13)$$

Onde: $Viés$ = tendenciosidade; $Acurácia$ = mede em termos absolutos a proximidade de cada observao ao

valor-alvo que se procura atingir; y_i = volume total observado; \hat{y}_i = volume total estimado; \bar{y} = volume médio; n = total de observações.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

As estatísticas do ajuste de regressão do modelo de estimativa da altura dominante foram $R_{y\hat{y}}^2 = 0,8760$; $S_{yx\%} = 8,20\%$ e $S_{yx} = 1,67$ m. Os coeficientes da equação ajustada são apresentados na expressão (14)

$$h_{dom} = 42,248209[1 - e^{(-0,059259I)}] [(1-0,100157)^{-1}] \quad (14)$$

Onde: h_{dom} = altura dominante (m); I = idade do plantio em anos.

Construiu-se as curvas de sítio com amplitude de 3,50 m divididas em quatro classes de sítio e adotou-se como idade de referência 17 anos.

Na etapa de modelagem global os modelos ajustados de projeção da área basal e volume total apresentaram estatísticas adequadas com respectivos $R^2_{adj} = 0,9799$ e $R^2_{adj} = 0,9797$, e $S_{yx\%} = 2,09$ e $S_{yx\%} = 4,46$. A expressão (15, 16) apresenta os coeficientes da equação ajustada.

$$\begin{aligned} Ln(G_2) = & Ln(G_1) \left(\frac{I_1}{I_2}\right) + 5,1123628 \left(1 - \frac{1}{I_2}\right) \\ & + -0,0125286 \left(1 - \frac{1}{I_2}\right) S + \varepsilon \end{aligned} \quad (15)$$

$$\begin{aligned} Ln(V_2) = & 1,321295 + 0,027578S - 7,96757 \left(\frac{1}{I_2}\right) \\ & + 1,181386 Ln(G_2) + \varepsilon \end{aligned} \quad (16)$$

Onde: V_2 = volume futuro ($m^3 \cdot ha^{-1}$); G_2 = área basal estimada na idade futura ($m^2 \cdot ha^{-1}$); G_1 = área basal na idade corrente ($m^2 \cdot ha^{-1}$); I_2 = idade futura (anos); I_1 = idade inicial (anos); S = classe de sítio (m); Ln = logaritmo neperiano.

A Figura 1 apresenta a análise dos resíduos dos modelos de Clutter (1963) ajustados para a estimativa da área basal volume. Observou-se uma dispersão de resíduos homogênea, com erros na grande maioria menores que 10%. Para o volume total observou-se tendenciosidade de superestimativa dos volumes nas idades abaixo de 10 anos e após 18 anos, no entanto, os erros não passaram de 20%.

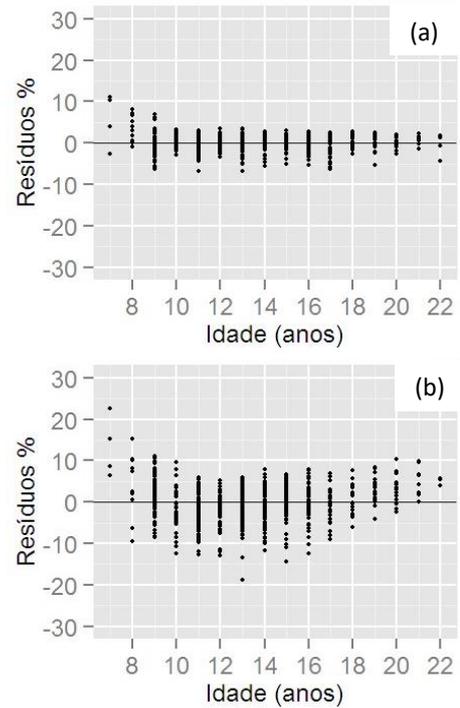


Figura 1. Dispersão dos resíduos dos modelos globais ajustados para estimativa da área basal (a) e volume total (b).

Nos ajustes das equações de diâmetros percentil a equação da posição 0 apresentou os piores resultados, com $R^2_{adj} = 0,524$, $S_{yx\%} = 16,90$ e $S_{yx} = 2,18$ cm. A melhor estimativa do diâmetro percentil foi o da posição 50, com $R^2_{adj} = 0,974$, $S_{yx\%} = 2,31$ e $S_{yx} = 0,47$ cm. As formulações (17, 18, 19, 20) apresentam os coeficientes do ajuste.

$$\begin{aligned} D_0 &= e^{(2,96604 + 0,87103 \ln(\frac{G}{N}) + 0,34708 \ln(N) - 0,05825 \ln(h_{dom}))} \end{aligned} \quad (17)$$

$$\begin{aligned} D_{25} &= D_{50} \\ & \left(0,063883 \ln(\frac{G}{N}) + -0,007336I - 0,000307S + 0,752506 \left(\frac{1}{I}\right) + \right. \\ & \left. * e^{0,001938 \ln(N) + 0,004109 h_{dom}} \right) \end{aligned} \quad (18)$$

$$\begin{aligned} D_{50} = e & \left(4,773559 + 0,510875 \ln(\frac{G}{N}) - 0,003227I + 0,000601 h_{dom} \right. \\ & \left. + 5,634980 \left(\frac{1}{N}\right) \right) \end{aligned} \quad (19)$$

$$\begin{aligned} D_{95} &= D_{50} \\ & \left(-0,13952 \ln(\frac{G}{N}) + 0,004954I - 0,054135 \ln(N) - 0,522749 \left(\frac{1}{I}\right) \right. \\ & \left. * e^{-0,004793S + 0,100364 \ln(h_{dom})} \right) \end{aligned} \quad (20)$$

Onde: D_i = diâmetro estimado na posição percentil 0, 25, 50 e 95 (cm); G = área basal estimada ($m^2 \cdot ha^{-1}$); I = idade (anos); S = classe de sítio (m); N = total de árvores (árvores ha^{-1}); h_{dom} = altura média das árvores dominantes (m); β_i = coeficientes ajustados.

Os ajustes para a estimativa dos diâmetros percentis na posição 25, 50 e 95 apresentaram resíduos bem distribuídos ao longo das idades, conforme pode ser observado na Figura 2. Já a equação de estimativa do D_0 subestimou valores estimados. Com isso o modelo de D_0 foi substituído pelo equação ajustada de D_{min} de Santana (2008) apresentada anteriormente.

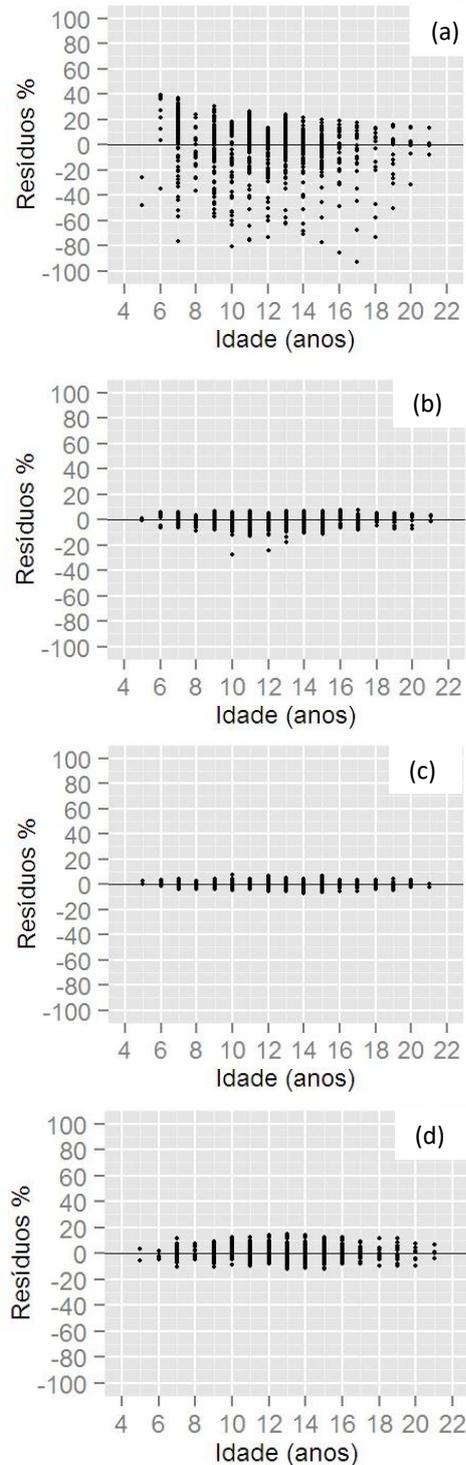


Figura 2. Dispersão dos resíduos dos modelos de estimativa dos diâmetros percentis na posição (a) 0; (b) 25; (c) 50; (d) 95.

Tabela 2. Resultados do teste estatístico de Wilcoxon para estimativa da produção total.

Métodos	N	Mediana ($m^3 ha^{-1}$)		Wilcoxon	p-valor
		Obs.	Estimado		
MGL	89	659,0	672,0	4005	0,000
MCD	89	659,0	663,8	4005	0,000
MAI	89	659,0	794,7	4005	0,000

A Tabela 3 apresenta as estatísticas da projeção do atributo volume total. A MGL apresentou um viés médio de $33,4 m^3 ha^{-1}$ (-5,7%). O melhor resultado foi apresentado pela MCD com viés médio de $29,2 m^3 ha^{-1}$, equivalendo a 3,70% para o conjunto de dados. A estimativas da MAI foram menos precisas com viés médio de $-130,7 m^3 ha^{-1}$, equivalendo a -19,7%.

Já na acurácia, o melhor desempenho também foi produzido pela MCD onde os volumes estimados diferiram em média $47,9 m^3 ha^{-1}$ (7,4%) dos volumes reais. As projeções menos acuradas foram geradas pelo modelo de árvores individuais, com os volumes estimados diferindo em média $130,7 m^3 ha^{-1}$ (19,1%) dos reais.

Tabela 3. Estatísticas da projeção do volume.

Critério Estatístico	Método	Total
Viés ($m^3 ha^{-1}$)	MGL	-33,4
	MCD	29,2
	MAI	-130,7
Viés %	MGL	-5,7
	MCD	3,7
	MAI	-19,7
Acurácia ($m^3 ha^{-1}$)	MGL	39,4
	MCD	47,9
	MAI	130,7
Acurácia %	MGL	7,0
	MCD	7,4
	MAI	19,1

Para a estimativa da produção futura em volume, Ferraz Filho (2009) encontrou um viés médio de $-0,18 m^3 ha^{-1}$, equivalente a -0,60%, e acurácia de $5,06 m^3 ha^{-1}$, correspondente a 12,60%. Eisfeld (2005) obteve um erro médio de $15,50 m^3 ha^{-1}$, isto é, 3,40%. Para as idades acima de 18 anos, essa autora obteve erro médio de $11,10 m^3 ha^{-1}$, equivalendo a 2,40%.

A Figura 4 apresenta os volumes estimados em função dos volumes observados. Nota-se uma tendenciosidade de superestimativa para os resultados advindos da MAI ao

longo de toda distribuição de volumes observados. Já a MCD apresentou tendenciosidade de subestimativa nos volumes acima de 300,00 m³ ha⁻¹. O método de MGL apresentou as melhores estimativas distribuídas sem tendência ao longo dos volumes observados.

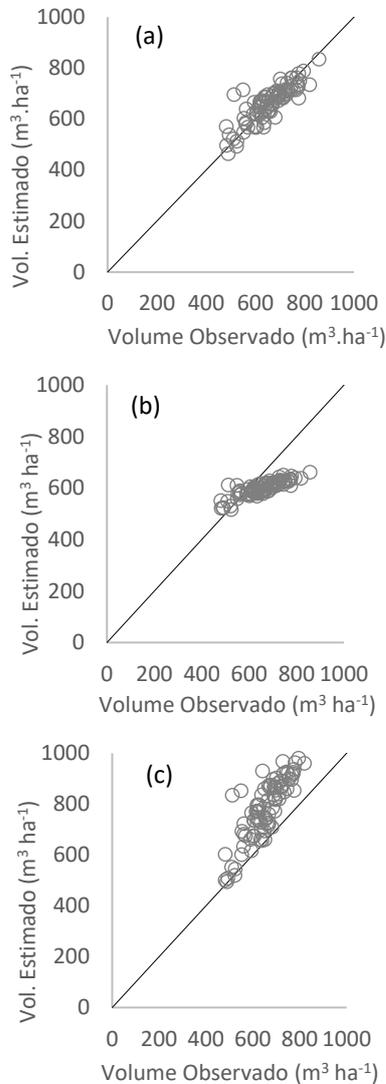


Figura 4. Volumes preditos em função dos volumes observados sendo a MGL (a), MCD (b) e MAI (c).

CONCLUSÕES

A modelagem ao nível de árvore individual não apresenta estimativas da produção precisas e acuradas, mesmo tendo resultados estatísticos satisfatórios nos modelos de projeção, exceto no modelo de probabilidade da mortalidade.

Considerando os métodos testados as projeções da produção total diferem estatisticamente da produção observada.

Dentre os métodos testados nesta pesquisa, a MGL e

MCD geram maior precisão e acurácia para a projeção da produção em volume nos povoamentos de *Pinus taeda*.

REFERÊNCIAS

- AZEVEDO, G.B. et al. Modelagem da produção em nível de povoamento e por distribuição diamétrica em plantios de eucalipto. *Scientia Forestalis*, v.44, N.110, p.383-392, 2016.
- BAILEY, R.L. et al. Fertilized mid-rotation-aged slash pine plantations-stand structure and yield prediction models. *Southern Journal of Applied Forestry*, v.13, p.76-80, 1989.
- BURKHART, E.H.; TOMÉ, M. **Modeling Forest Trees and Stands**. New York: Springer, 2012. 460p.
- CASTRO, R. V. O.; SOARES, C. P. B.; LEITE, H. G.; SOUZA, A. L. de; NOGUEIRA, G. S.; MARTINS, F. B. Individual growth model for *Eucalyptus* stands in Brazil using Artificial Neural Network. *Forestry*, v. 2013, ID do artigo 196832, 12 p., 2013a.
- CASTRO, R. V. O.; SOARES, C. P. B.; MARTINS, F. B.; LEITE, H. G. Crescimento e produção de plantios comerciais de eucalipto estimados por duas categorias de modelos. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v. 48, n. 3, p. 287-295, 2013b.
- CAVALHEIRO, R.; MACHADO, S. A.; FIGUEIREDO, A. F.; PELISSARI, A. L. Predição da produção de multiprodutos em nível de árvore individual de *Pinus taeda* L. *BIOFIX Scientific Journal*, v.6, N.2, p.112-119, 2021.
- CLUTTER, J.L. Compatible growth and yield models for loblolly pine. *Forest Science*, v.9, n.3, p.354-371, 1963.
- CLUTTER, J.L.; JONES, E.P. Prediction of growth after thinning in old-field slash pine plantations. *Forest Service, Southeastern Forest Experiment Station*, 1980.
- EISFELD, R.L. **Modelagem do crescimento e da produção de *Pinus taeda* L. por meio de função probabilística e processo de difusão**. 2005. 79f. (Dissertação de mestrado).
- FERRAZ FILHO, A.C. **Sistema de prognose do crescimento e produção para *Pinus taeda* L. sujeito a regime de desbastes e podas**. 2009. 147f. (Dissertação de mestrado).
- LEITE, H.G. et al. Comparação entre predição e projeção da distribuição de diâmetros de povoamentos de Eucalipto submetidos a desbastes. *Revista Árvore*, v.37, n.2, p.321-328, 2013.
- MIRANDA, R.O.V. **Modelagem de árvores individuais para povoamentos não desbastados de *Pinus taeda* L.** 2016. 168p. (Tese de doutorado).
- MIRANDA, R.O.V. et al. Modelagem do crescimento e produção em classes de precipitação pluviométrica para *Eucalyptus* sp. *Floresta*, v.45, n.1, p.117-128, 2015.
- MIRANDA, R.O.V. et al. Individual models for diameter and height projection with contribution of competition index in *Pinus taeda* L. stands. *Floresta*, v.52, n.1, p.176-188, 2022.

NASCIMENTO, F.A.F. et al. Sistema de crescimento e produção para povoamentos de *Pinus taeda* na região norte de Santa Catarina. **Cerne**, v.21, n.2, p.235-242, 2015.

PENIDO, T.M.A. et al. Modelos de crescimento e produção para a estimativa volumétrica em povoamentos comerciais de eucalipto. **Scientia Forestalis**, v.48, p.1-12, 2020.

PEREIRA, J.C. et al. Modelo de crescimento e produção de Clutter adicionado de uma variável latente para predição do volume em um plantio de *Eucalyptus urograndis* com variáveis correlacionadas espacialmente. **Scientia Forestalis**, v.44, p.393-403, 2016.

RETSLAFF, F.A.S. **Simulador para prognose da produção de *Pinus taeda* com diagrama de manejo da densidade associado à modelagem em classes de diâmetro.** 2014. 166f. (Tese de doutorado).

ROMANIUK, D.S. **Modelagem do crescimento e da produção em plantios de *Pinus taeda* L. na Região Centro-Sul do Paraná.** 2015. 90f. (Dissertação de mestrado).

SANTANA, C.J.O. **Simulação do crescimento e da produção em plantações desbastadas de *Eucalyptus grandis* com diferentes procedimentos de obtenção dos parâmetros da distribuição Weibull.** 2008. 100f. (Dissertação de mestrado).

SCOLFORO, J.R.S. **Sistema integrado para predição e análise presente e futura do crescimento e produção, com otimização de remuneração de capitais, para *Pinus caribaea* var. *hondurensis*.** 1990. 290 f. (Tese de doutorado).

TÉO, S. J. Modelagem do crescimento e produção de árvore individual independente da distância, para *Pinus taeda* L., na Região Meio Oeste do Estado de Santa Catarina. **Floresta**, v.52, n.3, p.436-456, 2022.

VIANA, J.J. **Modelagem do crescimento e da produção em classes de diâmetro para plantios de *Pinus taeda* L. não desbastados.** 2016. 124f. (Dissertação de mestrado).