

AJUSTE DE MODELOS HIPSOMÉTRICOS EM EUCALIPTO CLONAL NO CERRADO

Brenda Raiane Lopes do Nascimento¹, Kelma Carla Alves de Souza Guimarães¹, Marilucia de Sousa Sales Silva¹, Kamila Cristina da Silveira¹, Valdir Carlos Lima de Andrade²

RESUMO:

O presente estudo teve como objetivo ajustar e avaliar modelos hipsométricos para estimar a altura total de árvores em plantios clonais de *Eucalyptus* estabelecidos em área de Cerrado. Foram utilizados dados de inventário florestal aos 47 meses de idade, abrangendo quatro clones (E224, I144, E1428 e VM58). As variáveis mensuradas incluíram diâmetro à altura do peito (DAP), altura total e altura dominante, coletadas em parcelas retangulares de 348 m² distribuídas em um plantio comercial de 78 ha. Foram ajustados diferentes modelos hipsométricos clássicos e não lineares, e sua performance foi comparada por meio de indicadores como coeficiente de determinação ajustado (R²aj), erro padrão da estimativa (EPR), significância dos parâmetros e análise gráfica dos resíduos. Partindo do embasamento do critério estatístico (R² ajustado e EPR), e na análise residual, os modelos M2, M6, M10, M11 e M14 foram selecionados para validação independente. Os modelos M6 e M10 destacaram-se com melhor desempenho na validação e foram posteriormente ajustados por clone. O modelo M6 apresentou o menor erro percentual (EPR = 7,98%), elevada capacidade explicativa (R²aj = 0,7507) e maior estabilidade entre clones, sendo indicado como o mais adequado para uso operacional. A validação independente confirmou o desempenho superior do M6, com elevada correlação (r = 0,9038) e distribuição homogênea dos resíduos. Considerando estabilidade estatística, precisão e coerência biológica, o modelo M6 constitui a equação hipsométrica mais adequada para estimativa de altura total em plantios clonais de eucalipto no Cerrado tocantinense. O estudo contribui para aprimorar processos de inventário florestal na região, oferecendo alternativas robustas e validadas para estimativas dendrométricas.

Palavras-chave: Relação altura-diâmetro; *Eucalyptus*; inventário florestal.

ADJUSTMENT OF HYPSONOMETRIC MODELS IN CLONAL EUCALYPTUS IN THE CERRADO

The present study aimed to fit and evaluate hypsonometric models to estimate total tree height in clonal *Eucalyptus* plantations established in a Cerrado area. Data from a forest inventory at 47 months of age were used, covering four clones (E224, I144, E1428, and VM58). The measured variables included diameter at breast height (DBH), total height and dominant height, collected in rectangular plots of 348 m² distributed across a 78 ha commercial plantation. Different classical and nonlinear hypsonometric models were fitted, and their performance was compared using indicators such as adjusted coefficient of determination (adjusted R²), standard error of the estimate (SEE), parameter significance, and graphical analysis of residuals. Based on statistical criteria (adjusted R² and SEE) and residual analysis, models M2, M6, M10, M11, and M14 were selected for independent validation. Models M6 and M10 stood out with better performance in validation and were subsequently fitted by clone. Model M6 showed the lowest percentage error (SEE = 7.98%), high explanatory power (adjusted R² = 0.7507) and greater stability among clones, being indicated as the most suitable for operational use. Independent validation confirmed the superior performance of M6, with a high correlation (r = 0.9038) and a homogeneous distribution of residuals. Considering statistical stability, precision and biological consistency, model M6 is the most appropriate hypsonometric equation for estimating total height

¹Mestranda em Ciências Florestais e Ambientais pela Universidade Federal do Tocantins, Gurupi-TO. brendaraianelopes@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0004-7024-8164>; kelma.carla@mail.uft.edu.br, <https://orcid.org/0009-0009-4180-1174>; marilucia.sousa@mail.uft.edu.br, <https://orcid.org/0009-0006-6355-3691>; kamilla.cristina@mail.uft.edu.br, <https://orcid.org/0009-0005-8098-6862>. ²Professor do Curso de Engenharia Florestal da Universidade Federal do Tocantins, Gurupi-TO. vcandrade@uft.edu.br, <https://orcid.org/0000-0002-5559-9124>.

in clonal eucalyptus plantations in the Cerrado of Tocantins. The study contributes to improving forest inventory processes in the region by providing robust and validated alternatives for dendrometric estimates.

Keywords: Height–diameter relationship; *Eucalyptus*; forest inventory.

INTRODUÇÃO

A estimativa precisa da altura total das árvores é fundamental para inventários florestais, manejo e modelagem do crescimento em povoamentos de *Eucalyptus*. No entanto, a medição direta da altura é mais trabalhosa, lenta e sujeita a erros do que a medição do diâmetro à altura do peito. Dessa forma, a utilização de modelos hipsométricos que relacionam altura e diâmetro constitui uma alternativa eficiente e amplamente adotada para reduzir custos e aumentar a precisão em inventários de plantios florestais.

De acordo com a Produção da Extração Vegetal e da Silvicultura (PEVS 2024), o Brasil atingiu 9,9 milhões de hectares de florestas plantadas, com destaque para o eucalipto, que ocupou 7,7 milhões de hectares, representando aproximadamente 78% da área total (IBGE, 2025). Plantios clonais de *Eucalyptus* no bioma Cerrado apresentam grande variabilidade de crescimento entre materiais genéticos e condições edafoclimáticas (Santos et al., 2015; Andrade et al., 2023). Essa variabilidade reforça a importância do ajuste de modelos hipsométricos específicos, capazes de representar adequadamente o comportamento da relação altura-diâmetro em idades e ambientes distintos.

No processo de inventário florestal, é realizado o registro do diâmetro de todas as árvores na área amostrada, além da medição da altura de algumas delas. Com base nos pares de altura e diâmetro obtidos, cria-se uma equação que permite estimar a altura das outras árvores presentes na mesma área (Ribeiro et al., 2010).

A relação hipsométrica é uma ferramenta indispensável no inventário florestal, utilizada para estimar a Altura Total (H) das árvores a partir do Diâmetro à Altura do Peito (DAP). Em razão de limitações operacionais, H é medida apenas em uma subamostra de árvores, o que justifica o ajuste de modelos hipsométricos para prever a altura dos indivíduos restantes. A precisão destes modelos é influenciada por fatores como a Altura Dominante (HD), a idade, a competição e as características específicas do sítio.

Em plantios clonais, a importância dessa relação se intensifica, uma vez que a uniformidade genética do material propagado resulta em uma relação H-DAP mais estável. Isso significa que o

modelo hipsométrico se ajusta com maior rigor estatístico, conferindo alta confiabilidade aos dados de volume. Essa precisão é crucial para comparar objetivamente a superioridade de um clone em relação aos demais genótipos sob as mesmas condições.

Apesar dos avanços, ainda são escassas comparações sistemáticas entre modelos hipsométricos aplicados especificamente a clones de *Eucalyptus* no Cerrado. Neste estudo, buscou-se ajustar diferentes modelos hipsométricos para quatro clones de *Eucalyptus* aos 47 meses de idade, plantados em área de Cerrado, comparando seu desempenho com base em critérios estatísticos e análise residual. O objetivo foi identificar uma equação para estimar a altura total, considerando a hipótese de que a equação selecionada apresentaria desempenho semelhante entre os clones, permitindo sua aplicação conjunta; alternativamente, diferenças no desempenho indicariam a necessidade de ajustes específicos por clone, contribuindo para o aprimoramento dos inventários florestais na região e verificando se uma única equação pode ser utilizada para diferentes clones.

MATERIAL E MÉTODOS

O estudo foi conduzido em um plantio clonal de *Eucalyptus* localizado em área de Cerrado, abrangendo aproximadamente 78 ha, na região do Município de Gurupi, Tocantins sob as coordenadas, 11° 43' 48" S (latitude) e 49° 04' 08" O (longitude) (Figura 1). O município integra a microrregião de Gurupi, que concentra 8.403 hectares de florestas plantadas, inseridos em um total de 74.676 hectares registrados no estado do Tocantins em 2024, dos quais 65.752 hectares (86%) correspondem a plantios de eucalipto (IBGE, 2025).

A região caracteriza-se por solos predominantemente distróficos, elevada sazonalidade climática e regime pluviométrico concentrado no verão, fatores que influenciam significativamente o crescimento florestal. Foram avaliados quatro clones amplamente utilizados em sistemas de produção florestal, sendo estes: I144 (*Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*), VM 58 (*Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus camaldulensis*), E224 (*Eucalyptus urophylla*) e E1428 (*Eucalyptus saligna*).

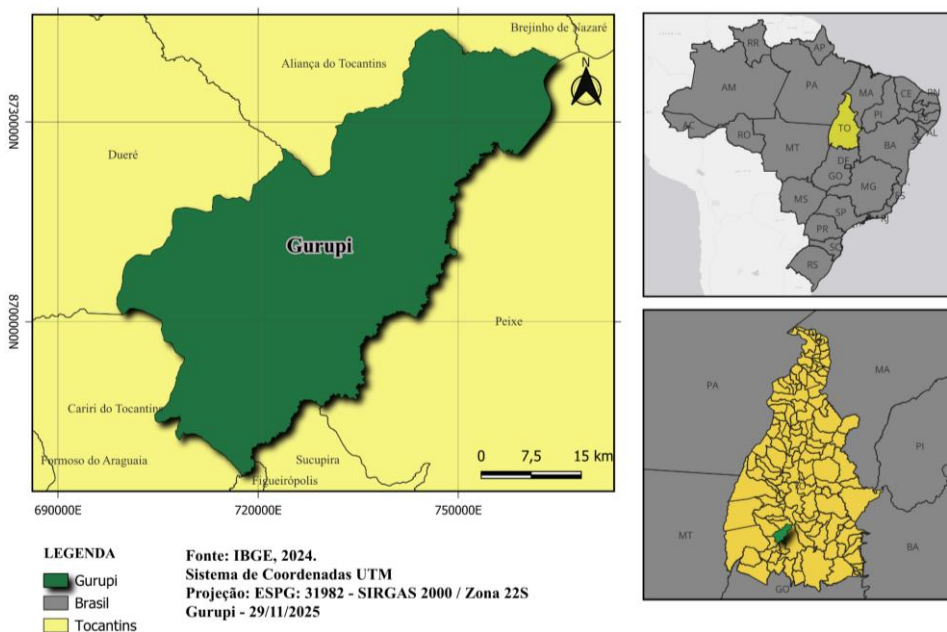


Figura 1. Localização no território brasileiro com abrangência a região onde foram coletados os dados visando testar diferentes equações hipsométricas para os clones E224, I144, E1428 e VM58.

A amostragem do inventário florestal foi conduzida pelo método de área fixa, utilizando 11 parcelas retangulares de 348 m² em um plantio aos 47 meses de idade. Em cada parcela, mensuraram-se o diâmetro à altura do peito (DAP), tomado a 1,30 m do solo, em todas as árvores, e a altura total foi medida em uma subamostra de oito árvores por parcela, selecionadas sistematicamente na ordem de medição, totalizando 88 árvores com altura mensurada. A estimativa da altura das árvores não mensuradas diretamente foi realizada por meio de equações hipsométricas ajustadas em função do diâmetro à altura do peito (d), da altura total (h) e da altura dominante do povoamento (hd), cuja inclusão contribui para melhorar o desempenho e a estabilidade dos modelos, especialmente em povoamentos clonais de *Eucalyptus* (Ferraz Filho et al., 2018).

As equações hipsométricas utilizadas no estudo são apresentadas a seguir:

- (1) $h = \beta_0 + \beta_1(d) + \beta_2(hd) + \varepsilon$
- (2) $\ln(h) = \beta_0 + \beta_1\left(\frac{1}{d}\right) + \beta_2(hd) + \varepsilon$
- (3) $\ln(h) = \beta_0 + \beta_1\left(\frac{1}{d}\right) + \varepsilon$
- (4) $\ln(h) = \beta_0 + \beta_1 \ln(d) + \varepsilon$
- (5) $\ln(h) = \beta_0 + \beta_1 \ln(d) + \beta_2\left(\frac{1}{d}\right) + \varepsilon$

$$\ln(h) = \beta_0 + \beta_1\left(\frac{1}{d}\right) + \beta_2 \ln(hd) + \varepsilon \quad (6)$$

$$h = \beta_0 + \beta_1(d^2) + \beta_2(hd) + \varepsilon \quad (7)$$

$$h = hd[\beta_0 + \beta_1(d/hd)] + \varepsilon \quad (8)$$

$$h = \beta_0 + \beta_1(d) + \beta_2(d/hd) + \varepsilon \quad (9)$$

$$\frac{1}{\sqrt{h}} = \beta_0 + \beta_1\left(\frac{1}{d^2}\right) + \beta_2(hd) + \varepsilon \quad (10)$$

$$\frac{d}{\sqrt{h}} = \beta_0 + \beta_1 \ln(hd) + \beta_2(d/hd) + \varepsilon \quad (11)$$

$$\frac{d}{\sqrt{h}} = \beta_0 + \beta_1\left(\frac{1}{d}\right) + \beta_2(d^2) + \varepsilon \quad (12)$$

$$h = [\beta_0 + \beta_1(hd)] e^{-\beta_2(\sqrt{d})} + \varepsilon \quad (13)$$

$$h = [\beta_0 + \beta_1(hd)] \{1 - e^{-\beta_2(d)}\} + \varepsilon \quad (14)$$

$$h = \beta_1 \left\{ 1 - e^{-\beta_2\left(\frac{d}{hd}\right)} \right\} + \varepsilon \quad (15)$$

Onde: h é a altura total em metros; d é o diâmetro medido a 1,3m do solo (cm); ln é o logaritmo neperiano; β_0 , β_1 e β_2 são os coeficientes de regressão estimados; hd é a altura dominante; e é a base neperiana; ε é o erro do modelo.

As equações 1, 2, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 13, 14 e 15 utilizam a altura dominante ou razões entre diâmetro e altura dominante como variáveis preditoras, denominadas de modelos regionais. A inclusão de hd aumenta a precisão das estimativas em plantios clonais, pois atua como indicador da qualidade do sítio (Andrade et al., 2023). A equação 6 é o modelo de Campos et al. (1987) validado em Andrade e

Duarte (2021) para híbridos de *Eucalyptus* no Cerrado.

As equações baseadas em Curtis (1967) e modelos lineares simples são citadas como modelos de comparação para demonstrar que, embora tradicionais, podem ser menos eficazes que modelos com variáveis auxiliares. As equações de modelos não lineares (M13, M14 e M15), como o de Chapman-Richards e variações exponenciais, são utilizados para representar o crescimento biológico de forma assintótica, conforme sugerido nas estratégias de ajuste de Ribeiro et al. (2010).

Avaliação e seleção dos modelos

O desempenho das equações hipsométricas foi avaliado a partir do ajuste inicial de quinze modelos, utilizando-se o conjunto completo de dados provenientes das 11 unidades amostrais, totalizando 88 observações. A seleção dos modelos mais adequados fundamentou-se em critérios de qualidade de ajuste amplamente empregados em estudos hipsométricos, sendo eles: coeficiente de determinação ajustado (R^2_{aj}); erro padrão residual (EPR): expresso em metros (m) e em porcentagem (%); e a Análise gráfica dos resíduos em função do diâmetro.

Como observado por Andrade et al. (2023), a utilização exclusiva de R^2_{aj} e EPR como critérios de seleção poderia levar à escolha de equações estatisticamente menos adequadas. Por isso, modelos com melhor ajuste foram submetidos à inspeção visual de resíduos e validação posterior com dados independentes, utilizando critérios complementares.

Validação dos modelos

Após o ajuste inicial, as equações com melhor desempenho foram submetidas à validação independente, utilizando-se um conjunto de dados distinto daquele empregado no ajuste, com o objetivo de avaliar a capacidade preditiva dos modelos e reduzir o risco de sobreajuste. Para o ajuste, foram utilizados dados de 56 árvores provenientes de parcelas do inventário florestal, distribuídas entre os clones E224 (três parcelas), I144 (duas parcelas), E1428 (uma parcela) e VM58 (duas parcelas). A validação foi realizada com um conjunto independente composto por 32 árvores oriundas de parcelas não utilizadas no ajuste, considerando-se uma parcela por clone, reservado exclusivamente para a avaliação do desempenho preditivo das equações. Na etapa de validação, foram calculados,

para cada modelo, indicadores estatísticos amplamente empregados na avaliação do desempenho preditivo de equações hipsométricas, conforme procedimentos descritos por Tomé, Ribeiro e Faias (2007, apud ANDRADE et al., 2023) e por Andrade et al. (2015). Sendo os critérios utilizados:

$$MQRp = \frac{\sum_{i=1}^n (resp_i)^2}{n}$$

$$SQRpR = \sum_{i=1}^n \left(\frac{resp_i}{hp_i} \right)^2$$

$$IQ = Q_3 - Q_1$$

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (h_i)(hp_i) - \frac{(\sum_{i=1}^n h_i)(\sum_{i=1}^n hp_i)}{n}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (h_i - h)^2 \sum_{i=1}^n (hp_i - h)^2}}$$

$$resp_i = h_i - hp_i$$

Em que MQRp é a média dos quadrados dos resíduos de predição; SQRpR é a soma do quadrados dos resíduos de predição relativos; IQ é o intervalo interquartil entre o primeiro quartil (Q_1) e o terceiro quartil (Q_3) de resp; r é a correlação linear múltipla; resp_i é o resíduo de predição entre altura real e altura predita da i-ésima árvores; hpi é a altura predita da i-ésima árvore pela aplicação da equação hipsométrica gerada com dados independentes dos dados da sua estimativa; n é o número total de árvores.

Adicionalmente, para cada critério de validação adotou-se um sistema de classificação em classes, no qual a amplitude de classe foi definida pela equação:

$$Ac = \frac{(máx - min)}{k} \quad (16)$$

Em que, máx e min são valores máximo e mínimo de cada critério entre os modelos; k é o número de equações avaliadas.

Os modelos foram comparados quanto à acurácia, precisão e estabilidade dos erros de predição com base nos indicadores estatísticos e no sistema de classificação por classes, definido a partir da amplitude de classe (Ac). As notas atribuídas a cada critério foram somadas, resultando na nota total (Nt), sendo considerados superiores os modelos com maiores valores de Nt.

As equações com melhor desempenho na validação foram, então, ajustadas separadamente para cada clone, com o objetivo de verificar a consistência do desempenho em nível clonal. A comparação entre os ajustes baseou-se no coeficiente de determinação

ajustado (R^2_{aj}), no erro percentual relativo (EPR) e na análise gráfica dos resíduos.

As análises estatísticas foram realizadas no ambiente RStudio, utilizando o *software* R for Windows (R Core Team, 2025), por meio das funções *lm* para modelos lineares e linearizados e *nls* para modelos não lineares.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A seleção de modelos hipsométricos adequados é fundamental para a obtenção de estimativas precisas de altura em povoamentos florestais, com implicações diretas no planejamento do manejo e na quantificação de estoques volumétricos. Com base na análise conjunta do coeficiente de determinação ajustado (R^2_{aj}), do erro percentual relativo (EPR) e da distribuição dos resíduos, os modelos M2, M6, M10, M11 e M14 apresentaram melhor desempenho estatístico e comportamento biologicamente consistente, sendo selecionados para a etapa de validação independente. Os valores de R^2_{aj} dos modelos selecionados variaram entre 0,7196 (M11) e 0,7507 (M6), com EPR entre 7,98% (M6) e 8,46% (M11).

Esses índices são coerentes com os reportados por Ferraz Filho et al. (2018), que ao avaliarem modelos hipsométricos em plantios de *Eucalyptus* sp. no Brasil, obtiveram R^2_{aj} superiores a 0,70 em modelos que incluíam a altura dominante como covariável. Destaca-se que equações com estrutura logarítmica e aquelas baseadas em razões e transformações recíprocas tendem a apresentar maior capacidade explicativa da variabilidade da altura, padrão já amplamente documentado em estudos com *Eucalyptus* (Ribeiro et al., 2010; Ferraz Filho et al., 2018).

O modelo M6 destacou-se pelo menor erro percentual relativo, indicando elevada precisão preditiva, enquanto os modelos M10 e M14 apresentaram desempenho equilibrado entre ajuste e estabilidade dos erros. O modelo M11, embora não tenha apresentado os maiores valores de R^2_{aj} , foi incluído por apresentar coerência biológica e padrão de resíduos homogêneo ao longo das classes diamétricas, critério essencial para a aplicação operacional de equações hipsométricas (Burkhart & Tomé, 2019; Soares et al., 2022).

Tabela 1. Coeficientes estimados e estatísticas de ajuste dos modelos hipsométricos testados para *Eucalyptus*.

Equação	β_0	β_1	β_2	R^2	R^2_{aj}	EPR (m)	EPR (%)
1	3,5593	0,5948	0,6959	0,7275	0,7210	1,26	08,44
2	2,3986	-5,3118	0,0461	0,7524	0,7496	1,20	08,06
3	3,2601	-6,6754	—	0,5876	0,5800	1,55	10,41
4	0,9735	0,6913	—	0,5660	0,5609	1,59	10,68
5	3,2307	0,0090	-6,5918	0,5876	0,5779	1,55	10,41
6	1,1191	-5,3268	0,7292	0,7565	0,7507	1,19	07,98
7	-0,4815	0,0234	0,7320	0,6878	0,6804	1,35	09,03
8	0,4779	0,5885	—	0,7056	0,6987	1,31	08,77
9	6,8576	1,4325	-12,4052	0,7070	0,7001	1,30	08,75
10	0,3368	3,3579	-0,0063	0,7531	0,7473	1,20	08,03
11	-2,9208	1,3347	3,1275	0,7260	0,7196	1,26	08,46
12	2,6744	-5,0853	0,0060	0,7887	0,7837	1,56	10,49
13	1,5457	0,2643	-0,2695	0,7158	0,7091	1,29	08,67
14	5,0729	0,8737	0,1262	0,7530	0,7472	1,20	08,08
15	—	0,9234	5,0290	0,5730	0,5704	1,57	10,54

Em que: β_0 , β_1 e β_2 são os coeficientes estimados da regressão; R^2 = coeficiente de determinação; R^2_{aj} = coeficiente de determinação ajustado; EPR = erro padrão residual em metros (m) e em porcentagem (%).

A seleção dessas cinco equações para a etapa de validação permitiu verificar se o desempenho observado na fase de ajuste se mantém em dados independentes, procedimento recomendado para

reduzir o risco de sobreajuste e assegurar maior confiabilidade às estimativas hipsométricas (Burkhart & Tomé, 2019; Soares et al., 2022).

Validação dos modelos hipsométricos

Os cinco modelos selecionados (M2, M6, M10, M11 e M14) foram submetidos à validação independente com dados não utilizados no ajuste. Entre eles, a equação M6 apresentou o melhor

desempenho global (Tabela 2), combinando elevado coeficiente de determinação ajustado, menor erro percentual relativo e distribuição biologicamente coerente dos resíduos ao longo do gradiente diamétrico.

Tabela 2. Critério Estatístico da Validação.

Eq.	MQRp	SQRpR	IQ	r
2	0,9933327	0,1629493	1,255634	0,8990459
6	0,9714817	0,1602382	1,318673	0,9038443
10	0,9532100	0,1552980	1,401522	0,9042267
11	1,3600000	0,2510000	1,501000	0,8880000
14	0,9734241	0,1642289	1,292890	0,8975334

Notas do Critério Estatístico					
Eq.	MQRp	SQRpR	IQ	r	Nt
2	5	5	5	4	19
6	5	5	5	4	19
10	5	5	4	5	19
11	5	5	3	4	17
14	5	5	4	4	18

Em que: Eq.: número de equação; MQRp: média dos quadrados dos resíduos de predição; SQRpR: soma dos quadrados dos resíduos de predição relativos; IQ: intervalo interquartil entre o primeiro quartil (Q1) e o terceiro quartil (Q3) dos resíduos de predição; r: é a correlação linear múltipla; nt: notas totais.

Corroborando os resultados de Andrade e Duarte (2021), este estudo demonstra que a equação 10, oferece uma forma funcional diferente, mas igualmente flexível, que também suaviza a variância dos erros e representa bem o comportamento assintótico da altura com o aumento do diâmetro. Por isso, ainda que tenha desempenho muito próximo ao da M6, ela foi mantida como modelo alternativo e, sobretudo, como candidata para ajustes por clone, permitindo comparar se certos materiais genéticos respondem melhor a essa parametrização específica. O modelo M2, apesar de ter atingido pontuação total equivalente à de M6 e M10 (19 pontos), apresentou maior dispersão interquartilica (IQ = 1,2556) e foi preterido em favor da maior regularidade biológica apresentada por M6.

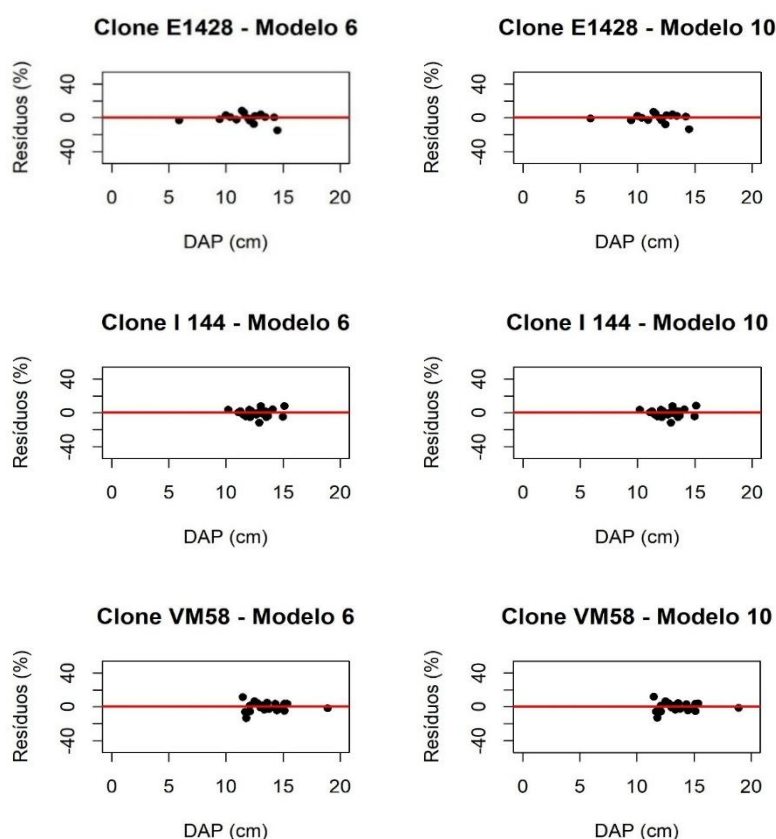
Esses resultados indicam que tanto M6 quanto M10 apresentam elevada estabilidade e capacidade preditiva. Por apresentarem desempenho superior e equivalente na validação, ambos os modelos foram selecionados para ajuste por clone, visando avaliar seu comportamento em diferentes materiais genéticos. A elevada correlação entre alturas observadas e preditas ($r > 0,90$) e os baixos valores de

MQRp e SQRpR confirmam a capacidade preditiva dos modelos M6 e M10, reduzindo o risco de sobreajuste e garantindo estimativas confiáveis em dados não utilizados no ajuste original (Andrade et al., 2015; Andrade et al., 2023).

A Tabela 3 e a Figura 2, evidenciam que ambas as equações apresentam bom desempenho na estimativa de altura; contudo, o clone 224 apresentou maior EPR, indicando menor precisão. Essa diferença pode ser atribuída a diversos fatores, incluindo o número de árvores por clone utilizadas no ajuste, a variabilidade genética intrínseca do material e a resposta diferencial ao ambiente do sítio. Esses resultados são consistentes com estudos que destacam a variabilidade genética e ambiental como fatores determinantes no desempenho de modelos de altura em clones florestais. Santos et al. (2015) e Ferraz Filho et al. (2018) demonstraram que a interação genótipo e ambiente influencia diretamente a relação altura-diâmetro em clones de *Eucalyptus*, podendo exigir ajustes específicos por material genético para garantir maior precisão preditiva, especialmente em regiões com déficit hídrico sazonal pronunciado como o Cerrado tocantinense (Andrade et al., 2023).

Tabela 3. Critérios de qualidade para os modelos ajustados por clone.

Clone	Eq.	R ² aj	EPR (m)	EPR (%)
224	6	0,493	1,867	14,31
	10	0,500	1,883	14,20
E1428	6	0,790	0,745	05,83
	10	0,819	0,692	05,41
I 144	6	0,087	0,730	04,61
	10	0,073	0,742	04,65
VM58	6	0,374	0,857	05,08
	10	0,376	0,855	05,08

**Figura 2.** Gráficos de Resíduos dos modelos de equações por clone.

CONCLUSÃO

O estudo permitiu identificar modelos eficazes para a estimativa da altura total em plantios clonais de *Eucalyptus* no Cerrado do estado do Tocantins. Os modelos M6 e M10 apresentaram desempenho superior na estimativa da altura total em plantios clonais, com maior R²aj e menor EPR, garantindo precisão e confiabilidade. A análise por clone mostrou variação de precisão, sendo os clones E1428 e VM58 mais confiáveis, enquanto o 224 apresentou maior EPR, possivelmente devido à

variabilidade genética, ao número de árvores asantostadas e à resposta ao ambiente.

A aplicação desses modelos permite reduzir custos e tempo de medição, otimizar inventários e fornecer estimativas consistentes de volume. Recomenda-se validar os modelos em diferentes idades e sítios e explorar ajustes específicos por clone para ampliar sua generalização e aplicabilidade no manejo florestal. Como passo seguinte, recomenda-se a validação desses modelos em diferentes idades e sítios no bioma Cerrado para verificar a sua

generalização biológica em horizontes de planejamento mais amplos.

AGRADECIMENTOS

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela bolsa de pesquisa.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Andrade, V. C. L. de, & Duarte, V. B. R. (2021). Equações hipsométricas para um híbrido entre *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus camaldulensis* no cerrado tocantinense. **Revista De Ciências Agro-Ambientais**, 18(2), 111-117. <https://doi.org/10.5327/rcaa.v18i2.4016>

Andrade, V. C. L. D., Schmitt, T., Carvalho, S. D. P. C. E., Binotti, D. H. B., & Calegario, N. (2023). Modelos regionais de relação hipsométrica avaliados para plantio clonal de eucalipto em área de Cerrado. **Ciência Florestal**, 33(2), e67995. <https://doi.org/10.5902/1980509867995>

Andrade, V. C. L.; Kroetz, E.A.; Nicola, A.; Souza, P.B.; Nohama, F.K.; Leite, H.G.; Binoti, D.H.B.; Binoti, M.L.M.S. Amostragem e agrupamento de dados de relação hipsométrica em inventários florestais de Cerrado Tocantinense. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v.35, n.83, p.228-238, 2015.

Burkhardt, Harold & Tomé, Margarida. (2012). **Modeling Forest Trees and Stands**. DOI: 10.1007/978-90-481-3170-9

Burkhardt, H. E.; Tomé, M. **Modeling forest trees and stands**. 2. ed. Dordrecht: Springer, 2019.

Wardani, I. et al. Comparison of Two Linear Regression Models for Predicting the Literacy Development Index in Indonesia. **Brilliance: Research of Artificial Intelligence**, 5(2), 2025.

Curtis, R. O. Height-diameter and height-diameter-age equations for second-growth Douglas-fir. **Forest Science**, v. 13, 1967.

Dedecker, J.; Guedj, O.; Taupin, M.-L. **Asymptotic confidence interval for R2 in multiple linear regression**. arXiv, 2024.

EVALUATION OF REGRESSION MODELS: model assessment, model selection and generalization error. **Machine Learning and Knowledge Extraction**, v. 1, n. 1, p. 521–551, 2019.

Ferraz Filho, A. C., Mola-Yudego, B., Ribeiro, A., Scolforo, J. R. S., Loos, R. A., & Scolforo, H. F. (2018). Height-diameter models for *Eucalyptus* sp. plantations in Brazil. **Cerne**, 24(1), 9-17. <https://doi.org/10.1590/01047760201824012466>

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Produção da Extração Vegetal e de Silvicultura**. Rio de Janeiro, 2025. Disponível em: <https://sidra.ibge.gov.br>. Acesso em: 28 mar. 2026.

R Core Team (2025). R: A Language and Environment for Statistical Computing. **R Foundation for Statistical Computing**, Vienna, Austria. <https://www.R-project.org/>.

Ribeiro, A., Ferraz Filho, A. C., Mello, J. M. D., Ferreira, M. Z., Lisboa, P. M. M., & Scolforo, J. R. S. (2010). Estratégias e metodologias de ajuste de modelos hipsométricos em plantios de *Eucalyptus* sp. **Cerne**, 16, 22-31. <https://doi.org/10.1590/S0104-77602010000100003>.

Santos, G. A.; Resende, M. D. V.; Silva, L. D.; Higa, A.; Assis, T. F. Interação genótipos × ambientes para produtividade de clones de *Eucalyptus* L'Hér. no Estado do Rio Grande do Sul. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 39, n. 1, p. 81–91, 2015.

Soares, C. P. B. et al. **Mensuração e inventário florestal**. 3. ed. Viçosa: UFV, 2022.