



Modelo de crescimento e produção florestal sob oscilações climáticas

Thomaz Corrêa e Castro da Costa^{1*}, Miguel Marques Gontijo Neto¹, Mônica Matoso Campanha¹, Talvane Coelho²

¹Embrapa Milho e Sorgo, Rod. MG 424 - km 45, CEP 35700-098, Sete Lagoas, MG

²Universidade Federal de São João del Rei, Rua Sétimo Moreira Martins, 188, Bairro Itapoã, CEP: 35702-031, Sete Lagoas, MG

*Autor correspondente:

thomaz.costa@embrapa.br

Termos para indexação:

Previsão
Distribuição probabilística
Variabilidade climática

Index terms:

Forecasting
Probabilistic distribution
Climate variability

Histórico do artigo:

Recebido em 25/02/2025
Aprovado tecnicamente em 22/07/2025
Aprovação final em 25/08/2025
Publicado em 08/09/2025

Resumo - Modelos de crescimento e produção florestal são essenciais para prever a dinâmica dos povoamentos e auxiliar no planejamento do manejo das plantações. No entanto, os erros dessas estimativas são influenciados por diversos fatores, principalmente pela oscilação climática. Este estudo avaliou a performance de dois modelos de distribuição probabilística com predição de parâmetros, sendo o segundo uma versão aprimorada do primeiro, incorporando uma nova abordagem para a projeção da altura das árvores. Em uma segunda etapa, os erros de prognose foram comparados graficamente com variáveis climáticas. Foram utilizados dados de inventários florestais contínuos do monocultivo seminal de *Khaya grandifoliola* e de renques de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis* cv. GG100 em dois sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF), localizados em Sete Lagoas, Minas Gerais. A validação das projeções foi realizada por meio do teste de Kolmogorov-Smirnov e do cálculo do erro percentual do volume de madeira projetado. Os resultados indicam que oscilações climáticas interferem nos erros dos modelos. O modelo aprimorado reduziu os erros das estimativas, melhorando a acurácia das projeções.

A forest growth and production model under climate fluctuations



Abstract - Forest growth and production models are essential for predicting stand dynamics and assisting in management planning. However, the accuracy of these estimates is influenced by several factors, mainly climate fluctuations. This study evaluated the performance of two probabilistic distribution models with predict of parameters, the second being an improved version of the first, incorporating a new approach for projecting tree height and associating the errors found with climate variables. Data from continuous forest inventories of *Khaya grandifoliola* seminal monoculture and *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis* cv. GG100 rows were used in two crop-livestock-forest integration systems (ILPF), located in Sete Lagoas, Minas Gerais State, Brazil. The validation of the projections was performed using the Kolmogorov-Smirnov test and the calculation of the percentage error of the projected volume. The results indicate that climate fluctuations interfere with the accuracy of the models. The improved model systematically reduced the estimation errors, improving the accuracy of the projections.

Introdução

Os modelos de crescimento e produção florestal têm por base a dinâmica do crescimento de povoamentos florestais (Azevedo et al., 2016). Esses modelos possibilitam prever a produção futura de madeira e, assim, orientar o planejamento e o manejo adequados para florestas (Leite et al., 2013; Ribeiro et al., 2014).

A capacidade produtiva de um povoamento florestal é influenciada por diferentes fatores, como genéticos, climáticos, pedológicos, tratos silviculturais e condições fitossanitárias (Campos & Leite, 2017; Costa et al., 2023). Neste sentido, dados de amostragem do inventário florestal contínuo e a cubagem serão sempre necessários para gerar estimativas confiáveis na implementação desses modelos, pois consideram estes fatores indiretamente. Com esses dados, é possível capturar as interações intrínsecas ao desenvolvimento florestal, modelando a tendência de crescimento em um determinado período (Miguel et al., 2010; Retslaff et al., 2012).

No entanto, mesmo utilizando os dados mensurados no modelo, não há garantias de obtenção de projeções futuras de produção de madeira com baixos níveis de erros. Isto porque a dinâmica de crescimento sofrerá mudanças de tendência de crescimento, conforme oscilações severas do clima, principalmente relacionadas à oferta hídrica. Por esse motivo, prever a produção de madeira em idades futuras com um nível de confiabilidade é ainda um desafio para a pesquisa e para as empresas florestais, que utilizam estas projeções nas previsões de estoque e demanda de madeira.

De qualquer forma, os modelos de prognose florestal continuam com ampla aplicação, principalmente os empíricos, por serem menos dependentes de fatores de causa e efeito, com a utilização de dados do próprio povoamento para estimativas em períodos futuros (Cao, 2004; Miguel et al., 2010; Retslaff et al., 2012; Leite et al., 2013; Ribeiro et al., 2014; Pogoda et al., 2019).

No setor florestal existem modelos empíricos disponíveis em softwares, a exemplo da Família Sis da Embrapa (Oliveira, 2011), que integram prognoses florestais com outras funcionalidades. Entre essas funcionalidades, destacam-se: simulação de desbastes, partição de produtos florestais e avaliação econômica (Oliveira, 2011; Costa et al., 2020).

Existem modelos de maior complexidade, como os *Process-Based Models* (PBM), que se destacam por simular processos ecofisiológicos, como eficiência no uso da radiação, balanço de carbono, partição de biomassa e parâmetros nutricionais básicos do povoamento (Oliveira et al., 2018; Gupta & Sharma, 2019). Embora sejam robustos, esses modelos demandam grande quantidade de dados, o que os torna mais exigentes em comparação aos modelos empíricos. Conforme a quantidade dos fatores inseridos no modelo aumenta, ele pode capturar de maneira mais precisa a dinâmica do povoamento, mas também reduz o custo-benefício, devido à necessidade de aquisição de dados extensos e detalhados.

Na lógica, modelos empíricos (de povoamento total, de distribuição de diâmetros ou de árvore individual), ou PBM, serão todos suscetíveis às oscilações climáticas severas no período inventariado e/ou no período que intermedia o período inventariado e a data da produção projetada, pois suas performances vão depender de um cenário estável na dinâmica de crescimento.

De acordo com a temática de interferências climáticas na prognose florestal, o objetivo desta pesquisa foi comparar os resultados de prognose de dois modelos de distribuição probabilística com predição de parâmetros (o modelo 2 como um aprimoramento do modelo 1), e avaliar os erros relacionando-os com variáveis climáticas no período. De fato, as variáveis climáticas não integram a prognose, mas foram utilizadas para detectar imprecisões nos modelos. O modelo 1 é de distribuição de diâmetros com uma nova função para obter parâmetros da distribuição Weibull (Costa et al., 2023), e o modelo 2 combina a distribuição de altura com a distribuição de diâmetros, assumindo a premissa de que uma árvore com diâmetro menor terá menor altura. A hipótese desse estudo é que o modelo 2 entrega valores projetados com menor erro, e que oscilações climáticas aumentam estes erros.

Material e métodos

Área de estudo

Os plantios de mogno-africano (*Khaya grandifoliola*) (19°19'08"S e 44°13'20"W, h = 744 m) e de renques de *Eucalyptus urophylla* x *E. grandis* cv. GG100 (19°29'06"S e 44°10'45"W, h = 763 m) estão situados no município de Sete Lagoas, na

região central de Minas Gerais, em relevo plano e latossolo vermelho-amarelo no Bioma Cerrado.

O clima do município de Sete Lagoas é estacional, com padrões sazonais bem-marcados, com média de precipitação pluviométrica de 1.340 mm, concentrada nas estações quentes, de outubro a março (Silva et al., 2021), tendo sido necessária a irrigação das mudas de mogno-africano por gotejamento nos dois primeiros anos. Os plantios de eucalipto nesta região não exigem irrigação, mas, no caso do plantio efetuado em 2009, foi preciso irrigar manualmente no primeiro ano por ter ocorrido o plantio tardiamente, no início de fevereiro.

As mudas seminais de mogno-africano foram plantadas em 1 de dezembro de 2009, sob espaçamento 5 m x 5 m (400 árvores por ha), caracterizando um monocultivo em 8 ha. Para a realização do inventário florestal contínuo (IFC), selecionou-se uma parcela com 50 árvores do IFC (1.250 m²). Em todas as árvores da parcela foram mensurados o diâmetro à 1,3 m do solo (DAP) e a altura total (ht), nos respectivos meses informados na Tabela 1.

O eucalipto foi plantado em uma linha por renque, no espaçamento 15 m x 2 m, em dois sistemas ILPF de 1 ha cada (6 renques por ha), sendo o primeiro

plantio em 5 de fevereiro de 2009 e a segundo em 24 de outubro de 2011. Foram seguidas recomendações de adubação para a produção potencial em todos os plantios.

Em cada renque, selecionou-se uma árvore a cada 10 m, amostrando aproximadamente 40 árvores por sistema, devido às diferenças no comprimento das linhas. As informações coletadas foram o DAP e ht. Como forma de incrementar a incidência solar nos sistemas ILPF, o desbaste do eucalipto foi realizado uma única vez no ano de 2015. Metade das áreas com renques de eucalipto foram desbastadas de forma sistemática, sendo 50% dos indivíduos eliminados, resultando no espaçamento de 15 m x 4 m para os plantios de 2009 e 2011, para que fosse avaliada a produção de pastagem nas duas densidades de plantio (333 e 166 árvores por ha).

Devido ao desbaste, em 2016, as unidades amostrais outrora inventariadas em toda a área dos talhões, foram reduzidas pela metade. Na reestruturação das novas unidades amostrais, foram adicionados indivíduos que antes não foram mensurados, para completar o número de árvores originais nas áreas que foram divididas pela metade nos plantios sem desbaste e sob desbaste a partir de 2016.

Tabela 1. Cronograma de mensuração dos inventários florestais contínuos nos diferentes sistemas de produção de mogno-africano e eucalipto, antes e após o desbaste.

Table 1. Measurement schedule for continuous forest inventories in different African mahogany and Eucalyptus production systems, before and after thinning.

Mogno-africano			Euc2009		Euc2011	
Data	Meses		Data	Meses	Data	Meses
01/05/2012	29,0		04/06/2012	39,9	06/12/2013	25,8
01/05/2013	41,0		24/04/2013	50,6	13/11/2014	37,2
01/05/2014	53,0		27/05/2014	63,7	26/11/2015	49,8
17/05/2015	65,5		09/07/2015	77,1	03/10/2016*	60,2
12/06/2016	78,4		03/10/2016*	92,0	21/11/2017*	74,0
			14/08/2017*	102,3	27/11/2018*	86,4
			29/05/2018**		12/11/2019*	98,0
			15/05/2019**		19/11/2020*	108,9
			08/09/2020**			
Projeção	05/10/2018	106,2	15/05/2019	123,3	07/10/2022	131,5
Projeção desbaste	-	-	13/10/2022	166,6	07/10/2022	131,5

* Data de mensuração na meia parcela sem desbaste, e na meia parcela com desbaste, completadas com árvores não mensuradas anteriormente para totalizar as amostras. **Mensuração do talhão com desbaste somente.

Modelos de volume

Para modelar a forma do fuste nos dois plantios de eucalipto, foram realizadas as cubagens rigorosas no ano de 2015 de 29 árvores desbastadas no plantio efetuado em 2009, e de 24 árvores desbastadas no plantio efetuado em 2011.

Para modelar a forma do fuste, as cubagens de 13 árvores em pé de mogno-africano foram realizadas no ano de 2018 com auxílio de um dendrômetro digital RD 1000 Criterion, com precisão de 6 mm (Nicoletti et al., 2015).

Algoritmo e funções

Os modelos empíricos que foram utilizados neste trabalho são de distribuição probabilística, com atributos de inventários florestais para projetar o número de árvores por classe diamétrica e de altura em idades futuras. Dentre as funções probabilísticas, aplicou-se a função de Weibull, devido à sua flexibilidade e consistência em estimativas de prognose (Miguel et al., 2010; Leite et al., 2013; Lima et al., 2015; Orellana et al., 2017). Para sua forma completa são considerados os três parâmetros (locação, escala e forma), que podem ser obtidos pelo método dos percentis (Costa & Guimarães, 2022), aplicado neste trabalho, ou o método da máxima verossimilhança, e da regressão linear (Poudel & Cao, 2013; Hudak & Tiryakioglu, 2009; Berger & Lawrence, 1974), implementados no algoritmo de prognose desenvolvido, mas não aplicados.

Na Tabela 2 estão descritas as funções do modelo 1 aplicado em Costa et al. (2023). As funções 1 e 2 se referem ao modelo de Taper de Kozak e de volume de Schumacher & Hall respectivamente, para estimar o volume por árvore. Com os dados do IFC foram calculados: altura dominante (hd) pelo método de Assmann, altura dominante futura (hdf), área basal (G), os diâmetros mínimo ($D_{\min}$), máximo ($D_{\max}$) e quadrático (Dg), por meio das respectivas equações: 3, 4, 5, 6, 7, 8. Foram também obtidas: altura mínima ($H_{\min}$), altura máxima ($H_{\max}$), número de árvores por hectare (N ha^{-1}), área basal por hectare (G ($\text{m}^2 \text{ha}^{-1}$)) e volume por hectare (V ($\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$)).

Nesse processamento foram obtidos os parâmetros para função Weibull, que foram ajustados ao diâmetro assintótico no percentil 24 (x_1) (equação 9) e no percentil 93 (x_2) (equação 10), a partir de distribuições observadas, com amplitude de classe de diâmetro de 1 cm. O método dos percentis foi adotado pelo fato do modelo 1 usar

estas funções, validadas em Costa & Guimarães (2022). Por meio das equações 11, 12 e 13 foram obtidos os parâmetros a, b e c, respectivamente.

A equação 14 é a função Weibull acumulada, usando o limite superior da classe de diâmetro (c/) como variável, e a equação 15 é a equação hipsométrica, aplicada somente no modelo 1, para obter as alturas referentes aos diâmetros projetados.

Para a elaboração do novo modelo estatístico (modelo 2) foram aplicadas as mesmas funções ora descritas, com exceção da equação 15. É nesta etapa que o modelo 2 se difere do modelo 1. A altura é projetada pela função Weibull, da mesma forma que o DAP, desprezando-se o pareamento entre o diâmetro e a altura da mesma árvore. A premissa é de que árvores com menores diâmetros terão menores alturas, desprezando-se a relação de dependência entre as variáveis DAP e altura.

As equações 6 a 14 são aplicadas ao diâmetro e à altura, de forma que as alturas futuras são equalizadas nas classes de diâmetro futuras. Com o número de árvores por classes de diâmetro com amplitude de 1 cm e a altura total correspondente à classe, é gerado o arquivo de árvores projetadas, que é o objetivo principal do modelo.

Validação

Para validar o modelo, foram utilizados dados de inventários florestais contínuos do monocultivo seminal de *Khaya grandifoliola* e de renques de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis* cv. GG100 em dois sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF). Para as projeções, os dados do IFC foram organizados em conjuntos mínimos de três mensurações (três datas), o número mínimo para tendência curvilínea. As combinações têm características ordinais. Assim, são combinadas as datas mais afastadas com aquelas mais próximas da data de projeção, representando três inventários com mensurações anuais em um período da fase de crescimento, sendo o último distanciado de dois anos da data de projeção. As combinações de datas dos IFC podem ser observadas na Tabela 3.

Para identificar o melhor modelo e as combinações de datas que resultassem em maior aderência entre as distribuições de altura, foi aplicado o teste de Kolmogorov-Smirnov com 5% de significância, entre amostras de alturas projetadas e observadas suficientes para o teste (> 30). Esse teste permite a comparação de duas distribuições sem identificá-las previamente.

Tabela 2. Funções utilizadas nos diferentes sistemas de produção de mogno-africano e eucalipto.**Table 2.** Functions used in the different African mahogany and eucalyptus production systems.

Equações	Nº
$(d_i/dap)^2 = b_0 + b_1 * \frac{h_i}{ht} + b_2 * \left(\frac{h_i}{ht}\right)^2$	(1)
$v = \exp(b_0 + b_1 * \ln(dap) + b_2 * \ln(ht))$	(2)
$\ln(hd) = b_0 + b_1 * \left(\frac{1}{l}\right)$	(3)
$\ln(hdf) = \ln(S) + b_1 * \left(\frac{1}{lf} - \frac{1}{li}\right)$	(4)
$\ln(G) = b_0 + b_1 * \ln(I * hd)$	(5)
$((D,H)_{min}, (D,H)_{max}, D_g, x_1, x_2) = b_0 + b_1 * \ln(I)$	(6-10)
$a = b_0 + b_1 * x_1$	(11)
$b = b_0 + b_1 * (x_2 - a)$	(12)
$\ln(c) = b_0 + b_1 * \ln\left[\frac{(x_2 - x_1)}{b}\right]$	(13)
$F_x = 1 - \exp\left\{-\left[\left(\frac{cl - a}{b}\right)^c\right]\right\}$	(14)
$\ln(H_{max}) = b_0 + b_1 * \ln(D_{max})$	(15)

Onde: d_i (cm): diâmetro ao longo do tronco; dap (cm): diâmetro a 1,3 m do solo; h_i (m): altura ao longo do tronco; h_t (m): altura total; b_0 , b_1 e b_2 : parâmetros estimados; l : idade em meses; G (m²): área basal da amostra; v (m³): volume por árvore; hd (m): altura dominante; hdf (m): altura dominante na idade futura; D_g (cm): diâmetro quadrático; D_{min} : diâmetro mínimo; D_{max} : diâmetro máximo; H_{min} : altura mínima; H_{max} : altura máxima; x_1 (cm): diâmetro no percentil 24; x_2 (cm): diâmetro no percentil 93; a , b e c : parâmetros de locação, escala e forma da função Weibull respectivamente; F_x : função acumulada de Weibull; cl : limite máximo da classe.

Para o volume projetado, foi obtido o erro percentual (E%) entre volumes de madeira por hectare projetados e observados (Equação 16).

$$E\% = \frac{(projetado - observado)}{observado} * 100 \quad (16)$$

Variáveis climáticas associadas ao balanço hídrico

As variáveis climáticas foram utilizadas para comparação com mudanças de tendência no crescimento das árvores. O balanço hídrico de Thornthwaite & Mather (1955) foi calculado para determinar o regime hídrico de Sete Lagoas, município onde se encontram as florestas analisadas. O armazenamento máximo no solo (capacidade de água disponível - CAD) foi de 100 mm. Com as estimativas da precipitação pluviométrica e da

evapotranspiração de referência (ET₀) diárias, foram calculados: deficiência, excedente hídrico e total de água retida no solo, que foram totalizados para o ano agrícola: 1 de abril do ano x a 31 de março do ano $x + 1$, no período de 2011 a 2022.

Para o cálculo da evapotranspiração de referência (ET₀, mm m⁻² dia⁻¹), foram obtidos os dados de temperatura máxima (T_{máx}, °C), média (T_{méd}, °C) e mínima (T_{mín}, °C) do ar; velocidade do vento (u_2 , m s⁻¹); radiação solar incidente (Rs, MJ m⁻² dia⁻¹) e umidade relativa média do ar (UR_{méd}, %) do satélite NASA Power (Rosa et al., 2023). A ET₀ foi estimada com o método Penman-Monteith (Allen et al., 2005). Por meio destas variáveis, foi possível associar graficamente suas oscilações com a tendência de dois atributos das florestas, o diâmetro quadrático e a altura dominante.

Tabela 3. Combinações de datas de mensuração do inventário florestal contínuo para os sistemas de produção de mogno-africano e do eucalipto em 2009 e 2011 (Euc2009 e Euc2011, respectivamente), com e sem desbaste.

Table 3. Combinations of measurement dates of the continuous forest inventory for the African mahogany and eucalyptus production systems in 2009 and 2011 (Euc2009 and Euc2011, respectively), with and without thinning.

Datas Combinadas	Mogno-africano	Euc2009	Euc2009 desbastado	Euc2011	Euc2011 desbastado
10-11-12		X			
11-12-13		X			
12-13-14	X	X			
13-14-15	X	X		X	
14-15-16	X	X		X	
15-16-17		X	X	X	X
16-17-18			X	X	X
17-18-19			X	X	X
18-19-2020			X	X	X
Projeção	2018	2019	2022	2022	2022

Ex.: 10-11-12 corresponde aos inventários realizados em 2010, 2011 e 2012.

Resultados

Validação dos modelos - Altura projetada

Na comparação gráfica das alturas projetadas pelos modelos 1 e 2 com as alturas observadas do mogno-africano (Figura 1), as alturas projetadas pelo modelo 2 ficaram mais próximas das alturas observadas. Mas, mesmo no modelo 2, ocorreu maior viés na projeção que utilizou dados de inventário nos anos de 2013, 2014 e 2015.

Na Figura 2, onde são comparadas as distribuições das alturas projetadas pelo modelo 2 com a altura observada, na distribuição das alturas para o mogno-africano (Figura 2A), a aderência ocorreu somente na combinação dos anos 2012- 2013-2014 (12-13-14) para o modelo 2, pelo teste de Kolmogorov-Smirnov ao nível de significância de 5% (Tabela 4).

Nos três sistemas, quase a totalidade das distribuições das alturas projetadas por ambos os modelos não alcançaram aderência estatística (modelo 1 com um resultado aderente e o modelo 2 com cinco resultados aderentes), como pode ser observado na Tabela 4. No modelo 2 a maioria dos valores do teste ficaram menos afastados do ponto crítico, mesmo sendo significativos (não aderência), o que significa uma redução nos erros em relação ao modelo 1. Os maiores vieses ocorreram para o plantio de eucalipto em 2011.

Validação dos modelos - Volume de madeira projetado

Na Tabela 5 são apresentados os erros entre volumes de madeira por hectare projetados e observados. Os erros dos modelos 1 e 2 para o mogno-africano não apresentaram diferenças, mesmo com alturas menos exatas obtidas pelo modelo 1. Para o eucalipto de 2009, ocorreram alternâncias de menores erros entre os dois modelos.

Para o eucalipto plantado em 2011, os erros das projeções do modelo 2 foram sistematicamente menores do que o modelo 1, demonstrando que a projeção da variável altura reduziu o viés no cálculo do volume, mesmo com ambos os modelos apresentando tendência de subestimação do volume por hectare.

Variáveis climáticas associadas ao balanço hídrico

Na Figura 3 são apresentadas as variáveis do balanço hídrico e a tendência de dois atributos das florestas, diâmetro quadrático (Dg) e altura dominante (hd) para os plantios de mogno-africano e eucalipto com e sem desbastes. Foram registradas ocorrências de estiagens severas no período de avaliação das árvores, destacando-se os anos de 2014 e 2016, quando ocorreram as maiores perdas hídricas no solo (Sald_hidr) (Figura 3).

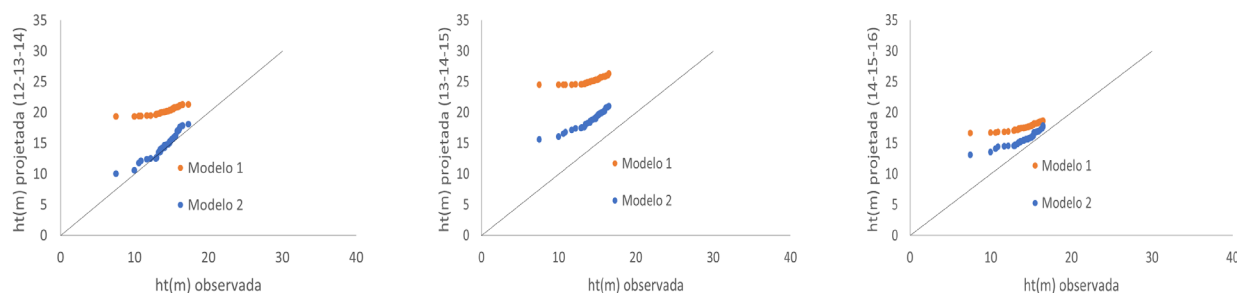


Figura 1. Alturas projetadas pelos modelos 1 e 2 para as respectivas datas de inventário (12-13-14, 13-14-15 e 14-15-16, notação de 20XX-20XX-20XX), comparadas às alturas observadas para o mogno-africano avaliado no município de Sete Lagoas, Minas Gerais.

Figure 1. Heights projected by models 1 and 2 for the respective inventory dates (12-13-14, 13-14-15 and 14-15-16, notation of 20XX-20XX-20XX), compared to the heights observed for African mahogany evaluated in the municipality of Sete Lagoas, Minas Gerais.

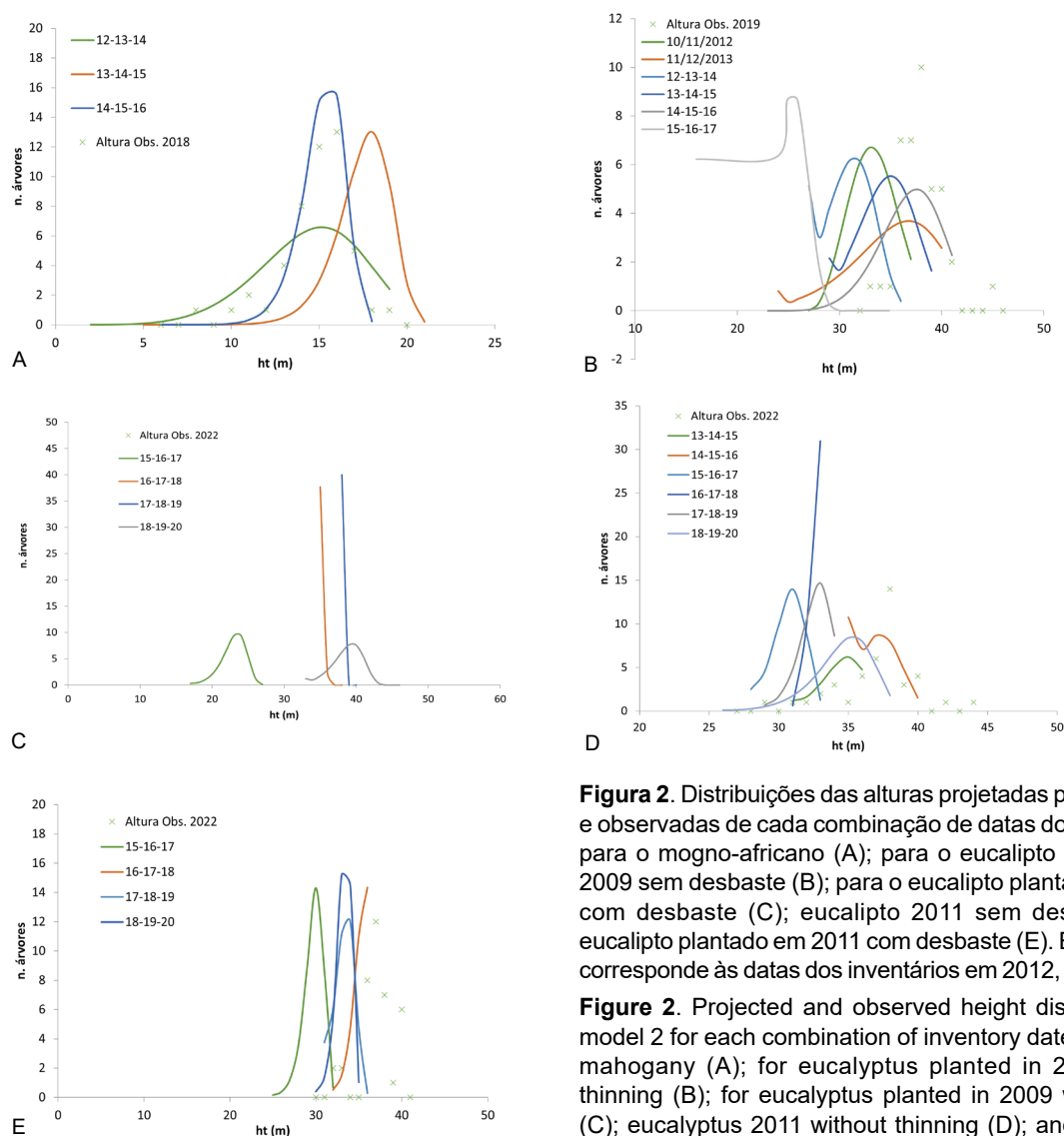


Figura 2. Distribuições das alturas projetadas pelo modelo 2 e observadas de cada combinação de datas dos inventários para o mogno-africano (A); para o eucalipto plantado em 2009 sem desbaste (B); para o eucalipto plantado em 2009 com desbaste (C); eucalipto plantado em 2011 sem desbaste(D); e eucalipto plantado em 2011 com desbaste (E). Ex.: 12-13-14 corresponde às datas dos inventários em 2012, 2013 e 2014.

Figure 2. Projected and observed height distributions by model 2 for each combination of inventory dates for African mahogany (A); for eucalyptus planted in 2009 without thinning (B); for eucalyptus planted in 2009 with thinning (C); eucalyptus 2011 without thinning (D); and eucalyptus planted in 2011 with thinning (E). Ex.: 12-13-14 corresponds to the inventory dates in 2012, 2013 and 2014.

Tabela 4. Teste Kolmogorov-Smirnov para as distribuições das alturas projetadas x observadas, com as combinações de datas dos inventários florestais, para os sistemas não desbastados e desbastados (2009d e 2011d).

Table 4 Kolmogorov-Smirnov test for the distributions of projected vs. observed heights, with combinations of forest inventory dates, for unthinned and thinned systems (2009d and 2011d).

**Comb. De Datas	Mogno-africano	Euc. 2009	Euc. 2011	Euc.2009d	Euc 2011d
Modelo 1					
10-11-12		0,435*			
11-12-13		0,948*			
12-13-14	0,979*	0,589*			
13-14-15	0,979*	0,948*	0,513*		
14-15-16	0,831*	0,417*	0,952*		
15-16-17		0,282 n.s.	0,810*	0,850*	0,868*
16-17-18			0,810*	0,425*	0,656*
17-18-19			0,786*	0,668*	0,684*
18-19-20			0,786*	0,975*	0,895*
Modelo 2					
10-11-12		0,339*			
11-12-13		0,844*			
12-13-14	0,126 n.s.	0,717*			
13-14-15	0,740*	0,195 n.s.	0,554*		
14-15-16	0,379*	0,173 n.s.	0,261 n.s.		
15-16-17		0,846*	0,929*	1,000*	0,920*
16-17-18			0,858*	0,364*	0,598*
17-18-19			0,881*	0,596*	0,867*
18-19-20			0,786*	0,250 n.s.	0,842*
K-S tab.	0,188	0,205	0,210	0,205	0,215
($\alpha = 0,05$)					

* significativo a 0,05, n.s. não significativo. **ex. 10-11-12 refere-se às datas do inventário florestal contínuo nos anos de 2010, 2011 e 2012 da Tabela 1.

Para o mogno-africano, foi observada uma alteração de tendência da altura dominante (hd) no ano de 2014 (Figura 3A). No caso do eucalipto plantado em 2009 e sem desbaste (Figura 3B), as principais quedas na tendência ocorreram em 2015 para o diâmetro quadrático (Dg) e em 2016 para hd. No eucalipto plantado em 2009 e sob desbaste (Figura 3C), percebe-se uma estagnação de hd entre 2015 e 2017. No eucalipto plantado em 2011 e sem desbaste (Figura 3D), são observadas quedas

nas tendências de hd e Dg em 2015, ocorrendo a retomada da taxa de crescimento em 2019. No eucalipto plantado em 2011 e com desbaste (Figura 3E), duas retomadas do crescimento ocorreram em 2019 e 2021 para Dg.

A avaliação gráfica das curvas de crescimento e o balanço hídrico mostra que muitas quedas no incremento ocorreram entre os períodos de 2014 e 2016, evidenciando a possível interferência da perda hídrica no solo no crescimento das árvores.

Tabela 5. Estimativas da produção de madeira (Vol) e erro percentual (E%) pelos modelos 1 e 2 em cada combinação de inventários para o mogno-africano e eucalipto plantados em 2009 e 2011, com e sem desbastes.

Table 5. Estimates of timber production (Vol) and percentage error (E%) by models 1 and 2 in each combination of inventories for African mahogany and eucalyptus planted in 2009 and 2011, with and without thinning.

**Datas da comb.	Vol (m³ ha⁻¹) Modelo 1	E%	Vol (m³ ha⁻¹) Modelo 2	E%
Mogno-africano				
12-13-14	68,9	-9,5	70,7	-7,1
13-14-15	84,2	10,7	84,4	10,9
14-15-16	79,6	4,5	83,2	9,4
2018			76,1	
Euc2009				
10-11-12	319,1	9,8	336,5	15,8
11-12-13	284,0	-2,3	234,6	-19,3
12-13-14	223,6	-23,0	238,0	-18,1
13-14-15	271,3	-6,6	297,5	2,4
14-15-16	200,7	-30,9	240,2	-17,3
15-16-17	258,9	-10,9	154,3	-46,9
2019			290,5	
Euc2009 desb				
15-16-17	144,2	-50,9	109,2	-62,8
16-17-18	245,7	-16,2	272,3	-7,2
17-18-19	245,8	-16,2	288,6	-1,6
18-19-20	287,0	-2,2	310,1	5,7
2022			293,4	
Euc2011				
13-14-15	200,8	-38,6	302,4	-7,5
14-15-16	174,4	-46,6	295,0	-9,7
15-16-17	101,2	-69,0	148,0	-54,7
16-17-18	159,1	-51,3	238,6	-27,0
17-18-19	161,7	-50,5	235,8	-27,9
18-19-20	164,6	-49,6	253,8	-22,3
2022			326,8	
Euc2011 desb				
15-16-17	99,2	-56,6	143,9	-37,0
16-17-18	129,8	-43,2	204,4	-10,6
17-18-19	128,5	-43,8	189,0	-17,3
18-19-20	142,0	-37,9	213,1	-6,8
2022			228,6	

**ex. 10-11-12 refere-se às datas do inventário florestal contínuo nos anos de 2010, 2011 e 2012 da Tabela 1. Em negrito estão os erros maiores que 20%.

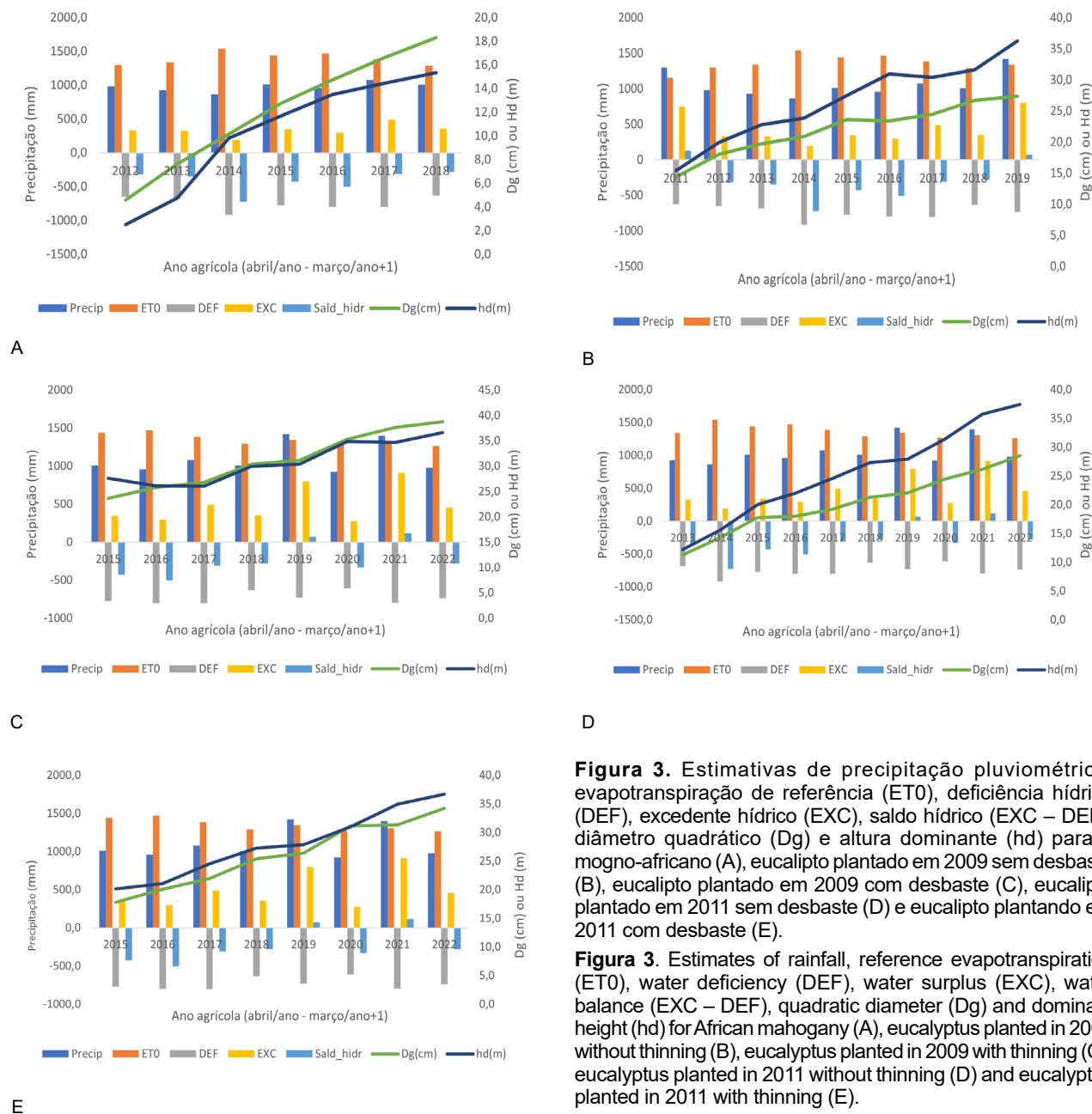


Figura 3. Estimativas de precipitação pluviométrica, evapotranspiração de referência (ET0), deficiência hídrica (DEF), excedente hídrico (EXC), saldo hídrico (EXC – DEF), diâmetro quadrático (Dg) e altura dominante (hd) para o mogno-africano (A), eucalipto plantado em 2009 sem desbaste (B), eucalipto plantado em 2009 com desbaste (C), eucalipto plantado em 2011 sem desbaste (D) e eucalipto plantando em 2011 com desbaste (E).

Figura 3. Estimates of rainfall, reference evapotranspiration (ET0), water deficiency (DEF), water surplus (EXC), water balance (EXC – DEF), quadratic diameter (Dg) and dominant height (hd) for African mahogany (A), eucalyptus planted in 2009 without thinning (B), eucalyptus planted in 2009 with thinning (C), eucalyptus planted in 2011 without thinning (D) and eucalyptus planted in 2011 with thinning (E).

Discussão

Validação dos modelos - altura e volume de madeira projetados

A primeira decisão foi verificar se a projeção da altura das árvores pela função de probabilidade iria reduzir o erro das estimativas. Na Figura 2, nota-se a dificuldade em projetar corretamente a altura, obtendo-se resultados menos consistentes do que com a distribuição de diâmetros obtidas por Costa et

al. (2023) nos mesmos sistemas de produção. Como a altura é uma variável geralmente mensurada de forma indireta, por meio de instrumentos ópticos ou eletrônicos, sua obtenção é mais suscetível a erros de medição do que o diâmetro à 1,30 m do solo (DAP) Prodan et al. (1997). A comprovação de que as alturas estimadas pelo modelo 2 são mais consistentes que as estimadas pelo modelo 1 foi obtida no erro de volume de madeira por hectare projetado para o eucalipto plantado em 2011. Os erros das projeções do modelo 2 foram

sistematicamente menores do que o modelo 1, demonstrando que a projeção da variável altura reduziu o viés no cálculo do volume de madeira.

Variáveis climáticas associadas ao balanço hídrico

O uso de modelos de crescimento e produção florestal enfrenta desafios para fornecer projeções consistentes em idades futuras, principalmente devido às oscilações climáticas, que afetam o crescimento das árvores (Subedi & Sharma, 2013; Pretzsch et al., 2014). As variáveis mensuradas nos períodos avaliados, diâmetro quadrático (Dg) e altura total (ht), foram sensíveis aos períodos mais críticos de perda hídrica no solo (2014 e 2016), observado pela queda nas taxas de crescimento em diâmetro e altura das árvores nestes períodos. Essa observação é referente ao intervalo entre períodos severos de estiagem, nos inventários de 2015, 2016 e 2017, onde o maior viés nas estimativas de altura e volume foi registrado (Figura 2 e Tabela 5).

Com a normalização da precipitação pluviométrica em anos posteriores e, conseqüentemente das taxas de crescimento, ocorreu uma retomada parcial da produção. No entanto, essa recuperação não é capturada pelos inventários anteriores, o que compromete a consistência das projeções realizadas com base nesses períodos. Na Figura 2 é evidente a subestimação da distribuição da altura projetada na combinação dos inventários 15-16-17 (equivalente aos inventários realizados em 2015, 2016 e 2017).

Para o volume de madeira por hectare, excluindo a combinação 15-16-17, observou-se uma redução significativa nos erros, particularmente no modelo 2. No plantio de eucalipto de 2009, os erros variaram entre -19,3% e 15,8%, enquanto no plantio de 2011, os erros ficaram entre -27,9% e -9,7%. Os erros de projeção do volume encontrados neste trabalho são comparáveis aos relatados por outros autores. Miranda et al. (2018), aplicando o método de predição de parâmetros e testando diversos modelos, alguns obtidos por *stepwise* com base na matriz de correlação entre atributos do inventário florestal contínuo e os parâmetros *b* e *c* da função Weibull, encontraram erros de projeção do volume de madeira por hectare variando de -14,5% a 23,3%. Azevedo et al. (2016), utilizando o mesmo método para idades de 48, 60 e 72 meses, obtiveram erros no volume por hectare de *Eucalyptus urophylla* entre -36% e 11%.

Em relação aos modelos 1 e 2 para as distribuições das alturas projetadas, observa-se

uma melhoria sensível nos resultados do teste de aderência de Kolmogorov-Smirnov para as alturas calculadas pelo modelo 2, com um número maior de resultados não significativos (indicando aderência entre as distribuições).

As referências relacionadas à prognose florestal frequentemente abordam a distribuição diamétrica. Por exemplo, no trabalho de Ogana et al. (2020), as distribuições dos diâmetros estimadas pela função Weibull não aderiram às observadas em 16 das 35 parcelas analisadas, um resultado semelhante a nove de 21 combinações não aderentes pelo teste de Kolmogorov-Smirnov relatadas por Costa et al. (2023), nos mesmos sistemas de produção avaliados neste trabalho.

Contudo, a inclusão da projeção da altura de árvores em uma idade futura, como realizada neste estudo, é incomum no campo da prognose. Tradicionalmente, algumas árvores por parcela são selecionadas para medição da altura, sendo as demais estimadas por modelos hipsométricos em função do diâmetro, pois a medição da altura de todas as árvores amostradas, historicamente, impacta o custo do inventário florestal (Houghton & Gregoire, 1993; Sanquetta et al., 2014; Campos et al., 2016; Gschwantner et al., 2016).

No entanto, verificou-se neste trabalho que, com a disponibilidade de hipsômetros eletrônicos que permitem a medição simultânea de diâmetro e altura, considerando pelo menos dois operadores, torna-se viável mensurar a altura de todas as árvores do inventário florestal. Com isso não há necessidade de equações hipsométricas para estimar alturas nos inventários, ou seja, eliminam-se os erros de regressão associados a essa variável.

Quanto às combinações de datas, verificou-se que, assim como no modelo 1, no modelo 2 as combinações mais distantes da data de projeção não apresentaram maiores erros. Os erros mais expressivos ocorreram no plantio de eucalipto plantado em 2011, em sistema ILPF, sendo esses valores, excluindo-se a combinação de datas 15-16-17, consistentes com estudos de prognose, pois encontram-se no intervalo entre -27,9 e -9,7% no caso do modelo 2. Considerando os modelos de Miranda et al. (2018) e Azevedo et al. (2016), a faixa de erros ficou entre -36 e 23,3%. Assim, a metodologia proposta, que incorpora a projeção da variável altura com a mesma funcionalidade da variável diâmetro, proporcionou uma melhoria sensível nos resultados de prognose.

Conclusões

O novo modelo, que atribui à variável altura a mesma funcionalidade da variável diâmetro na função de projeção, apresenta reduções sistemáticas nos erros das estimativas.

O estudo indica que oscilações climáticas provocam vieses nas projeções.

Agradecimentos

Esta pesquisa foi apoiada pelo projeto nº 20.18.03.015.00.00 "Estratégias ILPF para inovação na agricultura na região do Cerrado Mineiro e áreas do entorno - SisGerais". Agradecemos à Marília Queiroz de Rezende pela disponibilização dos dados do inventário florestal contínuo do Mogno e ao Daniel Guimarães por disponibilizar os dados climáticos adquiridos do Satélite NASA Power.

Créditos de Autores

Thomaz Corrêa e Castro da Costa: conceitualização, análise formal, investigação, metodologia, supervisão, escrita-primeira redação, escrita – revisão & edição. **Miguel Marques Gontijo Neto:** investigação. **Mônica Matoso Campanha:** investigação. **Talvane Coelho:** investigação, escrita – revisão & edição.

Referências

- Allen, R. G. et al. (ed.). **The ASCE standardized reference evapotranspiration equation**. Reston: American Society of Civil Engineers, 2005. <https://doi.org/10.1061/9780784408056>.
- Azevedo, G. B. et al. Modelagem da produção em nível de povoamento e por distribuição diamétrica em plantios de eucalipto. **Scientia Florestalis**, v. 44, n. 110, p. 383-392, 2016. <http://dx.doi.org/10.18671/scifor.v44n110.11>.
- Berger, R. W. & Lawrence, K. Estimating Weibull parameters by linear and nonlinear regression. **Technometrics**, v. 16, n. 4, p. 617-619, 1974.
- Campos, B. P. F. et al. Predição da altura total de árvores em plantios de diferentes espécies por meio de redes neurais artificiais. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 36, n. 88, p. 375-385, 2016. <https://doi.org/10.4336/2016.pfb.36.88.1166>.
- Campos, J. C. C. & Leite, H. G. Modelos de distribuição de diâmetros. In: Campos, J. C. C. & Leite, H. G. **Mensuração florestal: perguntas e respostas**. 5. ed. Viçosa, MG: UFV, 2017. cap. 4, 548 p.
- Cao, Q. V. Predicting parameters of a Weibull function for modeling diameter distribution. **Forest Science**, v. 50, n. 5, p. 682-685, 2004.
- Costa, T. C. C. et al. CalcMadeira: cálculo de peças de madeira roliça e serrada. In: Oliveira, R. J. de (org.). **Engenharia florestal: desafios, limites e potencialidade**. Rio de Janeiro: Científica Digital, 2020. 898 p.
- Costa, T. C. C. & Guimarães, A. L. Estimation of the Weibull distribution *form* parameter as a function of the *scale* parameter by the percentile method. **Floresta**, v. 52, n. 4, p. 531-540, 2022.
- Costa, T. C. C. et al. Algorithm for the projection of forest growth and production. **Floresta**, v. 53, n. 1, p. 99-109, 2023.
- Gschwanter, T. et al. Plot level estimation procedures and models. In: Gasparini, P. et al. (ed.). **Italian National Forest Inventory: methods and results of the third survey**. Cham: Springer, 2022. (Springer Tracts in Civil Engineering). <https://doi.org/10.1007/978-3-030-98678-0>.
- Gupta, R. & Sharma, L. K. The process-based forest growth model 3-PG for use in forest management: a review. **Ecological Modelling**, v. 397, p. 55-73, 2019.
- Houghton, D. R. & Gregoire, T. G. Minimum subsamples of tree heights for accurate estimation of Loblolly Pine plot volume. **Southern Journal of Applied Forestry**, v. 17, n. 3, p. 124-129, 1993. <https://doi.org/10.1093/sjaf/17.3.124>.
- Hudak, D. & Tiryakioğlu, M. On estimating percentiles of the weibull distribution by the linear regression method. **Journal of Materials Science**, v. 44, p. 1959-1964, 2009.
- 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.
- Lima, R. A. F. et al. Modeling tree diameter distributions in natural forests: an evaluation of 10 statistical models. **Forest Science**, v. 61, n. 2, p. 320-327, 2015.
- Miguel, E. P. et al. Using the Weibull function for prognosis of yield by diameter class in *Eucalyptus urophylla* stands. **Cerne**, v. 16, n. 1, p. 94-104, 2010.
- Miranda, R. et al. Prediction system for diameter distribution and wood production of eucalyptus. **Floresta e Ambiente**, v. 25, n. 3, e20160548, 2018.
- Nicoletti, M. F. et al. Exatidão de dendrômetros ópticos para determinação de volume de árvores em pé. **Ciência Florestal**, v. 25, n. 2, p. 395-404, 2015.
- Ogana, F. N. et al. Tree size distribution modelling: moving from complexity to finite mixture. **Journal of Forest and Environmental Science**, v. 36, n. 1, p. 7-16, 2020.
- Oliveira, C. M. M. et al. Modelo 3-PG na previsão do potencial produtivo de áreas para plantios comerciais de *Eucalyptus* spp. **Ciência Florestal**, v. 28, n. 1, p. 249-262, 2018.

- Oliveira, E. B. **Softwares para manejo e análise econômica de plantações florestais**. Colombo: Embrapa Florestas, 2011. 70 p. (Embrapa Florestas. Documentos, 2016).
- Orellana, E. et al. Métodos de ajuste e procedimentos de seleção de funções probabilísticas para modelar a distribuição diamétrica em floresta nativa de araucária. **Ciência Florestal**, v. 27, n. 3, p. 969-980, 2017.
- Pogoda, P. et al. Modeling diameter distribution of Black Alder (*Alnus glutinosa* (L.) Gaertn.) stands in Poland. **Forests**, v. 10, n. 412, 2019. <https://doi.org/10.3390/f10050412>.
- Poudel, K. P. & Cao, Q. V. Evaluation of methods to predict Weibull parameters for characterizing diameter distributions. **Forest Science**, v. 59, n. 2, p. 243-252, 2013.
- Pretzsch, H. et al. Forest stand growth dynamics in Central Europe have accelerated since 1870. **Nature Communications**, v. 5, p. 1-10, 2014.
- Prodan, M. et al. **Mensura forestal**. 3. ed. San José: IICA, 1997.
- Retslaff, F. A. S. et al. Prognose do crescimento e da produção em classes de diâmetro para povoamentos desbastados de *Eucalyptus grandis* no sul do Brasil. **Revista Árvore**, v. 36, n. 4, p. 719-732, 2012.
- Ribeiro, A. et al. Estrutura da distribuição diamétrica em plantio experimental de candeia (*Eremanthus erythropappus* (dc.) Macleish). **Ciência Florestal**, v. 24, n. 4, p. 1055-1065, 2014.
- Rosa, S. L. K. et al. Dados da Nasa Power e de estações meteorológicas de superfície em diferentes climas na estimativa da evapotranspiração de referência. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 58, e03261, 2023. <https://doi.org/10.1590/S1678-3921.pab2023.v58.03261>.
- Sanquetta, C. R. et al. **Inventários florestais: planejamento e execução**. 3 ed. [S.l.]: Multi-Graphic, 2014. 406 p.
- Silva, L. D. et al. O clima no Bioma Cerrado. In: Silva, L. D. et al. (org.). **Sistema de informações para planejamento florestal no cerrado brasileiro**. Piracicaba: ESALQ/USP, 2021. v. 2, cap. 2, p. 12-29.
- Subedi, N., & Sharma, M. Climate-diameter growth relationships of black spruce and jack pine trees in boreal Ontario, Canada. **Global Change Biology**, v. 19, n. 2, p. 505-516, 2013.
- Thorntwaite, C. W. & Mather, J. R. The water balance. **Publications in Climatology**, v. 8, n. 1, p. 1-104, 1955.