

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
DE MINAS GERAIS – *CAMPUS* SÃO JOÃO EVANGELISTA
BACHARELADO EM ENGENHARIA FLORESTAL

Bruna Aguiar Lopes

**MODELAGEM VOLUMÉTRICA PARA COLMOS DE *Dendrocalamus giganteus*
WALL. EX MUNRO (POACEAE)**

São João Evangelista

2025

BRUNA AGUIAR LOPES

**MODELAGEM VOLUMÉTRICA PARA COLMOS DE *Dendrocalamus giganteus*
WALL. EX MUNRO (POACEAE)**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao curso de Bacharelado em Engenharia
Florestal do Instituto Federal de Minas Gerais
– *Campus* São João Evangelista para obtenção
do grau de bacharel em Engenharia Florestal.

Orientador: Prof. Dr. Bruno Oliveira Lafetá

São João Evangelista

2025

L864m Lopes, Bruna Aguiar.
Modelagem volumétrica para colmos de *Dendrocalamus giganteus*
wall. ex munro (POACEAE)/ Bruna Aguiar Lopes – 2025.

26f.: il.

Orientador: Dr. Bruno Oliveira Lafetá.

Trabalho de Conclusão de Curso (bacharelado em Engenharia
Florestal) – Instituto Federal Minas Gerais. *Campus* São João
Evangelista, 2025.

1. Regressões. 2. Volume aparente. 3. Volume lenhoso. I. Lopes,
Bruna Aguiar. II. Instituto Federal de Minas Gerais *Campus* SJE. III.
Título.

CDD 633.587

Catálogo: Esther Soares Cunha - CRB-6/4333

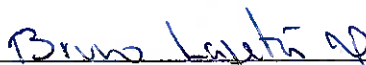
BRUNA AGUIAR LOPES

**MODELAGEM VOLUMÉTRICA PARA COLMOS DE *Dendrocalamus giganteus*
WALL. EX MUNRO (POACEAE)**

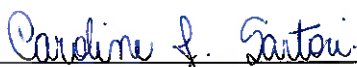
Trabalho de conclusão de curso apresentado ao
Instituto Federal de Minas Gerais – Campus
São João Evangelista, como exigência parcial
para obtenção do título de Bacharel em
Engenharia Florestal.

Aprovada em 03/04/2025

BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. Bruno de Oliveira Lafetá (Orientador)
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais – *Campus* São
João Evangelista



Prof. Dr^a. Caroline Junqueira Sartori
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais – *Campus* São
João Evangelista



Prof.^a Dr^a. Natália Risso Fonseca
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais – *Campus* São
João Evangelista

**São João Evangelista
2025**

AGRADECIMENTOS

A jornada até a conclusão deste trabalho foi marcada por desafios, aprendizados e muitas conquistas. Por isso, não poderia deixar de expressar minha profunda gratidão a todos que, de alguma forma, contribuíram para que este momento se tornasse realidade.

Primeiramente, agradeço a Deus, por me dar força, paciência e perseverança ao longo dessa caminhada. Sem sua luz e direcionamento, nada disso seria possível. Aos meus familiares, pelo amor incondicional, apoio e incentivo em cada etapa. Obrigado por acreditarem em mim mesmo nos momentos em que duvidei das minhas próprias capacidades.

Ao meu orientador Bruno Oliveira Lafetá, por sua paciência, dedicação e ensinamentos valiosos. Suas orientações foram fundamentais para o desenvolvimento deste trabalho e para meu crescimento acadêmico e profissional.

Aos professores do curso, que compartilharam conhecimento e despertaram em mim a paixão pela área. Cada aula, cada conselho e cada desafio proposto foram essenciais para minha formação.

Aos amigos e colegas de curso, pela troca de experiência, pelo apoio mútuo e pelas risadas que tornaram essa trajetória mais leve e memorável. Ter pessoas tão incríveis ao meu lado fez toda a diferença.

Por fim, a todos que, de alguma forma, participaram dessa caminhada, meu muito obrigada. Cada um de vocês fez parte desta conquista, e sou imensamente grata por isso.

RESUMO

Investigações científicas sobre a quantificação volumétrica de bambus são imprescindíveis na definição de estratégias de gestão sustentáveis. Objetivou-se avaliar diferentes modelos de regressão para a estimativa do volume de colmos de *Dendrocalamus giganteus* Munro (Poaceae). Realizou-se a cubagem rigorosa de 16 colmos dentro dos intervalos de 6,05 a 17,28 cm de DAP e de 10,3 a 28,0 m de altura total. Testaram-se 15 modelos de regressão para a estimativa dos volumes lenhoso e aparente. As equações obtidas a partir dos modelos lineares logarítmicos de Spurr e Schumacher-Hall apresentaram todos os parâmetros significativos pelo teste t ($p \leq 0,05$) e se mostraram mais acuradas, com poucos desvios e forte coeficiente de correlação ($r_{\hat{Y}} > 0,96$; $p \leq 0,05$). Conclui-se que a transformação logarítmica de variáveis é uma ferramenta operacionalmente viável na busca de atendimento a premissas do método dos mínimos quadrados ordinários e melhoria preditiva de modelos lineares. A linearização de modelos não lineares por meio da aplicação de propriedades logarítmicas é uma alternativa promissora para a expressão do efeito estatístico de parâmetros especificados. Os ajustes dos modelos de Spurr e Schumacher-Hall podem ser usados na sua forma logaritmizada, com precisão e sem viés.

Palavras-chave: regressões. volume aparente. volume lenhoso.

ABSTRACT

Scientific investigations on the volumetric quantification of bamboo are essential in defining sustainable management strategies. This work aimed to evaluate different regression models for volume estimate of *Dendrocalamus giganteus* Munro (Poaceae) culms. Rigorous cubing of 16 culms was realized within the intervals of 6.05 to 17.28 cm dbh and 10.3 to 28.0 m total height. Fifteen regression models were tested to woody and apparent volumes estimate. Equations obtained from the Spurr and Schumacher-Hall logarithmic linear models presented all significant parameters using t test ($p \leq 0.05$) and were more accurate, with few deviations and strong correlation coefficient ($r_{\hat{Y}Y} > 0.96$; $p \leq 0.05$). It is concluded that logarithmic transformations of variables is an operationally viable tool in the search meeting of ordinary least squares method premises and predictive improvement of linear models. Nonlinear models linearization through application of logarithmic properties is a promising alternative for expressing statistical effect of specified parameters. Adjustments of Spurr and Schumacher-Hall models can be used in their logarithmized form, accurately and without bias.

Keywords: regressions. apparent volume. woody volume.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	8
2 MATERIAIS E MÉTODOS.....	10
3 RESULTADOS.....	13
4 DISCUSSÃO.....	17
5 CONCLUSÕES.....	20
REFERÊNCIAS.....	21

1 INTRODUÇÃO

A crescente conscientização da sociedade para os problemas ecológicos tem estimulado a demanda por produtos sustentáveis, evidenciando a importância de mais investigações científicas para o detalhamento e precisão da quantificação de recursos naturais (STOCHERO *et al.*, 2023; DANTAS *et al.*, 2024). A modelagem do volume individual de plantas constitui uma etapa imprescindível na rotina do mensuracionista, cuja qualidade preditiva é capaz de influenciar a tomada de decisões e administração racional de estoque do componente lenhoso (LAFETÁ *et al.*, 2021).

O volume é um atributo biométrico que reflete o espaço tridimensional ocupado por lenho em plantas vasculares, porém a sua estimativa individual não é uma tarefa trivial (LAFETÁ *et al.*, 2021; LIMA *et al.*, 2021). Embora haja muitas pesquisas concernentes à modelagem do volume de árvores, ainda persistem dúvidas sobre a quantificação volumétrica destinadas a colmos de bambu. Essa lacuna no conhecimento pode ser atribuída à escassez de dados biométricos disponíveis e/ou à limitada compreensão de suas potencialidades econômicas no Brasil.

Dendrocalamus giganteus Munro (Poaceae), popularmente denominado como bambu gigante, é uma espécie originária da Malásia (AVH, 2024), entouceirante e de rápido crescimento, utilizada em projetos de recuperação ambiental, indústrias de movelaria, construção civil, energia, celulose e papel (SINGNAR *et al.*, 2015; LIMA *et al.*, 2021; SILVA *et al.*, 2022; KALANZI; MWANJA, 2023; STOCHERO *et al.*, 2023; RIVERA-SEGURA *et al.*, 2024). Os seus múltiplos usos são reconhecidos pela International Bamboo and Rattan Organization (INBAR), que se dedica a promover o desenvolvimento responsável e comércio desses recursos naturais em nível global.

Os colmos de *D. giganteus* consistem em agrupamentos de segmentos lenhosos intermodais ocos, e sua quantificação volumétrica é fundamental para o planejamento e ações de gestão com vistas a manutenções de cultivo e comércio de produtos derivados. O volume lenhoso dos colmos é útil na estimativa das produções de fibra, carbono e biomassa, uma vez que representa a parte efetivamente aproveitável da planta (SANQUETTA *et al.*, 2015). Já informações do volume aparente, isto é, o volume total incluindo o espaço interno vazio, auxilia a logística de campo, transporte e demais processos de industrialização.

A análise de regressão tem sido o procedimento mais recorrente para a modelagem volumétrica arbórea. Diversos modelos lineares e não lineares para o estabelecimento de relações funcionais e obtenção de estimativas individuais de volume estão descritos na

literatura florestal, como os propostos por Husch, Kopecky-Gerhardt, Hohenadl-Krenn, Spurr e Schumacher-Hall (CAMPOS; LEITE, 2017; SANTOS *et al.*, 2019; MARTINS *et al.*, 2020)

Modelos lineares são rotineiramente ajustados pelo método dos Mínimos Quadrados Ordinários (MQO), que prioriza a minimização da soma de quadrados dos resíduos para a estimativa dos seus parâmetros (GUJARATI *et al.*, 2019; BURTON, 2021; YANG, 2023). Por outro lado, essa metodologia possui diversas premissas estatísticas restritivas, cujas violações provocam a introdução de vieses, baixo desempenho preditivo e ineficiência do modelo matemático (FARIAS *et al.*, 2021). As premissas clássicas incluem resíduos normalmente distribuídos (suposição de normalidade), variabilidade residual constante (suposição de homocedasticidade) e independência entre as observações (suposição de independência de resíduos) (SANQUETTA *et al.*, 2015; SCHREIBER *et al.*, 2022).

Nas ocasiões em que há violações de uma ou mais premissas da análise paramétrica, é possível aplicar transformações às variáveis, como logarítmicas e raízes (BURTON, 2021). Propriedades logarítmicas também são exaustivamente exploradas para a linearização de modelos não lineares, em virtude da simplicidade operacional e/ou potencial de estabilização da variância residual; mais detalhes em Moore *et al.*, (2024). Essa linearização logarítmica tem sido particularmente realizada em modelos não lineares de potência, nos quais as relações funcionais da variável dependente (resposta) são proporcionais a uma potência específica de uma ou mais variáveis independentes (preditoras).

No entanto, linearizações logarítmicas não necessariamente resultam em parâmetros mais apropriados para o modelo não linear original (ZAND; ABYANEH, 2020). É relevante destacar que o progresso da tecnologia computacional tem viabilizado continuamente o ajuste de modelos não lineares, reduzindo a dispersão residual por meio de procedimentos numéricos iterativos de otimização, tais como os métodos de Levenberg-Marquardt e Gauss-Newton (MOORE *et al.*, 2024). A regressão não linear lida diretamente com modelos matemáticos originais, mesmo não linearizáveis, dispensando o emprego de propriedades logarítmicas (ZAND; ABYANEH, 2020; HEINTZMANN *et al.*, 2024).

Mediante exposto, as seguintes hipóteses foram testadas: I – a transformação logarítmica de variáveis favorece o emprego do método dos mínimos quadrados ordinários em ajustes de modelos lineares e; II – a linearização de modelos volumétricos não lineares baseada em propriedades logarítmicas contribui para a expressão de efeito estatístico de parâmetros. O objetivo do presente trabalho foi avaliar diferentes modelos de regressão para a estimativa do volume de colmos de *D. giganteus*.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

O trabalho foi conduzido no município de São João Evangelista – MG, em dois fragmentos de Mata Atlântica localizados em área do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais. O clima da região é do tipo Cwa (temperado chuvoso mesotérmico) pelo sistema internacional de Köppen, com verão chuvoso e inverno seco. As médias anuais de temperatura e precipitação são de 21,2°C e 1.000 mm, respectivamente (CLIMATE-DATA.ORG, 2024).

Os fragmentos florestais foram classificados como estágio médio de regeneração segundo a Portaria 392 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA, 2007); os fragmentos F1 (18°32'58,75" Sul e 42°45'51,67" Oeste – Datum Sirgas 2000) e F2 (18°32'50,75" Sul e 42°45'50,75" Oeste – Datum Sirgas 2000) abrangeram áreas de 1,79 e 1,08 ha, respectivamente. Estabeleceram-se três touceiras de *D. giganteus*, provenientes de um plantio de enriquecimento na década de 1990, para a cubagem de colmos; duas touceiras no fragmento F1 e outra em F2. A seleção dessas touceiras se baseou em um inventário exploratório para a identificação da máxima amplitude diamétrica de colmos, além da acessibilidade ao longo dos fragmentos florestais.

A cubagem contemplou o corte de 16 colmos dentro dos intervalos biométricos de 6,05 a 17,28 cm de diâmetro à 1,30m de altura do solo (DAP) e de 10,3 a 28,0 m de altura total (H). As informações de diâmetro e espessura lenhosa dos colmos foram obtidas a cada metro e até o diâmetro mínimo comercial de 5 cm, com auxílio de suta, trena e paquímetro digital de precisão 1/10 de mm.

Os volumes lenhoso e aparente das seções foram calculados empregando a fórmula clássica de Smalian, que se pauta na relação multiplicativa entre o comprimento de seção e a média aritmética das áreas seccionais em suas extremidades. Assumiu-se como volume aparente o espaço total ocupado por material lenhoso, incluindo o vazio interno dos colmo (volume lenhoso + volume vazio).

Testaram-se 15 modelos de regressão para a estimativa dos volumes lenhoso e aparente de colmos de *D. giganteus*, discriminados na Tabela 1. Os modelos foram assim agrupados em categorias: Categoria 1 – modelos lineares não logaritmizados (L); Categoria 2 – modelos lineares logaritmizados (LL) e; Categoria 3 – modelos não lineares (NL). Os modelos da Categoria 2 equivalem às versões linearizadas pela aplicação de propriedades logarítmicas àqueles da Categoria 3. Todas as variáveis predictoras, tanto na sua configuração

original quanto logaritmizada (logaritmo neperiano, ln), foram submetidas à análise de correlação de Pearson (r) com a sua variável resposta correspondente.

Tabela 1. Modelos testados para a estimativa dos volumes lenhoso e aparente (m³ ind-1) de colmos de *D. giganteus*.

Mod	Forma de ajuste	Autor/Forma
Categoria 1 – modelos lineares não logarítmicos		
M1	$V = \beta_0 + \beta_1 DAP + \varepsilon$	Husch/L
M2	$V = \beta_0 + \beta_1 DAP^2 + \varepsilon$	Kopezky-Gerhardt/L
M3	$V = \beta_0 + \beta_1 DAP + \beta_2 DAP^2 + \varepsilon$	Hohenald-Kreen/L
M4	$V = \beta_0 + \beta_1 DAP^2 H + \varepsilon$	Spurr/L
M5	$V = \beta_0 + \beta_1 DAP + \beta_2 H + \varepsilon$	Schumacher-Hall/L
Categoria 2 – modelos lineares logarítmicos		
M6	$Ln(V) = \beta_0 + \beta_1 Ln(DAP) + Ln(\varepsilon)$	Husch/LL
M7	$Ln(V) = \beta_0 + \beta_1 Ln(DAP^2) + Ln(\varepsilon)$	Kopezky-Gerhardt/LL
M8	$Ln(V) = \beta_0 + \beta_1 Ln(DAP) + \beta_2 Ln(DAP^2) + Ln(\varepsilon)$	Hohenald-Kreen/LL
M9	$Ln(V) = \beta_0 + \beta_1 Ln(DAP^2 H) + Ln(\varepsilon)$	Spurr/LL
M10	$Ln(V) = \beta_0 + \beta_1 Ln(DAP) + \beta_2 Ln(H) + Ln(\varepsilon)$	Schumacher-Hall/LL
Categoria 3 – modelos não lineares		
M11	$V = \beta_0 DAP^{\beta_1} \varepsilon$	Husch/NL
M12	$V = \beta_0 DAP^{2\beta_1} \varepsilon$	Kopezky-Gerhardt/NL
M13	$V = \beta_0 DAP^{\beta_1} DAP^{2\beta_2} \varepsilon$	Hohenald-Kreen/NL
M14	$V = \beta_0 (DAP^2 H)^{\beta_1} \varepsilon$	Spurr/NL
M15	$V = \beta_0 DAP^{\beta_1} H^{\beta_2} \varepsilon$	Schumacher-Hall/NL

Mod = modelos; β_0 , β_1 e β_2 = parâmetros dos modelos de regressão; ε = erro aleatório. L = modelo na forma linear não logaritimizada; LL = modelo na forma linear logaritimizada e; NL= modelo na forma não linear.

Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

A análise de regressão linear empregou o método dos mínimos quadrados ordinários (MQO), e a regressão não linear, o método iterativo de Levenberg-Marquardt. Os resíduos das regressões lineares foram submetidos aos testes de normalidade de resíduos segundo Shapiro-Wilk (SW), homogeneidade de variâncias por Breusch-Pagan (BP) e autocorrelação por Durbin-Watson (DW).

A qualidade de todos os ajustes foi avaliada de acordo com a significância de parâmetros pelo teste t, raiz quadrada do erro médio (RQEM), média dos desvios absolutos (MDA) e correlação linear entre valores observados e estimados (r_{YY}). A fim de preservar a integridade da especificação primária dos modelos, os parâmetros com ausência de significância estatística não foram removidos para o reajuste. Selecionaram-se as duas equações mais acuradas para a análise de inspeção gráfica por meio de superfície de resposta entre valores observados e estimados de volume.

Para diagnóstico de efeito estatístico, considerou-se o nível de significância de 5% de probabilidade. As análises estatísticas foram efetuadas com auxílio do software R versão 4.3.3 (R CORE TEAM, 2024), por meio dos pacotes Metrics (HAMNER; FRASCO, 2022), minpack.lm (ELZHOV *et al.*, 2023), stats (R CORE TEAM, 2024) e car (FOX *et al.*, 2023).

3 RESULTADOS

As variáveis biométricas predictoras se correlacionaram positivamente ($p \leq 0,05$) com o volume dos colmos de *D. giganteus* (Tabela 2). As variáveis predictoras que combinaram o quadrado do diâmetro e a altura dos colmos (Modelos M4, M9 e M14) tiveram as maiores correlações. As associações entre variáveis tenderam a ser mais fortes ($r > 0,96$; $p \leq 0,05$) nas suas configurações logaritmizadas, essencial para a qualidade preditiva da modelagem volumétrica. Em termos de correlação, os ganhos mais expressivos com a transformação logarítmica foram constatados nas associações entre a altura total e os volumes lenhoso e aparente, com incrementos de 9,21 e 11,23% em relação à configuração original, respectivamente.

Tabela 2. Correlações entre variáveis resposta e predictoras de modelos para a estimativa volumétrica de *D. giganteus*

Variáveis predictoras	Volumes não logaritmizados		Variáveis predictoras	Volumes logaritmizados	
	Lenhoso	Aparente		Lenhoso	Aparente
DAP	0,9416*	0,9399*	Ln(DAP)	0,9866*	0,9908*
DAP ²	0,9492*	0,9602*	Ln(DAP ²)	0,9865*	0,9907*
H	0,8854*	0,8711*	Ln(H)	0,9669*	0,9689*
DAP ² H	0,9601*	0,9797*	Ln(DAP ² H)	0,9915*	0,9950*

*Significativo pelo teste t ($p \leq 0,05$).

Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

Foram estabelecidas 30 relações funcionais para a estimativa volumétrica individual de colmos de *D. giganteus*, sendo 15 equações para a estimativa do volume lenhoso e o restante, para a estimativa do volume aparente. A aplicação da transformação logarítmica de variáveis dependentes e independentes que compuseram os modelos lineares testados contribuiu para o atendimento de todas as premissas do MQO (Tabela 3). Todas as equações lineares logarítmicas satisfizeram às premissas de normalidade dos resíduos, homogeneidade de variâncias e ausência de autocorrelação ($p > 0,05$). Os ajustes dos modelos lineares não logarítmicos resultaram em distribuição não normal dos resíduos ($p \leq 0,05$), exceto o ajuste de Kopezky-Gerhardt (modelo M2) para a estimativa do volume aparente.

Tabela 3. Valores de probabilidade da análise de premissas do método dos mínimos quadrados ordinários aplicada à modelagem linear volumétrica dos colmos de *D. giganteus*.

Modelo ajustado	Volume lenhoso	Volume aparente
-----------------	----------------	-----------------

	SW	BP	DW	SW	BP	DW
----- Categoria 1 – modelos lineares não logarítmicos -----						
M1	0,0016	0,3106	0,8620	0,0340	0,3920	0,4320
M2	0,0076	0,1159	0,6380	0,0562	0,1131	0,5020
M3	0,0058	0,2067	0,7500	0,0234	0,0892	0,6360
M4	0,0386	0,0507	0,0700	0,0064	0,1184	0,4200
M5	0,0015	0,6724	0,7200	0,0340	0,7515	0,3060
----- Categoria 2 – modelos lineares logarítmicos -----						
M6	0,8958	0,4278	0,5240	0,5097	0,4562	0,7780
M7	0,8787	0,4374	0,4460	0,5087	0,4425	0,7140
M8	0,9896	0,2631	0,5720	0,7269	0,7376	0,4240
M9	0,6970	0,3669	0,1900	0,6933	0,2733	0,1660
M10	0,7243	0,6358	0,2060	0,7366	0,4412	0,1860

SW = normalidade de resíduos pelo teste de Shapiro-Wilk (SW). BP = homogeneidade de variâncias pelo teste de Breusch-Pagan. DW = ausência de autocorrelação pelo teste de Durbin-Watson. Em negrito, valores de probabilidade maiores que 5%.

Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

As estatísticas e qualidade de ajuste dos modelos lineares ajustados para a estimativa volumétrica, que atenderam às premissas do MQO, e aqueles não lineares se encontram em sequência nas Tabelas 4 e 5. As estimativas volumétricas individuais de todas as equações se correlacionaram significativamente com os valores observados ($r_{\hat{y}y} > 0,94$; $p \leq 0,05$). As equações que se basearam exclusivamente em informações diamétricas demonstraram tendência a exibir mais desvios em comparação com aquelas que também incorporaram a altura total como componente preditor, indicando diferenças superiores a 15 e 30% para o RQEM e MDA, respectivamente.

Tabela 4. Estatísticas e qualidade de ajuste da modelagem do volume lenhoso de colmos de *D. giganteus*.

Modelo ajustado	β_0	β_1	β_2	RQEM	MDA	$r_{\hat{y}y}$
----- Categoria 2 – modelos lineares logarítmicos -----						
M6	-9,486590*	2,560366*	-	0,0111	0,0075	0,9458*
M7	-9,485451*	1,279944*	-	0,0111	0,0075	0,9457*
M8	-9,527399*	152,589365 ^{ns}	-75,005577 ^{ns}	0,0109	0,0074	0,9475*
M9	-10,051673*	0,871196*	-	0,0094	0,0054	0,9615*
M10	-10,020536*	1,794074*	0,817670*	0,0094	0,0055	0,9616*

----- Categoria 3 – modelos não lineares -----						
M11	0,000154 ^{ns}	2,300642*	-	0,0108	0,0074	0,9480*
M12	0,000154 ^{ns}	1,150357*	-	0,0108	0,0074	0,9480*
M13	0,000154 ^{ns}	-246,763200 ⁿ _s	124,532300 ^{ns}	0,0107	0,0073	0,9495*
M14	0,000041 ^{ns}	0,878587*	-	0,0093	0,0056	0,9614*
M15	0,000044 ^{ns}	1,818455*	0,801811 ^{ns}	0,0093	0,0057	0,9615*

* , ^{ns} Significativo e não significativo pelo teste t ($p \leq 0,05$), respectivamente. RQEM = raiz quadrada do erro médio. MDA = médias dos desvios absolutos. $r_{\hat{y}y}$ = coeficiente de correlação entre os volumes individuais observados e estimados pelas equações.

Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

Tabela 5. Estatísticas e qualidade de ajuste da modelagem do volume lenhoso de colmos de *D. giganteus*.

Modelo ajustado	β_0	β_1	β_2	RQEM	MDA	$r_{\hat{y}y}$
----- Categoria 1 – modelos lineares não logarítmicos -----						
M2	-0,050940*	0,001136*	-	0,0273	0,0188	0,9602*
----- Categoria 2 – modelos lineares logarítmicos -----						
M6	-10,271043*	3,191746*	-	0,0272	0,0177	0,9611*
M7	-10,269749*	1,595599*	-	0,0272	0,0177	0,9611*
M8	-10,310150*	146,973750 ^{ns}	-71,882450 ^{ns}	0,0282	0,0178	0,9579*
M9	-10,969440*	1,085290*	-	0,0195	0,0117	0,9807*
M10	-10,893037*	2,299092*	0,952504*	0,0194	0,0114	0,9809*
----- Categoria 3 – modelos não lineares -----						
M11	0,000079 ^{ns}	2,891764*	-	0,0264	0,0171	0,9628*
M12	0,000079 ^{ns}	1,445968*	-	0,0264	0,0171	0,9629*
M13	0,000078 ^{ns}	-246,169600 ⁿ _s	124,532300 ^{ns}	0,0258	0,0168	0,9646*
M14	0,000011 ^{ns}	1,136984*	-	0,0190	0,0116	0,9809*
M15	0,000012 ^{ns}	2,340077*	1,052064*	0,0189	0,0117	0,9810*

* , ^{ns} Significativo e não significativo pelo teste t ($p \leq 0,05$), respectivamente. RQEM = raiz quadrada do erro médio. MDA = médias dos desvios absolutos. $r_{\hat{y}y}$ = coeficiente de correlação entre os volumes individuais observados e estimados pelas equações.

Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

As equações dos volumes lenhoso e aparente, obtidas a partir dos modelos lineares logarítmicos de Spurr (modelo M9) e Schumacher-Hall (modelo M10), apresentaram todos os parâmetros significativos pelo teste t ($p \leq 0,05$) e se mostraram mais acuradas (Tabelas 4 e 5);

com baixos valores de RQEM e MDA, além de forte coeficiente de correlação ($r_{\hat{Y}Y} > 0,96$; $p \leq 0,05$). Portanto, ambos os modelos ajustados foram selecionados para as análises gráficas subsequentes (Figuras 1 e 2). A tendência de aumento do volume aparente em colmos de maiores dimensões foi mais pronunciada do que aquela intrínseca ao volume lenhoso; colmos de maiores dimensões denotaram mais proporção de volume vazio. O percentual de volume lenhoso tendeu ao decréscimo à medida que aumentou o diâmetro ($r = -0,9551$; $p \leq 0,05$) e altura total ($r = -0,9314$; $p \leq 0,05$) dos colmos de *D. giganteus*.

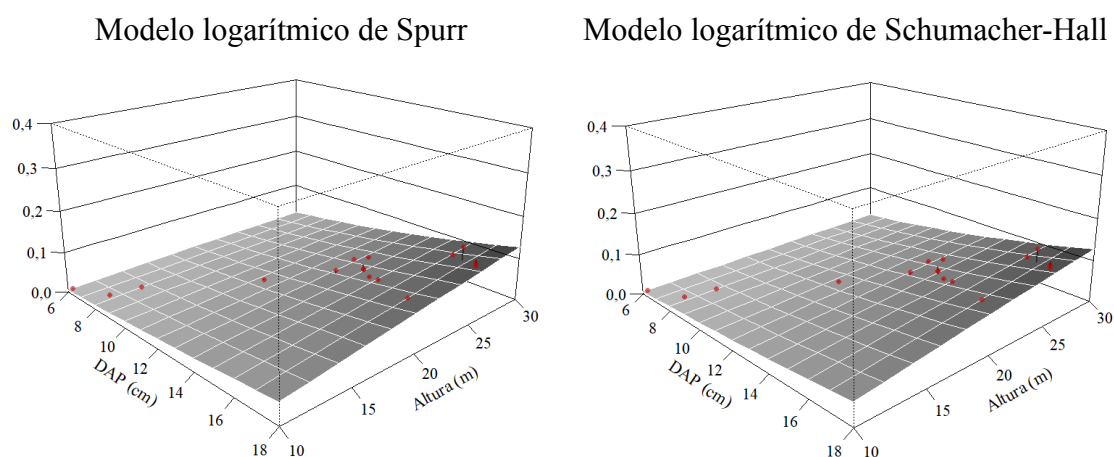


Figura 1. Superfícies de resposta do volume lenhoso ($\text{m}^3 \text{ind}^{-1}$, eixo z) de *D. giganteus* em função do DAP (cm, eixo x) e da altura total (m, eixo y) obtidas após ajuste dos modelos lineares logarítmicos de Spurr à esquerda e de Schumacher-Hall à direita; os pontos em vermelho representam os valores observados.
Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

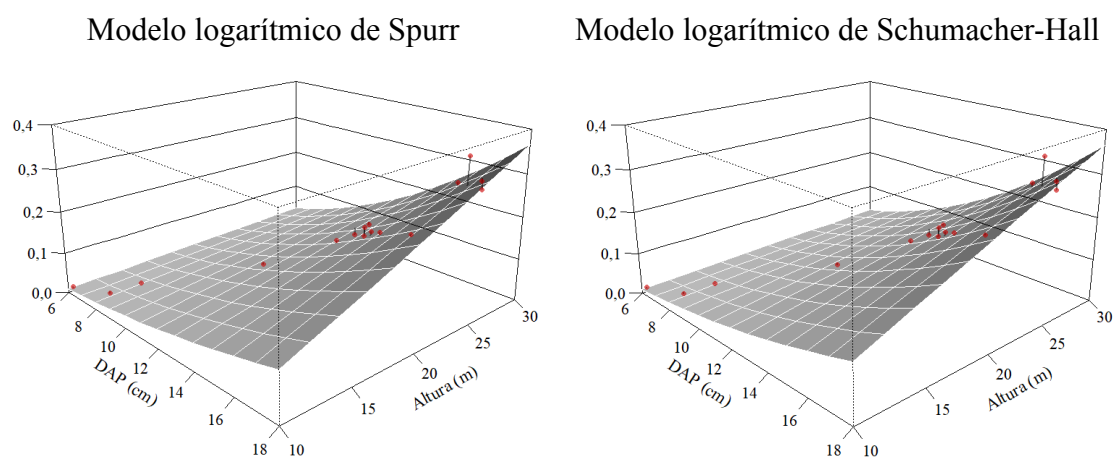


Figura 2. Superfícies de resposta do volume lenhoso ($\text{m}^3 \text{ind}^{-1}$, eixo z) de *D. giganteus* em função do DAP (cm, eixo x) e da altura total (m, eixo y) obtidas após ajuste dos modelos lineares logarítmicos de Spurr à esquerda e de Schumacher-Hall à direita; os pontos em vermelho representam os valores observados.
Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

4 DISCUSSÃO

A predileção pela utilização da regressão linear na estimativa biométrica vegetal tem sido respaldada pela sua aplicação frequente em pesquisas, facilidade de parametrização e interpretação estatística, além da ampla disponibilidade de pacotes e softwares estatísticos (SANQUETTA *et al.*, 2015; SANTOS *et al.*, 2019; BURTON, 2021; VARIN *et al.*, 2021; SCHREIBER *et al.*, 2022; ELZHOV *et al.*, 2023; R CORE TEAM, 2024). Contudo, é importante salientar que a transformação de variáveis para a modelagem linear deve ser vista com bastante cautela e pautada na compreensão da natureza dos dados e objetivos analíticos específicos a fim de assegurar a robustez e confiabilidade das conclusões.

A transformação logarítmica de variáveis se revelou uma eficiente estratégia para o atendimento das premissas do MQO, especialmente a normalidade de resíduos (Tabela 3). Trata-se de uma estratégia comum diante de eventual violação de premissas aplicadas a análises estatísticas paramétricas e/ou má especificação de modelos matemáticos de regressão linear (GUJARATI *et al.*, 2019; BURTON, 2021; ROCHA *et al.*, 2023; MOORE *et al.*, 2024). É conveniente enfatizar que diversas alternativas ainda podem ser adotadas diante de tal violação, como a regressão quantílica e inteligências artificiais (CAMPOS; LEITE, 2017; CONSENZA *et al.*, 2021; FARIAS *et al.*, 2021; LIMA *et al.*, 2021).

A associação positiva observada entre as informações de diâmetro e altura com os volumes lenhoso e aparente (Tabela 2) refletiu a coerência biológica, onde se espera mais estoque de crescimento em fustes de maior área seccional e extensão hipsométrica (CAMPOS; LEITE, 2017; TAIZ *et al.*, 2017). A forte correlação entre variáveis logaritmizadas (Tabela 1; $r > 0,96$ e $p \leq 0,05$), provavelmente, promoveu a melhoria da qualidade preditiva dos modelos lineares em estudo. Isso se deve à capacidade logarítmica de linearizar comportamentos não lineares, tornando relações funcionais mais adequadas para modelos que pressupõem a linearidade (BURTON, 2021; FARIAS *et al.*, 2021).

A especificação correta de variáveis em modelos matemáticos deve considerar diversos diagnósticos estatísticos e de comportamento biológico das suas estimativas de volume. A adição de informações da altura aos modelos ampliou a explicação da variabilidade total e, conseqüentemente, uma descrição mais precisa do comportamento volumétrico dos colmos de *D. giganteus* (menores valores de RQEM e MDA), em comparação com a utilização exclusiva de variáveis diamétricas. (Tabelas 4 e 5). Ressalta-se que o uso apenas de preditores diamétricos na modelagem resultaria em estimativas idênticas de volume para fustes de diâmetros iguais, mas alturas distintas. Tal cenário contradiria a

expressão da diversidade fenotípica da forma do fuste devido à eventual variabilidade ambiental e sua interação com a carga genética vegetal (SINGNAR *et al.*, 2015; CAMPOS; LEITE, 2017; TAIZ *et al.*, 2017).

Apesar da flexibilidade de modelos não lineares em descrever o comportamento de diferentes fenômenos naturais, a presença de parâmetros não significativos ($p > 0,05$) pelo teste t (Tabelas 4 e 5) sugeriu a possibilidade de redundância, inclusão de variáveis irrelevantes aos modelos e/ou ocorrência de overfitting. Esses aspectos comprometem a eficácia preditiva e interpretativa dos modelos, aumentando a complexidade sem contribuir de fato para a explicação da variabilidade contida nos dados (GUJARATI *et al.*, 2019).

A linearização de modelos não lineares por meio da transformação logarítmica e posterior ajuste via MQO se mostrou uma alternativa promissora para a expressão de efeito estatístico dos parâmetros formulados (Tabelas 4 e 5). O melhor desempenho das equações oriundas dos modelos lineares logaritmos baseados no diâmetro e a altura dos fustes para a predição volumétrica forneceu uma representação precisa da complexidade subjacente aos processos de crescimento e desenvolvimento dos colmos de *D. giganteus*.

Posto que o modelo logaritmizado de Spurr (M9) seja mais parcimonioso do que aquele de Schumacher-Hall (M10), ambos exibiram estimativas volumétricas semelhantes (Figuras 1 e 2). Os valores de probabilidade obtidos pelo teste de Breusch-Pagan (Tabela 3) conferiram maior estabilidade de variâncias ao segundo modelo citado em relação ao primeiro; revelando uma diferença de 1,7 e 1,6 vezes nos valores de probabilidade para a estimativa dos volumes lenhoso e aparente, respectivamente. Essa diferença pode ser justificada, em parte, à maneira como os efeitos dos preditores foram incorporados aos modelos matemáticos. No primeiro modelo, são considerados os impactos individuais de duas variáveis biométricas, enquanto o segundo descreve matematicamente a interação entre o quadrado do diâmetro e a altura dos colmos.

O aumento do percentual de volume vazio dos colmos de *D. giganteus* com o crescimento em diâmetro e altura foi mais acentuado do que o volume lenhoso, (Figura 1), o que sugere provável adaptação genética evolutiva para a otimização da sustentação estrutural e suporte ao crescimento vegetal. Conforme (SINGNAR *et al.*, 2015; STOCHERO *et al.*, 2023), colmos de lenho mais espessos e de maior volume vazio proporcionam resistência mecânica, leveza, tenacidade e resistência a forças externas.

A assertividade de decisões e o sucesso da gestão florestal depende da qualidade e detalhamento das informações disponíveis. O uso de modelos lineares se mostrou uma opção favorável ao analista de dados na predição volumétrica dos colmos de *D. giganteus*. Os

resultados obtidos subsidiam o desenvolvimento de futuras pesquisas e compreensão acerca da dinâmica de crescimento vegetal, sobretudo, aplicada a outras espécies com potencial exploratório de materiais lenhosos.

5 CONCLUSÕES

A transformação logarítmica de variáveis é uma ferramenta operacionalmente viável na busca de atendimento a premissas do método dos mínimos quadrados ordinários e melhoria preditiva de modelos lineares para a estimativa volumétrica de colmos de *D. giganteus*.

A linearização de modelos volumétricos não lineares por meio da aplicação de propriedades logarítmicas é uma alternativa promissora para a expressão do efeito estatístico de parâmetros especificados. Os ajustes dos modelos de Spurr e Schumacher-Hall podem ser usados na sua forma logaritmizada, com precisão e sem viés.

REFERÊNCIAS

- AHV – The Australasian Virtual Herbarium. ***Dendrocalamus giganteus* records provided by The Australasian Virtual Herbarium**. Disponível em: <https://avh.ala.org.au/occurrences/search?taxa=Dendrocalamus+giganteus#tab_mapView>. Acesso em: 10 mar. 2024.
- BURTON, A. L. OLS (Linear) Regression. In: BARNES, J. C.; FORDE, D. R. (Eds.). **The encyclopedia of research methods in criminology and criminal justice**. Hoboken: John Wiley & Sons, 2021. p. 509-514.
- CAMPOS, J. C. C.; LEITE, H. G. **Mensuração Florestal: perguntas e respostas**. 5. ed. Viçosa: Ed. UFV, 2017. 636p.
- CLIMATE-DATA.ORG. **Clima: São João Evangelista**. Disponível em: <<https://pt.climate-data.org/america-do-sul/brasil/minas-gerais/sao-joao-evangelista-175926/>>. Acesso em: 10 mar. 2024.
- CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente. **Portaria nº 392**, de 25 de junho de 2007. Definição de vegetação primária e secundária de regeneração de Mata Atlântica no Estado de Minas Gerais. Disponível em: <<http://www.siam.mg.gov.br/sla/download.pdf?idNorma=6991>>. Acesso em: 10 mar. 2024.
- CONSENZA, D. N.; KORHONEN, L.; MALTAMO, M.; PACKALEN, P.; STRUNK, J. L.; NÆSSET, E.; GOBAKKEN, T.; SOARES, P.; TOMÉ, M. Comparison of linear regression, k-nearest neighbour and random forest methods in airborne laser-scanning-based prediction of growing stock. **Forestry**, v. 94, p. 311-323, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1093/forestry/cpaa034>. Acesso em: 10 mar. 2024.
- DANTAS, D.; PINTO, L. O. R.; LACERDA, T. H. S.; CORDEIRO, N. G.; CALEGARIO, N. Accuracy of tree height estimation with model extracted from artificial neural network and new linear and nonlinear models. **Acta Scientiarum**, v. 46, e63286, 2024. Disponível em : <https://doi.org/10.4025/actasciagr.v46i1.63286>. Acesso em: 10 mar. 2024.
- ELZHOV, T.; MULLEN, K. M.; SPIESS, A.; BOLKER, B. **minpack.lm**: R interface to the Levenberg-Marquardt nonlinear least-squares algorithm found in MINPACK, Plus Support for Bounds. 2023. Disponível em: <<https://cran.r-project.org/web/packages/minpack.lm/minpack.lm.pdf>>. Acesso em: 10 mar. 2024.
- FARIAS, A. A.; SOARES, C. P. B.; LEITE, H. G.; SILVA, G. F. Quantile regression: prediction of growth and yield for a eucalyptus plantation in northeast Brazil. **European Journal of Forest Research**, v. 140, p. 983-989, 2021. Disponível em : <https://doi.org/10.1007/s10342-021-01380-1>. Acesso em: 10 mar. 2024.
- FOX, JM.; WEISBERG, S.; PRICE, B. **Package ‘car’**: companion to applied regression. 2023. Disponível em : <<https://cran.r-project.org/web/packages/car/car.pdf>>. Acesso em: 10 mar. 2024. Acesso em: 10 mar. 2024.

GUJARATI, D. N.; PORTER, D. C.; PAL, M. **Basic Econometrics**. 6. ed. Nova York: McGraw Hill, 2020. 952p.

HAMMER, B.; FRASCO, M. **Metrics: evaluation metrics for machine learning**. 2022. Disponível em: <<https://CRAN.Rproject.org/package=Metrics>>. Acesso em: 10 mar. 2024.

HEINTZMANN, A.; ARTIGUES, C.; BENDOTII, P.; NGUEVEU, S. U.; ROTTNER, C. A comparison of alternative models for solving a non-linear single plant Hydro Unit Commitment problem. **Computers & Operations Research**, v. 165, 106591, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cor.2024.106591>. Acesso em: 10 mar. 2024.

KALANZI, F.; MWANJA, C. K. Effect of nodal cutting position and plant growth regulator on bud sprouting of *Dendrocalamus giganteus* Wall. Ex Munro in Uganda. **Advances in Bamboo Science**, v. 2, 100016, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.bamboo.2023.100016>. Acesso em: 10 mar. 2024.

LAFETÁ, B. O.; BARBOSA, I. W. B. S.; OLIVEIRA, A. G.; VIEIRA, D. S.; PENIDO, T. M. A. Comprimentos de seção e altura de fustes na cubagem rigorosa em diferentes espaçamentos de eucalipto. **Agrarian**, v. 14, n. 53, p. 360-370, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.30612/agrarian.v14i53.15237>. Acesso em: 10 mar. 2024.

LIMA, R. B.; FERREIRA, R. L. C.; SILVA, J. A. A.; ALVES JÚNIOR, F. T.; OLIVEIRA, C. P. Estimating tree volume of dry tropical forest in the Brazilian semi-arid region: a comparison between regression and artificial neural networks. **Journal of Sustainable Forestry**, v. 40, n. 3, p. 281-299, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/10549811.2020.1754241>. Acesso em: 10 mar. 2024.

MARTINS, J. F. C.; RIBEIRO, J. C.; PADILHA, C. L.; PELISSARI, A. L.; BEHLING, A.; RIBEIRO, R. Modelagem volumétrica de árvores de acácia-negra em povoamentos de regiões do Rio Grande do Sul. **BIOFIX Scientific Journal**, v. 5, n. 2, p. 195-202, 2020. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.5380/biofix.v5i2.70066>. Acesso em: 10 mar. 2024.

MOORE, R. D. Fitting power-law relationships in watershed science and analysis, with an example using the R language. **Journal of Watershed Science and Management**, v. 7, n. 1, p. 1-14, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.22230/jwsm.2024v7n1a53>. Acesso em: 10 mar. 2024.

R CORE TEAM. **R: A language and environment for statistical computing**. Vienna: R Foundation for Statistical Computing. 2024.

RIVERA-SEGURA, R.; MOYA, R.; GAITÁN-ALVAREZ, J.; GRANADOS-GAMBOA, M. Analysis of the physical-mechanical properties of *Dendrocalamus asper* (Schult.) versus two *Guadua angustifolia* (Kunth) varieties, South and Caribe in the Atlantic Region of Costa Rica. **Advances in Bamboo Science**, v. 6, 100057, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.bamboo.2024.100057>. Acesso em: 10 mar. 2024.

ROCHA, J. S.; PELISSARI, A. L.; FIORENTIN, L. D.; LANSSANOVA, L. R.; CYSNEIROS, V. C.; RODRIGUES, C. K. Estratégias para transformação de variáveis na modelagem de povoamentos e florestas naturais. **Scientia Plena**, v. 19, 077302, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.14808/sci.plena.2023.077302>. Acesso em: 10 mar. 2024.

SANQUETTA, C. R.; INOUE, M. N.; CORTE, A. P. D.; PÉLLICO NETTO, S.; MOGNON, F.; WOJCIECHOWSKI, J.; RODRIGUES, A. L. Modeling the apparent volume of bamboo culms from Brazilian plantation. **African Journal of Agricultural Research**, v. 10, n. 42, p. 3977-3986, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.5897/AJAR2014.9176>. Acesso em: 10 mar. 2024.

SANTOS, F. M.; TERRA, G.; CHAER, G. M.; MONTE, M. A. Modeling the height-diameter relationship and volume of young African mahoganies established in successional agroforestry systems in northeastern Brazil. **New Forests**, v. 50, p. 389-407, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11056-018-9665-1>. Acesso em: 10 mar. 2024.

SCHREIBER, S. G.; SCHREIBER, S.; TANNA, R. N.; ROBERTS, D. R.; ARCISZEWSKI, T. J. Statistical tools for water quality assessment and monitoring in river ecosystems – a scoping review and recommendations for data analysis. **Water Quality Research Journal**, v. 57, n. 1, 40-57, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.2166/wqrj.2022.028>. Acesso em: 10 mar. 2024.

SILVA, G. V.; FARIAS, D. T.; COLDEBELLA, R.; WACHT, W. L.; PEDRAZZI, C. Biomassa de *Dendrocalamus giganteus* como recurso bioenergético. **Ciência Florestal**, v. 32, n. 4, p. 2244-2262, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.5902/1980509867680>. Acesso em: 10 mar. 2024.

SINGNAR, P.; NATH, A. J.; DAS, A. K. Culm characteristics and volume-weight relationship of a forest bamboo (*Melocanna baccifera* (Roxb.) Kurz) from northeast India. **Journal of Forestry Research**, v. 26, n. 4, p. 841-849, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11676-015-0099-8>. Acesso em: 10 mar. 2024.

STOCHERO, C.; CANDATEN, L.; MANGINI, T. S.; TREVISAN, R.; ELOY, E. Technological properties of bamboo at different ages and positions in the longitudinal direction. **Amazonian Journal of Agricultural and Environmental Sciences**, v. 166, p., 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.5281/zenodo.10419205>

TAIZ, L.; ZEIGER, E.; MOLLER, I.; MURPHY, A. **Fisiologia e desenvolvimento vegetal**. 6 ed. Porto Alegre: Artmed, 2017. 888p.

VARIN, S. Comparing the predictive performance of OLS and 7 robust linear regression estimators on a real and simulated datasets. **International Journal of Engineering Applied Sciences and Technology**, v. 5, n. 11, p. 9-23, 2021.

YANG, T. Sales prediction of Walmart sales based on OLS, random forest, and XGBoost models. **Highlights in Science, Engineering and Technology**, v. 49, p. 244-249, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.54097/hset.v49i.8513>. Acesso em: 10 mar. 2024.

ZAND, A. D.; ABYANEH, M. R. Adsorption of Lead, manganese, and copper onto biochar in landfill leachate: implication of non-linear regression analysis. **Sustainable Environment Research**, v. 30, n. 18, p. 1-16, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1186/s42834-020-00061-9>. Acesso em: 10 mar. 2024.